tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

THÈSE

présentée par

Mathieu SUZANNE

en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen

Discipline : *Sciences Physiques*
Spécialité : *Énergétique*
Formation doctorale : *SPMII*
Laboratoire d'accueil : *CORIA*
Directeur de thèse : *Pr Alexis Coppalle*

Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie

Thèse soutenue le 5 novembre 2009 devant le jury composé de :

Rapporteurs :	
Jean-Pierre Garo	Maitre de conférences à l'Université de Poitiers
Olivier Delémont	Professeur assistant à l'Ecole des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne
Examinateurs :	
Olivier Vauquelin	Professeur à l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels
Daniel Joyeux	Directeur d'Efectis France
Hervé Bazin	Responsable de la section ingénierie du feu au Laboratoire Central de la Préfecture de Police
Aurélien Thiry	Ingénieur-chercheur au Laboratoire Central de la Préfecture de Police
Alexis Coppalle	Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

On ne peut voir que ce que l'on observe, et l'on observe que ce qui se trouve déjà dans notre esprit.

Alphonse Bertillon

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer de sincères remerciements à Jean-Pierre Garo et Olivier Delémont qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ce travail, ainsi qu'à Daniel Joyeux et Olivier Vauquelin pour leur participation au jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Alexis Coppalle pour avoir encadré cette thèse et m'avoir fait confiance sur ce long chemin loin d'être tout tracé.

Mes remerciements vont également à :

Bruno Fargette, Jean-Paul Ricetti, Jacques Donati et Isabelle Chaussard pour avoir rendu cette thèse possible au LCPP.

Hervé Bazin pour avoir su me communiquer, avec énormément de passion, ses connaissances en incendie et plus particulièrement en investigation, ainsi que pour son entrain si expansif.

Aurélien Thiry pour sa patience (il en fallait !), ses conseils (ils furent nombreux !), son coup d'œil si avisé (sur tant de choses !) et les nombreuses discussions fructueuses.

Axel Bellivier pour son aide et ses corrections.

L'ensemble du personnel du LCPP pour avoir su égayer les moments difficiles avec tant de bonne humeur. En particulier, merci à Aurélien Leroy, Nicolas Dreuille, Adissa Traore, Jacky Souris, Marie-Claude Le Meur, Delphine Garcia, Sylvie Dupont, Eloise Mercier, Dominique Ilsbrock, Karine Van Niel, Freddy Msika et tant d'autres…

Jean-Pierre Grizou et Tony Massio qui m'ont si souvent ouvert la voie dans les décombres encore fumants tout en me déchiffrant le sinistre d'un regard axé intervention, ainsi que tant d'autres membres de la BSPP.

Anne-laure qui m'a tant apporté et qui a su trouver les mots pour me convaincre de commencer cette incroyable aventure de trois ans de recherche.

Toutes les personnes que j'ai croisées pendant ces quelques années et qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidé à avancer. Je pense notamment, pour mes débuts sur FDS, à Sylvain Desanghère, Eric Guillaume, Franck Didieux, etc.

Caroline pour son travail de l'ombre, pour tous les bons moments déjà vécus et ceux qu'ils nous restent encore à vivre. Et puis pour tant d'autres choses encore !

Je tiens enfin à exprimer ma profonde gratitude envers ma famille qui, depuis plusieurs dizaines d'années, a toujours su m'épauler et être présente quand le besoin s'en est fait ressentir.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Liste des symboles

Lettres romaines

A	[$m^3.s^{-1}.kg^{-1}$]	Facteur pré-exponentiel dans la loi d'Arrhenius de la vitesse de réaction en phase gazeuse du modèle d'Atreya
A_0	[m^2]	Surface de l'ouverture d'un compartiment
A_c	[m^2]	Surface de flamme conique
A_T	[m^2]	Surface totale d'un compartiment
A_{foy}	[m^2]	Surface du foyer
$b_{\Delta T}$	[m]	Rayon du panache où la variation de température a diminué de 50%
C		Coefficient quantifiant le caractère plus ou moins complet d'une réaction de combustion
c_p	[$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	Capacité calorifique massique à pression constante
D	[$m^2.s^{-1}$]	Coefficient de diffusion d'espèce
D^*	[m]	Diamètre caractéristique du feu
D_{calci}	[m]	Profondeur de calcination à l'intérieur d'un matériau
E	[$kJ.mol^{-1}$]	Energie d'activation dans la loi d'Arrhenius de la vitesse de réaction en phase gazeuse du modèle d'Atreya
f		Fraction de l'enthalpie de combustion des vapeurs transférée en retour à la surface du matériau
f_c		Fraction de l'enthalpie de combustion des vapeurs transférée en retour à la surface du matériau par convection
f_r		Fraction de l'enthalpie de combustion des vapeurs transférée en retour à la surface du matériau par rayonnement
F_{12}		Facteur de forme de 1 à 2
h	[$W{\cdot}m^{-2}.K^{-1}$]	Coefficient de transfert convectif
h_k	[$kW.m^{-2}.K^{-1}$]	Rapport entre la conductivité thermique d'un matériau et son épaisseur
H_0	[m]	Hauteur de l'ouverture d'un compartiment
$I(z)$		Intermittence à une distance z au-dessus d'une source calorifique
L	[m]	Hauteur de flamme estimée avec la corrélation d'Heskestad
L_b	[$W.m^{-2}$]	Luminance émise par le corps noir
L_v	[$J.kg^{-1}$]	Chaleur latente de vaporisation du combustible
M	[$W.m^{-2}$]	Puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir
$\dot{m}''$	[$kg.m^{-2}.s^{-1}$]	Débit massique surfacique de combustible

$\dot{m}''_{cr}$	[kg.m^{-2}.s^{-1}]	Débit massique critique de gaz de pyrolyse au point feu
$\dot{m}'''$	[kg.s^{-1}.m^{-3}]	Débit massique par unité de volume
$\dot{q}''_e$	[W.m^{-2}]	Flux externe de chaleur
$\dot{q}''_l$	[W.m^{-2}]	Perte de chaleur exprimée comme un flux à travers une surface
$\dot{q}''_r$	[W.m^{-2}]	Flux de chaleur rayonné
$\dot{q}''_e$	[W.m^{-2}]	Flux additionnel de chaleur reçu par la surface du combustible en provenance des frontières du compartiment
$\dot{q}''_f$	[W.m^{-2}]	Flux de chaleur provenant de la flamme
$\dot{q}''$	[W.m^{-2}]	Flux de chaleur à travers une surface
$\dot{Q}^*$		Dégagement de chaleur adimensionné - Nombre de Froude du feu
$\dot{Q}$	[kW]	Débit calorifique
$\dot{Q}_{f0}$	[kW]	Débit calorifique nécessaire pour avoir un embrasement généralisé
$\dot{Q}_c$	[kW]	Part du débit calorifique total transporté par convection
r	[m]	Distance radiale à l'axe du foyer
r_{foy}	[m]	Rayon du foyer
r_s		Rapport massique d'air sur le combustible à la stœchiométrie
S_e	[W.m^{-2}]	Terme relatif à l'accumulation de l'énergie dans le matériau
S_{feu}		Sévérité d'un feu
S_m	[m^2]	Surface d'un matériau traversée par un flux de chaleur
T	[K]	Température
T_{igni}	[K]	Température d'inflammation
T_0	[K]	Température sur l'axe du foyer
T_s	[K]	Température du solide
T_∞	[K]	Température du fluide loin du solide
u	[m.s^{-1}]	Vitesse du gaz de pyrolyse
u_0	[m.s^{-1}]	Vitesse verticale sur l'axe du panache
u_{0m}	[m.s^{-1}]	Vitesse verticale maximale sur l'axe du panache avant la hauteur moyenne de flamme
x	[m]	Distance normale à une surface
Y_F		Fraction massique de vapeurs combustibles dans la phase gazeuse
Y_O		Fraction massique d'oxygène en phase gazeuse
z	[m]	Hauteur au-dessus d'un foyer
Z		Fraction de mélange
Z_f		Fraction de mélange stœchiométrique
$Z_{f,eff}$		Fraction de mélange stœchiométrique corrigée

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Lettres grecques

ε		Émissivité
δ	[m]	Épaisseur de la couche limite
ρ	[kg.m^{-3}]	Densité
α	[m^2.s^{-1}]	Diffusivité thermique
α_c	[kW.s^{-2}]	Coefficient de croissance d'un feu prescrit
ΔH_c	[J.kg^{-1}]	Enthalpie de combustion
ΔH_v	[kJ.kg^{-1}]	Enthalpie de vaporisation
ΔH_m	[kJ.kg^{-1}]	Enthalpie de vaporisation de l'eau contenue dans le matériau
κ	[m^{-1}]	Coefficient d'absorption
ξ	[m^{0,5}.s^{-1}] [m.kW-^{0,2}.s^{-1}] [m$^{4/4}$.kW$^{-1/3}$.s^{-1}]	Constante (dépend de la région de l'écoulement) dans la corrélation de McCaffrey
η		Constante (dépend de la région de l'écoulement) dans la corrélation de McCaffrey
χ_r		Fraction radiative de l'énergie chimique
λ	[W.m^{-1}.K^{-1}]	Conductivité thermique

Constantes physiques

σ= 5,67x10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}	Constante de Stefan-Boltzmann
g = 9,81 m.s^{-2}	Accélération de la gravité
γ= 1.4	Rapport des capacités calorifiques pour l'air

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Table des matières

1 INTRODUCTION 1

2 PHENOMENES DU FEU APPLIQUES A L'INVESTIGATION POST-INCENDIE 5

2.1 Allumage d'un incendie 5

2.2 Décomposition chimique, pyrolyse et débit calorifique 10
2.2.1 Décomposition chimique 10
2.2.2 Modèle d'Atreya 11
2.2.3 Débit calorifique 14

2.3 Modes de combustion rencontrés en situation d'incendie 14
2.3.1 Combustion lente ou smoldering 14
2.3.2 Flamme de prémélange 17
2.3.3 Flamme de diffusion 18

2.4 Panache thermique 20

2.5 Jet sous plafond 22

2.6 Feux en milieux confinés ventilés 22

3 CHOIX DE L'OUTIL NUMERIQUE POUR LES BESOINS EN INVESTIGATION 29

3.1 Généralités sur la modélisation numérique en l'incendie 29

3.2 Présentation sommaire de FDS 30

3.3 Validation de l'outil numérique 31
3.3.1 Stratégie de validation 31
3.3.2 Détermination d'un critère de taille de maille 33
3.3.2.1 Étude bibliographique 33
3.3.2.2 Étude complémentaire sur un cas de chambre d'hôtel 36
3.3.2.2.1 Présentation du cas 36
3.3.2.2.2 Propagation à partir du brûleur 38
3.3.2.2.3 Sensibilité du débit calorifique à la taille de maille 39
3.3.2.2.4 Sensibilité de l'énergie à la taille de maille 41
3.3.2.2.5 Sensibilité de la température à la taille de maille 42
3.3.2.2.6 Impact de la taille de maille sur le temps de calcul 45
3.3.2.2.7 Étude de sensibilité de la propagation du foyer en fonction de la puissance du brûleur initiant la combustion 45
3.3.2.2.8 Conclusion sur l'influence de la puissance du brûleur d'allumage 51
3.3.2.2.9 Simulations dans la configuration porte de la chambre fermée 52
3.3.2.2.10 Conclusion : valeur optimale du R^* pour le cas d'un feu dans une chambre d'hôtel 55
3.3.3 Modélisation des hauteurs et des températures de flamme 56
3.3.3.1 Aperçu de la problématique 56
3.3.3.2 Étude bibliographique sur les hauteurs de flamme 57
3.3.3.2.1 Corrélations d'Heskestad 57

3.3.3.2.2 Modélisation des hauteurs de flamme 59
3.3.3.3 Cas d'application de la hauteur de flamme 62
3.3.3.3.1 Présentation du cas expérimental et de la stratégie de simulation 62
3.3.3.3.2 Sensibilité à la taille de maille des températures de flamme 64
3.3.3.3.3 Sensibilité à la taille de maille des hauteurs de flamme 65
3.3.3.3.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille 66
3.3.3.4 Valeur optimale du R^* pour la modélisation de la hauteur de flamme 66
3.3.4 Modélisation de l'écoulement dans le panache 67
3.3.4.1 Étude bibliographique de l'écoulement dans le panache 67
3.3.4.1.1 Corrélations d'Heskestad 67
3.3.4.1.2 Corrélation de McCaffrey 69
3.3.4.1.3 Modélisation de l'écoulement dans le panache 69
3.3.4.2 Cas d'application de la modélisation de l'écoulement dans le panache 73
3.3.4.2.1 Présentation du cas expérimental 73
3.3.4.2.2 Sensibilité à la taille de maille de la température dans le panache 73
3.3.4.2.3 Sensibilité à la taille de maille de la vitesse dans le panache 76
3.3.4.2.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille 77
3.3.4.3 Valeur optimale du R^* pour la modélisation de l'écoulement dans le panache 78
3.3.5 Modélisation de l'écoulement dans le jet sous plafond 78
3.3.5.1 Étude bibliographique de l'écoulement dans le jet sous plafond 78
3.3.5.1.1 Corrélation d'Alpert 78
3.3.5.1.2 Modélisation de l'écoulement dans le jet sous plafond 79
3.3.5.2 Cas d'application de l'écoulement dans le jet sous plafond 81
3.3.5.2.1 Présentation du cas expérimental et des choix de calcul 81
3.3.5.2.2 Sensibilité à la taille de maille de la température dans le jet sous plafond 81
3.3.5.2.3 Sensibilité à la taille de maille de la vitesse dans le jet sous plafond 85
3.3.5.2.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille 87
3.3.5.3 Valeur optimale du R^* pour l'écoulement dans le jet sous plafond 88
3.3.6 Raffinement du maillage 89
3.3.6.1 Cas de référence 90
3.3.6.2 Raffinement horizontal 91
3.3.6.3 Raffinement par bloc 91
3.3.6.4 Autres stratégies de raffinement 93
3.3.6.5 Débit calorifique et énergie totale dégagée 93
3.3.6.6 Température pour un raffinement horizontal 94
3.3.6.7 Température pour un raffinement par blocs 96
3.3.6.8 Stratégie de raffinement de maillage à adopter 98
3.3.6.9 Optimisation des maillages par blocs 99
3.3.6.9.1 Présentation du cas de référence et des différents maillages utilisés 100
Cas des multiblocs sans chevauchement 100
3.3.6.9.2 Résultats pour les différents maillages multiblocs 102
3.3.6.9.3 Présentation du cas de référence et des différents maillages non-conformes utilisés 104
3.3.6.9.4 Résultats pour les différents maillages non-conformes utilisés 105
3.3.6.9.5 Influence sur le foyer de la proximité de la frontière entre les deux blocs 109
3.3.6.9.6 Cas d'étude ayant une combustion contrôlée par la ventilation 114
3.3.7 Conclusion sur la validation de l'outil numérique 117

4 METHODOLOGIE D'INVESTIGATION 119

4.1 Pourquoi une investigation post incendie ? 119

4.2 Méthodologie générale d'investigation basée sur l'expertise 119
4.2.1 Approche spatiale : D'une vue d'ensemble à celle du détail 120
4.2.2 À la recherche d'une cause 124
4.2.3 Justifications d'une cause d'incendie 124
4.2.3.1 Recours à l'expérimentation 124

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.2.3.2 Développement de l'incendie 125
4.2.3.3 Intégration des témoignages 125
4.2.3.4 Analyse des résidus d'incendie 126

4.3 Introduction de l'outil numérique dans l'investigation post incendie 126
4.3.1 Application courante des modèles de simulations numériques d'incendie 126
4.3.2 Applications de modèles numériques de simulations d'incendie à des reconstitutions post incendie 127
4.3.3 Applications de modèles numériques de simulations d'incendie dans un cadre d'investigations post incendie 128

4.4 Méthode d'investigation utilisant la modélisation informatique introduite au Laboratoire Central de la Préfecture de Police 129
4.4.1 Approche générale d'investigation pour la modélisation informatique 129
4.4.2 Recherches bibliographiques pour l'interprétation des sollicitations thermiques aux points de comparaison 131
4.4.2.1 Dépôt de suies 131
4.4.2.2 Réponse d'un vitrage à une sollicitation thermique 133
4.4.2.3 Réponse du béton à une sollicitation thermique 134
4.4.2.4 Réponse du plâtre à une sollicitation thermique 135
4.4.2.5 Réponse du bois à une sollicitation thermique 136
4.4.2.6 Réponse de textiles divers à une sollicitation thermique 138
4.4.2.7 Réponse de métaux à une sollicitation thermique 140
4.4.2.8 Réponse des plastiques à une sollicitation thermique 140
4.4.2.9 Bilan des recherches bibliographiques 143
4.4.3 Expériences menées pour aider à la caractérisation des points de comparaison 144
4.4.3.1 Dispositifs d'essais de comportement au feu 144
4.4.3.2 Expériences en laboratoire 146
4.4.3.3 Expériences sur feux réels 150
4.4.3.3.1 Essais de la rue Boinod 151
4.4.3.3.2 Essais du Puy en Velay 154
4.4.4 Applicabilité des points de comparaison pour la validation de scénarios d'incendie 164
4.4.4.1 Nouveaux essais à développer 164
4.4.4.2 Moyen d'utilisation des points de comparaison 165
4.4.4.3 Difficultés dans l'utilisation des points de comparaison 167

4.5 Conclusions 168

5 APPLICATION A DES CAS REELS 169

5.1 Combustion d'un matelas en mousse polyuréthane 169
5.1.1 Expérience dans un caisson de transport maritime 172
5.1.2 Simulation de l'expérience dans le caisson de transport maritime 177
5.1.3 Expérience dans un appartement 183
5.1.4 Simulation de l'expérience dans l'appartement 186
5.1.5 Sollicitation thermique d'hypothétiques points de comparaison disposés dans l'appartement 191
5.1.6 Conclusions 195

5.2 Investigations sur l'incendie d'un appartement 195
5.2.1 Scène d'incendie 195
5.2.1.1 Description du bâtiment 195
5.2.1.2 Description des locaux touchés par l'incendie 196
5.2.1.3 Chronologie des faits 197
5.2.1.4 Analyse de la scène d'incendie 198
5.2.1.5 Scénario retenu après enquête 204
5.2.2 Reconstitution numérique de divers scénarios d'incendie 205

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.2.1 Scénarios simulés 205
5.2.2.2 Stratégie de simulation 205
5.2.2.3 Départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 207
5.2.2.4 Départ de feu sur le lit 208
5.2.2.5 Départ de feu sur le lit avec un accélérant 209
5.2.2.6 Départ de feu dans la cuisine 210
5.2.3 Choix du scénario le plus probable 210
5.2.3.1 Débit calorifique dans le domaine de calcul 210
5.2.3.2 Départ sur le lit avec ou sans accélérant 211
5.2.3.2.1 Températures 211
5.2.3.2.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune 217
5.2.3.3 Départ dans la cuisine 219
5.2.3.3.1 Températures 219
5.2.3.3.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune 222
5.2.3.4 Départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 222
5.2.3.4.1 Températures 222
5.2.3.4.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune 225
5.2.3.5 Conclusions sur le choix du scénario le plus probable 226
5.2.4 Apport de la simulation numérique sur cette investigation 228

6 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 229

7 BIBLIOGRAPHIE 235

8 ANNEXES 245

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

1 Introduction

De tous temps, des incendies tristement célèbres ont marqué les mémoires et joué un rôle important dans le développement de l'humanité.
L'incendie de Troie par les Grecs, ayant eu lieu en -1184 ou -1183 av J-C, est déjà raconté par Homère dans l'Iliade. Cet incendie était bien évidemment d'origine criminelle. Dans les rapports des fouilles archéologiques entreprises pour retrouver les ruines de la cité, les auteurs n'hésitent pas à employer le terme de « dévastateur » pour qualifier l'incendie. Pendant le reste de l'antiquité, d'autres feux sont marquants : celui de la bibliothèque d'Alexandrie en -47 qui aurait détruit entre 5 et 10% des documents conservés. Il aurait débuté suite à la propagation du feu à partir de la flotte de la ville, elle-même incendiée par les troupes de Jules César. Il y a également le Grand incendie de Rome du 18 au 27 juillet 64 qui a été jugé comme accidentel par certain et commandé par Néron par d'autres, ce dernier accusant à son tour les Chrétiens pour faire taire les rumeurs à son sujet.
Au moyen âge, il peut être évoqué celui du grand incendie de la Madeleine du 22 juillet 1487 qui, à partir d'une échoppe de menuisier, ravagea la ville de Bourges, ce qui marqua le début de son déclin d'après certains historiens.
Au XVIIe siècle, il faut se rappeler du grand incendie de Londres qui se propagea dans la ville pendant trois jours du 2 au 5 septembre 1666 après avoir pris naissance dans une boulangerie de Pudding Lane. Il fut la cause de fortes tensions entre les communautés qui conduisirent même à des émeutes. Selon les estimations, il coûta à la ville plus d'un milliard de Livres Sterling de 2005. Un aspect positif lui est cependant attribué car il permit, selon certaines sources, d'éviter par la suite des épidémies de peste parce qu'un grand nombre de logements insalubres et de vecteurs de propagations de la maladie avait été détruit par les flammes.
Plus récemment, au XXe siècle, pourrait être évoqué le très célèbre incendie du Reichstag le 27 février 1933 à Berlin, un sinistre d'origine criminelle une fois encore. Il a par la suite été exploité politiquement par les nazis qui en ont profité pour éditer un décret annulant l'essentiel des libertés civiles de la république de Weimar et ouvrant la voie à l'établissement du pouvoir total des nazis et à de la répression envers les communistes allemands.

Malgré l'impact néfaste des incendies sur la politique, l'économie et la population d'une ville, d'un pays, voire d'un empire, le feu a également permis à l'homme d'évoluer au cours des âges en lui permettant de cuire sa nourriture, d'éloigner les prédateurs, de se chauffer, de travailler les métaux. Et cela depuis plus de 400 000 ans et les premières traces de feux entretenus.

Les débuts de la science du feu telle qu'elle est connue aujourd'hui ne sont pas réellement définis. Certains historiens avancent qu'elle n'a commencé à apparaître qu'à partir du XVIIe siècle avec des scientifiques tels que Van Helmot. Lavoisier, au milieu du XVIIIe, fut le premier à considérer le feu comme une réaction chimique entre un combustible et l'oxygène de l'air.
Comme pour la science du feu, les débuts de l'investigation post incendie ne sont pas clairement déterminés. Il est cependant évident que l'évolution de la seconde est fortement liée à la première. De nos jours, l'investigation est une discipline qui trouve de nombreuses justifications à son existence.

Il y a quelques dizaines d'années, la majorité des investigations, qui pourrait être qualifiée d'empirique, s'appuyait souvent sur l'expérience de l'enquêteur. Celui-ci rattachait à la scène d'incendie étudiée des situations semblables qu'il avait vécu précédemment. De nos jours, l'empirisme n'est plus suffisant au regard de la justice, c'est pourquoi cet aspect est dorénavant couplé à une argumentation théorique, plus scientifique, des phénomènes de l'incendie pour expliquer par exemple le développement d'un foyer ou la capacité d'une source calorifique à initier un incendie. L'une des complexités de l'expertise réside dans cette nécessité d'étayer de plus en plus son jugement par la preuve. Chaque argument avancé pour justifier une théorie doit reposer sur une explication scientifique basée sur des aspects théoriques ou expérimentaux. Cependant, à cause du caractère entropique du feu, il n'est pas toujours possible d'avancer les justifications suffisantes à chaque théorie même si cette dernière est évidente aux yeux de l'expert. En effet, les traces et les indices de tout ordre sont détruits par la chaleur, les fumées, l'effondrement des locaux et l'intervention des secours qui déplacent des objets et effacent d'autres preuves. Il arrive donc encore

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

que l'investigateur ne soit pas capable d'expliquer ses scénarios, d'en privilégier l'un parmi tant d'autres qui lui semblent probables ou même de convaincre d'autres personnes du bien fondé de sa théorie. C'est pourquoi, en 2005, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) a ressenti la nécessité de développer de nouveaux outils d'aide à l'investigation.

Au regard de la maturité des codes de calcul incendie dorénavant couramment utilisés dans le secteur nucléaire ou celui de la sécurité incendie, et sous l'impulsion du Projet National de l'Ingénierie de la Sécurité Incendie, il a été décidé d'évaluer le recours à la simulation numérique comme complément à l'investigation ou comme outil supplémentaire à mettre à disposition de l'investigateur. C'est dans ce but qu'une thèse, financée par la Préfecture de Police de Paris, a été entreprise sous la tutelle d'Alexis Coppalle, Professeur à l'INSA de Rouen et chercheur au sein du Complexe de Recherche International en Aérothermochimie (CORIA).

Lors de son enquête, si l'objectif principal est de déterminer la cause du sinistre, il est courant que l'investigateur ait notamment besoin de :

- répondre à des questions ponctuelles comme la possibilité pour un foyer d'enflammer un élément disposé à une distance donnée dans un volume connu,
- privilégier dans l'espace une origine de l'incendie plutôt qu'une autre,
- choisir entre plusieurs dynamiques de développement d'un d'incendie
- vérifier une chronologie résultant de témoignages multiples

La façon d'utiliser les codes de calcul pour aider l'investigateur dans ses choix est donc très vaste. Comme les deux derniers exemples le laissent penser, les aspects temporels ont parfois un rôle extrêmement important dans les processus d'investigation post-incendie. Certaines hypothèses de départ de feu peuvent être écartées par l'investigateur si le développement temporel du foyer dans le scénario considéré ne correspond pas aux informations collectées lors de l'investigation (témoignages, feu couvant, sensibilisation de la détection incendie, etc.). Le recours à la simulation numérique pourrait donc être envisagé pour aider à répondre à des interrogations portant sur les aspects temporels du développement de l'incendie. Mais se cantonner à ces interrogations temporelles reviendrait à restreindre les possibilités d'un code de calcul susceptible de fournir bien d'autres informations en particulier pour tout ce qui concerne les sollicitations thermiques dans le domaine de calcul. Il est par conséquent essentiel d'évaluer la simulation du développement du foyer sur les premières minutes d'un incendie.

L'outil numérique d'aide à l'investigation choisi est un code à champs développé par le *National Institute of Standards and Technology* et appelé *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Les raisons de ce choix sont expliquées par la suite dans le chapitre 3 intitulé *Choix de l'outil numérique pour des besoins en investigation*.

Le chapitre 2 qui suit cette introduction présente une synthèse bibliographique des éléments théoriques concernant la physique du feu qui permet d'introduire les notions utilisées dans la suite du mémoire.

Dans un premier temps, il a fallu s'assurer de la capacité de FDS à fournir des résultats d'une précision suffisante pour une application en investigation post-incendie. L'une des conséquences de ce travail est la détermination de critères d'utilisation optimums pour la mise en œuvre de FDS dans un but de reconstitution de sinistre. Ces critères qui sont déterminés afin de calculer des températures et des vitesses proches de valeurs obtenues expérimentalement ou à l'aide de corrélation se traduisent principalement par des conditions à respecter dans la finesse du maillage utilisé. Ce travail est présenté dans le chapitre 3.

Une fois le sinistre modélisé et les divers scénarios avancés par l'investigateur simulés, il faut confronter à une scène d'incendie, des résultats numériques obtenus par le calcul de température, de vitesse, de concentration en espèce ou encore de pression. Cette démarche, loin d'être évidente, nécessite en général d'associer, à des effets remarquables sur le sinistre (dégradation d'un plastique, bris d'une vitre, etc.), des sollicitations thermiques traduisant une exposition pendant un intervalle de temps à une température ou à un flux thermique incident. Un ensemble de recherche bibliographiques et d'essais est par conséquent réalisé et présenté dans le chapitre 4 pour relier les sollicitations thermiques aux effets remarquables, appelés points de comparaison. Ce chapitre contient également

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

une méthodologie d'investigation utilisant la modélisation qui a été rédigée pour intégrer dans la phase d'investigation la collecte des données nécessaires à la modélisation d'un incendie.
Par rapport aux autres reconstitutions d'incendie utilisant des codes de calcul dans un but d'investigation, l'approche présentée dans ce mémoire essaie de mettre en œuvre une démarche réellement argumentée et, surtout, formalisée pour confronter simulation et incendie réel et ainsi évaluer les différentes hypothèses avancées par l'investigateur.

Le chapitre 5 est l'application à des cas réels des résultats obtenus dans les chapitres précédents. Il s'attache, dans un premier temps, à présenter l'étude de la propagation d'un front de flamme à la surface d'un matelas en mousse polyuréthane. Ce scénario a été envisagé pour plusieurs raisons, la première étant que les feux de literie sont souvent rencontrés lors des enquêtes du LCPP et qu'ils sont régulièrement mortels. Il est donc important d'étudier la capacité de FDS à simuler de tels incendies, ce qui revient à s'intéresser au comportement de son modèle de pyrolyse.
Le second cas d'étude est l'application de la méthodologie et de la simulation à un incendie réel ayant eu lieu dans un foyer d'habitation pour personnes âgées. Cette étude permet d'évaluer sur un cas réel tout ce qui a été développé précédemment.

Alors qu'une investigation post incendie est rendue difficile du fait des modifications de la scène d'incendie par rapport à son état initial, changements causés par l'effet du feu et l'action des services de secours, la reconstitution numérique des sinistres est un challenge d'un niveau encore supérieur. Pour effectuer les simulations, de nombreuses données sont nécessaires pour alimenter le code de calcul et en particulier pour définir l'ensemble des matériaux ayant joué un rôle dans le développement de l'incendie. Ces données ne sont pas toujours disponibles, en particulier lorsque les matériaux ont été entièrement consumés ou fortement dégradés dans l'incendie. Un autre aspect souvent sous-estimé est l'état des amenées d'air au départ de l'incendie qui peut modifier totalement le développement du feu ; des incertitudes persistent parfois sur l'état d'ouverture d'une fenêtre ou sur l'instant où un changement se produit (bris partiel, total, fermeture). Malgré toutes ces difficultés, le travail présenté dans ce mémoire va s'efforcer de déterminer les conditions d'utilisation d'un code de calcul afin d'éprouver des scénarios d'incendie. Par conditions d'utilisation, il faut comprendre :

- la détermination des conditions nécessaires pour simuler le plus correctement possible les premières minutes d'un incendie
- l'optimisation de la mise en œuvre des codes de calcul
- le développement d'une méthode de comparaison entre les résultats numériques des simulations et les constats effectués par l'investigateur sur une scène d'incendie.

Ces travaux se proposent de comparer la simulation des premiers instants du feu à l'observation des effets post-incendie en utilisant une méthode originale.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

2 Phénomènes du feu appliqués à l'investigation post-incendie

Ce chapitre se propose de présenter un ensemble de phénomènes physiques qui seront étudiés dans la suite de cette thèse dans les chapitres traitant de l'évaluation de FDS pour une utilisation en investigation post-incendie, de la définition d'une méthodologie d'investigation s'appuyant sur les outils de simulation numérique et enfin de l'application des résultats à des cas réels. Seront abordés les phénomènes de base régissant l'allumage d'un incendie, la décomposition chimique et la pyrolyse d'un matériau lors de sa combustion, les différents modes de combustion rencontrés en situation d'incendie, les écoulements dans le panache thermique et dans le jet sous plafond et enfin le développement des foyers en milieux confinés ventilés.

2.1 Allumage d'un incendie

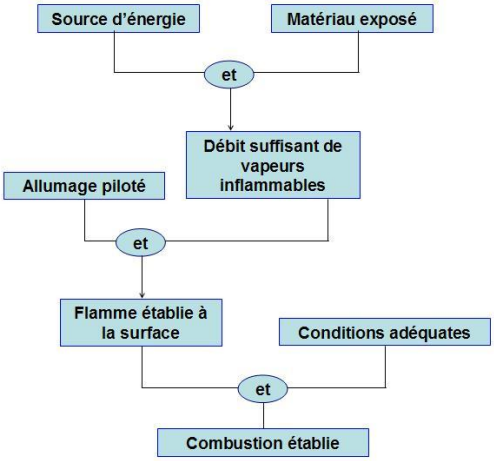
Tout incendie à étudier dans le cadre d'une investigation commence par son allumage. Il se définit comme l'initiation de la combustion [ISO 13 943], cette dernière étant une réaction d'oxydation auto-entretenue. L'allumage se définit également comme le processus par lequel une réaction exothermique rapide est initiée, réaction qui se propage ensuite en faisant subir aux matériaux impliqués des changements produisant des températures considérablement supérieures aux températures ambiantes [DRYSDALE 1999a]. Deux types d'allumage sont à distinguer l'auto-inflammation et l'inflammation pilotée.

De manière plus générale, quand un solide est chauffé jusqu'à ce que des gaz inflammables soient générés par un processus de décomposition chimique du matériau, il pyrolyse. Les gaz quittent la face chauffée du solide et, comme ils sont dégagés initialement dans une atmosphère uniquement composée d'air, ils ont tendance à diffuser loin de cette surface chauffée. Un mélange de combustible et d'air est ainsi créé au-dessus de la surface. Au départ, la concentration des gaz de pyrolyse est faible et l'inflammation est impossible. Quand le débit de combustible gazeux devient suffisant pour créer une zone où le mélange atteint la limite inférieure d'inflammabilité, l'allumage peut se produire si une source d'énergie est présente pour la provoquer. Lors de cette inflammation, les gaz sont mélangés et la flamme initiale peut donc être considérée comme étant de prémélange. Si la production de gaz de pyrolyse à partir de la surface du matériau est insuffisante, alors cette inflammation ne se traduit que par un flash ponctuel. Si le débit de combustible est suffisant, une flamme persistante établie alors au-dessus du matériau et elle est dite de diffusion [BABRAUSKAS 2003].

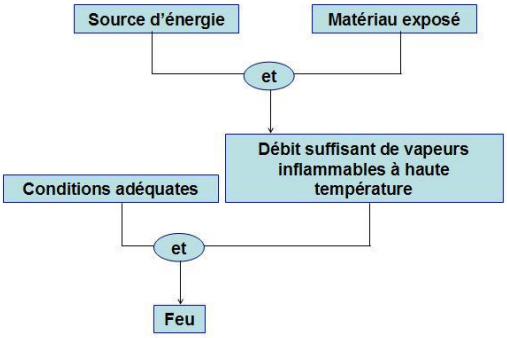
L'inflammation pilotée est définie comme l'allumage de vapeurs ou de gaz combustibles par une source d'énergie secondaire comme une flamme ou une étincelle [ISO 13 943]. Elle se produit quand une source de chaleur localisée est présente. L'apparition de ce phénomène est résumée dans le schéma 1 en supposant qu'une inflammation pilotée maintenue ne peut se produire que si un débit massique critique de vapeur combustible est dépassé.

L'auto-inflammation se définit comme l'allumage soudain d'une charge de gaz quand elle est exposée à une température et une pression particulière [BABRAUSKAS 2003]. Elle est également définie comme l'initiation de la combustion par chaleur mais sans étincelle ou flamme [NFPA 921]. L'apparition de ce phénomène d'auto-inflammation est résumée dans le schéma 2.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



1. *Schéma du processus d'inflammation pilotée (adapté de [DRYSDALE 1999a])*



2. *Schéma du processus d'auto-inflammation (adapté de [DRYSDALE 1999a])*

D'un point de vue investigation, l'inflammation pilotée est par exemple l'allumage d'un foyer sur un canapé à l'aide d'une flamme nue. Dans ce cas, quand une flamme est directement appliquée à un matériau à allumer, la flamme a un double rôle : elle agit à la fois comme la source d'énergie chauffant le matériau pour atteindre un débit suffisant de gaz de pyrolyse et également comme la source pilotant l'allumage des vapeurs.

Pour illustrer les deux modes d'allumage, il suffit de considérer une installation électrique dans laquelle un câble s'échauffe à cause d'une surintensité. Dans un premier cas, l'isolation du câble sera chauffée à une température suffisante pour que les gaz provenant de sa dégradation puissent s'enflammer : c'est une auto-inflammation. Dans un second cas, l'échauffement sera insuffisant pour atteindre un débit massique critique de vapeur combustibles et les gaz provenant de la dégradation de l'isolation du câble nécessiteront, pour être enflammés, un apport d'énergie extérieur sous la forme d'un arc électrique par exemple : c'est une inflammation pilotée.

Une dernière illustration d'une inflammation pilotée concerne un incendie se développant à l'intérieur d'un bus. Lorsqu'un siège est enflammé, des fumées s'accumulent en partie haute. Celles-ci rayonnent en direction des divers matériaux et en particulier ceux qui constituent les autres sièges dont les mousses et les revêtements commencent à être dégradés par thermolyse. C'est la chute de matériaux du plafond sous forme de gouttes enflammées qui vont piloter l'inflammation des sièges. Cet exemple est une illustration d'un phénomène de propagation apparaissant pour tout incendie dans un espace confiné. En effet, de façon générale, si les matériaux qui brûlent émettent des particules incandescentes sous forme solides ou liquides, cela accélère la propagation du feu aux matériaux situés à proximité en pilotant l'ignition.

Un exemple d'auto-inflammation se rapprochant de la configuration du bus peut être illustré en considérant un appartement où les fumées d'un foyer s'accumulent en partie haute d'une pièce en formant une couche chaude stratifiée (voir les photos 3). La fumée et les flammes rayonnent en direction du mobilier et de la commode qui, lorsqu'elle se retrouve dans les conditions du schéma 2, est le siège d'une auto-inflammation : aucune source d'énergie localisée n'est nécessaire pour piloter l'allumage.

Il est important de noter que, avec des matériaux identiques, l'auto-inflammation nécessite des flux de chaleur supérieurs à ceux d'une inflammation pilotée [KANURY 1972].

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3. *Illustration de l'auto-inflammation d'une commode lors du développement d'un incendie dont la cause est l'inflammation d'un sapin - Image du NIST*

L'allumage d'un matériau et son auto-entretien dépendent d'un bilan énergétique complexe entre le flux thermique incident, la chaleur rayonnée et convectée par le combustible et la chaleur perdue dans le proche environnement [KEALY 2003]

Ce bilan énergétique est développé dans la référence [DRYSDALE 1999a]. Si la température d'un matériau est maintenue par un flux de chaleur externe, le débit massique surfacique de combustible dans des conditions stationnaires sans flammes est donné par la relation (1).

$$(1).\quad \dot{m}'' = \frac{\dot{q}_e'' - \dot{q}_l''}{L_v}$$

Où $\dot{m}''$ est le débit surfacique massique de combustible (kg.m^{-2}.s^{-1}), L_v la chaleur latente de vaporisation du combustible (J.kg^{-1}), $\dot{q}_e''$ le flux externe de chaleur (W.m^{-2}) et $\dot{q}_l''$ la perte de chaleur exprimée comme un flux à travers la surface (W.m^{-2}).

Si une flamme est établie à la surface du matériau, le débit massique surfacique de combustible augmente comme indiqué dans la relation (2).

$$(2).\quad \dot{m}'' = \frac{f\Delta H_c \dot{m}'' + \dot{q}_e'' - \dot{q}_l''}{L_v}$$

Où *f* est la fraction de l'enthalpie de combustion des vapeurs qui est transférée en retour à la surface du matériau. *f* peut donc se décomposer sous la forme d'une somme dont le premier terme est issu de la convection f_c et dont le second terme provient du rayonnement thermique f_r, la proportion de chacun variant avec la taille de la flamme. Dans le cas général, cela donne alors l'équation (3) avec S_e un terme relatif à l'accumulation de l'énergie dans le matériau. S_e est nul pour des combustions stationnaires avec une flamme établie au-dessus du combustible.

$$(3).\quad \left((f_r + f_c)\Delta H_c - L_v\right)\dot{m}'' + \dot{q}_e'' - \dot{q}_l'' = S_e$$

Pour un solide, le point feu est atteint lorsque les mélanges entre les différents gaz près de la surface du matériau sont proches des conditions stœchiométriques. La concentration au point feu peut être associée à un débit massique ou un taux de pyrolyse spécifiques. Au point feu, f_r est petit car la flamme n'est pas lumineuse et il peut même être négligé. Quant à f_c, il approche une valeur maximale Φ au point feu qui correspond à la limite de stabilité de la flamme à la surface[1]. En intégrant ces simplifications, l'équation (3) devient (4) et permet d'identifier les conditions sous lesquelles l'inflammation des gaz de pyrolyse va mener à une combustion auto-entretenue.

[1] Φ dépend fortement de la nature du combustible et légèrement du régime de convection (forcé ou naturel). Il peut être pris égal à 0,3 pour la majorité des matériaux combustibles bien qu'il puisse être inférieur à 0,2 pour des matériaux ignifugés et supérieur à 0,4 pour certains polymères contenant de l'oxygène [RABASH 1975]. Des valeurs pour certains combustibles sont données dans la référence [DRYSDALE 1999].

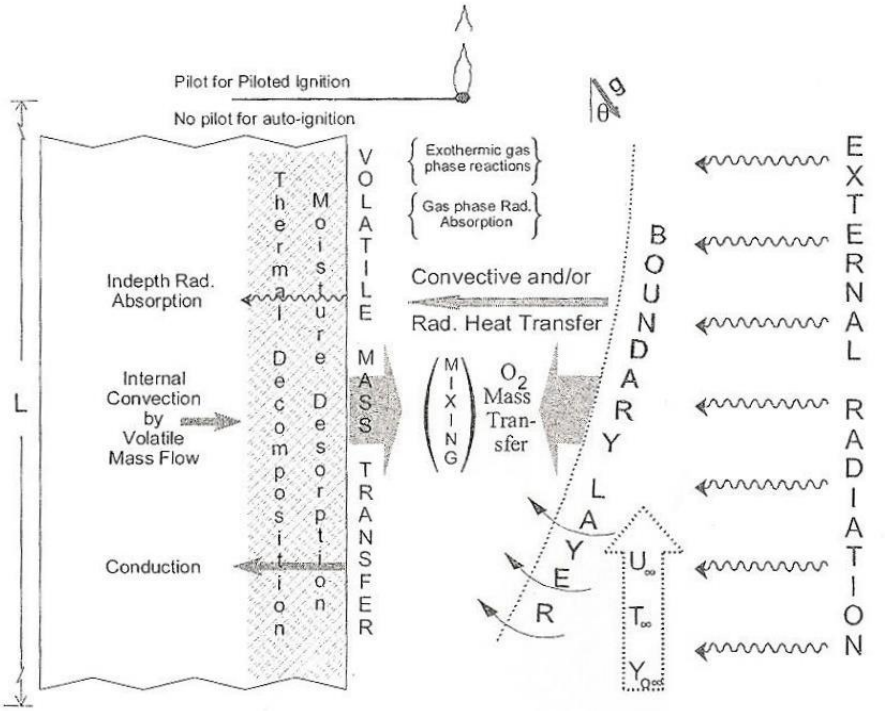
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

$$(4).\quad (\phi \Delta H_c - L_v)\dot{m}''_{cr} + \dot{q}''_e - \dot{q}''_l = S_e$$

Où $\dot{m}''_{cr}$ est le débit massique critique de gaz de pyrolyse au point feu.

Dans l'équation (4), si $S_e \geq 0$, il y a inflammation, et extinction sinon. Les variations de S_e dépendent de la valeur de Φ. Il est par exemple possible qu'une extinction se produise suite à une inflammation si le flux externe de chaleur imposé est réduit ou complètement supprimé.

La figure 4 schématise les principaux processus physiques et chimiques présents lors de l'inflammation d'un solide par une source de chaleur rayonnante. Elle met en exergue la complexité du phénomène de combustion. Il a été illustré précédemment l'importance du débit massique surfacique de combustible pour que la combustion soit maintenue lors de la phase d'allumage. Celui-ci dépend de trois mécanismes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Le schéma 4 introduit une convection à l'intérieur du matériau : elle peut être prise en compte dans les cas particuliers comme des matériaux alvéolaires où des espaces vides de matière permettent le mouvement interne de gaz de pyrolyse et donc des échanges thermiques avec le matériau vierge.



4. *Principaux processus physiques et chimiques ayant lieu lors de l'inflammation d'un solide par une source de chaleur rayonnante [BABRAUSKAS 2003]*

Quand un gradient de température existe dans un milieu stationnaire fluide ou solide, le terme de conduction est utilisé pour décrire les transferts de chaleur qui se produisent à travers le milieu. Les températures les plus élevées sont associées aux énergies moléculaires les plus élevées. Quand deux molécules voisines entrent en collision, comme elles le font constamment, un transfert d'énergie de la molécule la plus énergétique vers la molécule la moins énergétique peut se produire. En présence d'un gradient de température, le transfert de chaleur par conduction a lieu dans la direction des températures décroissantes [MAKAROV 2009].
Fourrier a en premier quantifié ces échanges de chaleur et en a tiré la loi donnée par l'équation (5). Elle statue que, pour un matériau homogène, la quantité de chaleur échangée par unité de temps à travers une surface S_m est proportionnelle à la surface et au gradient de température dT/dx.

$$(5).\quad \dot{q}'' = -\lambda S_m \frac{dT}{dx}$$

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Où $\dot{q}''$ est le flux de chaleur à travers la surface S_m, λ la conductivité thermique du solide ($W.m^{-1}.K^{-1}$), T la température (K) et x la distance normale (m) à la surface S_m (m^2). Les transferts de chaleur par conduction sont développés dans les références [ROCKETT 2002, DRYSDALE 1999a].

La convection correspond au transfert de chaleur se produisant entre une surface et un fluide en mouvement s'ils sont à des températures différentes. Deux types de convections sont à distinguer : la convection forcée correspondant à la convection causée par un moyen extérieur (ventilateur, pompe, etc.) et la convection naturelle provoquée par la poussée d'Archimède. Cette dernière se produit généralement lorsqu'un fluide entre en contact avec des éléments plus chauds (respectivement plus froids) ce qui induit une augmentation (respectivement diminution) de sa température, une augmentation de sa masse volumique et enfin un mouvement vertical du fluide sous l'effet de la poussée d'Archimède [MAKAROV 2009].
Newton a donné avec l'équation (6) la première relation décrivant les échanges de chaleur par convection.

$$(6).\quad \dot{q}'' = h\Delta T = h(T_s - T_\infty)$$

Où h est le coefficient de transfert convectif, T_s la température du solide et T_∞ la température du fluide loin du solide. La valeur de h dépend de l'état de la surface, de la vitesse du fluide et d'autres facteurs car les transferts de chaleur par convection s'effectuent dans la couche limite thermique du matériau. Les transferts de chaleur par convection sont développés dans les références [ATREYA 2002, DRYSDALE 1999a].

Enfin, la loi de Stefan-Boltzmann établit que M, la puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir, s'exprime par la relation (7) où T est la température exprimée en K.

$$(7).\quad M = \sigma T^4$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5{,}67 \times 10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$. Un corps noir peut être défini comme un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre. Si un matériau donné ne peut être considéré comme un corps noir, une émissivité ε lui est associée. C'est le rapport entre l'énergie qu'il rayonne et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. C'est donc une mesure de la capacité d'un corps à absorber et à réémettre l'énergie rayonnée. Le corps noir, considéré comme le parfait émetteur, a une émissivité égale à 1. Pour calculer l'énergie que reçoit une surface distante de la source de rayonnement, la relation (8) est utilisée. Dans cette égalité, $F_{1\to2}$ est le facteur de forme qui représente la fraction de l'énergie émise par la surface 2 à la température T_2 susceptible d'être reçue par la surface 1 à la température T_1, à partir de considérations géométriques.

$$(8).\quad \dot{q}'' = F_{1\to2}\varepsilon\sigma(T_2^4 - T_1^4)$$

Les transferts de chaleur par rayonnement sont développés dans les références [TIEN 2002, DRYSDALE 1999a]

Pour avoir un ordre de grandeur, le tableau 5 [DRYSDALE 1999a] donne les propriétés thermiques de quelques matériaux communs.

Matériau	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	c_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	ρ ($kg.m^{-3}$)	α ($m^2.s^{-1}$)	$k\rho c_p$ ($W^2.s.m^{-4}.K^{-2}$)
Cuivre	387	380	8 940	$1{,}14 \times 10^{-4}$	$1{,}3 \times 10^{9}$
Acier (léger)	45,8	460	7 850	$1{,}26 \times 10^{-5}$	$1{,}6 \times 10^{8}$
Brique	0,69	840	1 600	$5{,}2 \times 10^{-7}$	$9{,}3 \times 10^{5}$
Béton	0,8 – 1,4	880	1 900 – 2 300	$5{,}7 \times 10^{-7}$	2×10^{6}
Verre	0,76	840	2 700	$3{,}3 \times 10^{-7}$	$1{,}7 \times 10^{6}$
Plâtre	0,48	840	1 440	$4{,}1 \times 10^{-7}$	$5{,}8 \times 10^{5}$
PMMA	0,19	1 420	1 190	$1{,}1 \times 10^{-7}$	$3{,}2 \times 10^{5}$
Air	0,026	1 040	1,1	$2{,}2 \times 10^{-5}$	-

5. *Propriétés thermiques de quelques matériaux communs (adapté de [DRYSDALE 1999a])*

2.2 Décomposition chimique, pyrolyse et débit calorifique

2.2.1 Décomposition chimique

Avant de traiter la pyrolyse d'un matériau, il est intéressant de définir selon la référence [NF EN ISO 13943 2001] les trois concepts suivants :

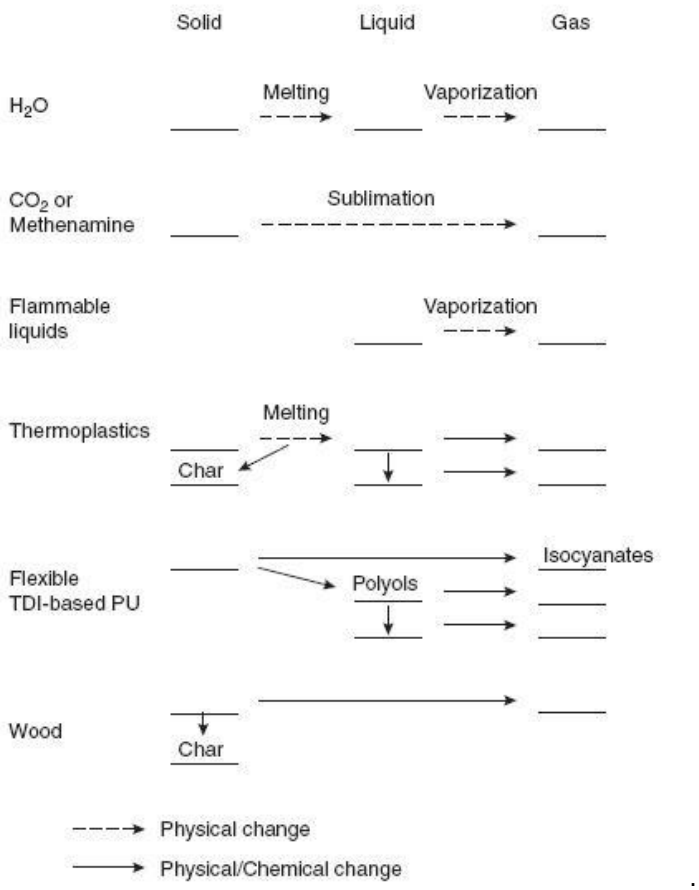
- La décomposition thermique est le processus où l'action de la chaleur ou de températures élevées sur un objet conduit à des changements de la composition chimique.
- La dégradation thermique est le processus où l'action de la chaleur ou de températures élevées sur un objet cause une perte de certaines propriétés, par exemple physiques, mécaniques ou électriques.
- La pyrolyse est la partie de la décomposition chimique irréversible provoquée par une élévation de température. La pyrolyse peut être accompagnée par une décomposition due à d'autres actions telles qu'une attaque chimique. La pyrolyse est donc un cas particulier de décomposition par lequel des produits gazeux sont dégagés à partir de la décomposition d'un matériau solide.

Dans une situation d'incendie, le changement important est la décomposition thermique par laquelle la décomposition chimique d'un matériau solide produit des vapeurs combustibles pouvant brûler au-dessus du matériau solide.

Lorsqu'un matériau brûle, les changements physiques qu'il subit, tels que sa liquéfaction ou la création d'un résidu charbonneux, peuvent nettement modifier la décomposition du matériau et les caractéristiques de sa combustion.

Une description détaillée des processus chimiques et physiques entrant en jeu dans la décomposition d'un polymère est disponible dans la référence [BEYLER 2002]. Au contraire d'un liquide, la gazéification d'un polymère est un processus complexe. Les molécules composant le matériau doivent être transformées en fragments de molécules plus petits. Les plus petits fragments peuvent alors être vaporisés alors que les plus lourds, condensés dans la phase solide ou liquide, subissent de nouvelles décompositions. Les changements physiques et chimiques se produisant lors de la décomposition thermique de quelques matériaux sont schématisés dans la figure 6. Ils vont d'un simple changement de phase en passant d'un état solide à un état liquide puis gazeux à des combinaisons complexes de changements physiques et chimiques comme pour le polyuréthane qui sera d'ailleurs étudié dans le chapitre 5. Ce dernier peut se décomposer selon trois mécanismes différents. L'un d'eux implique la formation d'isocyanates qui peuvent ensuite se repolymériser en phase gazeuse et se condenser en fumée jaune. Les isocyanates sont généralement accompagnés de polyol liquide qui peut continuer à se décomposer.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



6. *Changements physiques et chimiques se produisant lors de la décomposition thermique [BEYLER 2002]*

2.2.2 Modèle d'Atreya

C'est un modèle *1-D* qui tient compte des phases solide et gazeuse. Il a été choisi de le présenter dans ce chapitre car il est utilisé dans le module de combustion solide de FDS dans une version légèrement modifiée par rapport au modèle original.

Les équations *1-D* de bilan dans la phase gazeuse sont rappelées ci-dessous.

La stœchiométrie est donnée par l'équation de réaction (9) où ΔH_c est l'enthalpie de combustion.

(9). 1 kg Combustible + R_0 *kg* 0_2 → $(1+R_0)$ *kg* products + ΔH_c

L'équation de continuité de la phase gazeuse est donnée par l'équation (10) où ρ est la masse volumique du gaz (kg.m^{-3}), x la distance perpendiculaire à la surface du combustible et u la vitesse du gaz (m.s^{-1}), $\dot{m}'''$ le débit massique par unité de volume (kg.s^{-1}.m^{-3}).

$$(10). \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0$$

L'équation bilan de conservation de l'énergie en phase gazeuse est donnée par la relation (11) où T est la température du gaz (K), λ la conductivité thermique (kW.m^{-1}.K^{-1}), c_p la capacité thermique massique de la phase gazeuse (kJ.kg^{-1}.K^{-1}), $\dot{q}_r''$ le flux rayonné (kW.m^{-2}).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

$$(11). \qquad \rho\frac{\partial T}{\partial t}+\rho u\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{1}{c_p}\frac{\partial \dot{q}_r^{''}}{\partial x}+\frac{\Delta h_c}{c_p}\dot{m}'''$$

L'équation de conservation du combustible en phase gazeuse est donnée par la relation (12) où Y_F est la fraction massique de vapeurs combustibles dans la phase gazeuse, D le coefficient de diffusion.

$$(12). \qquad \rho\frac{\partial Y_F}{\partial t}+\rho u\frac{\partial Y_F}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D\frac{\partial Y_F}{\partial x}\right)-\dot{m}'''$$

L'équation de conservation de l'oxygène en phase gazeuse est donnée par l'équation (13) où Y_O est la fraction massique d'oxygène en phase gazeuse.

$$(13). \qquad \rho\frac{\partial Y_O}{\partial t}+\rho u\frac{\partial Y_O}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D\frac{\partial Y_O}{\partial x}\right)-r_O\dot{m}'''$$

L'équation d'état à pression constante est donnée par la relation (14).

$$(14). \qquad \rho T=\rho_\infty T_\infty$$

Le modèle d'Atreya consiste à écrire que la vitesse de réaction en phase gazeuse est donnée par une loi d'Arrhenius fournie par l'équation (15) où A et E sont respectivement le facteur pré-exponentiel ($m^3.s^{-1}.kg^{-1}$) et l'énergie d'activation de la réaction en phase gazeuse ($kJ.mol^{-1}$).

$$(15). \qquad \dot{m}'''=A\rho^2 Y_F Y_O e^{-E/RT}$$

L'équation bilan de masse en phase solide est donnée par l'équation (16) où $\dot{m}''$ est le débit massique par unité de surface du solide ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).

$$(16). \qquad \frac{\partial \rho_s}{\partial t}+\frac{\partial \rho_m}{\partial t}=-\frac{\partial \dot{m}''}{\partial x}$$

Les équations *1-D* de bilan dans la phase solide sont rappelées ci-dessous.

L'équation bilan d'énergie en phase solide est donnée par la relation (17) où h est l'enthalpie, les indices s, m et g se rapportant respectivement au solide, à l'humidité contenue dans le matériau et à la phase gazeuse, ΔH_s est l'enthalpie de vaporisation du solide ($kJ.kg^{-1}$) et ΔH_m l'énergie de vaporisation de l'eau contenue dans le matériau ($kJ.kg^{-1}$).

$$(17). \qquad \rho_s\frac{\partial h_s}{\partial t}+\rho_m\frac{\partial h_m}{\partial t}+\dot{m}''\frac{\partial h_g}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial x}\right)+\frac{\partial \dot{q}_r^{''}}{\partial x}+\left(\Delta H_s-h_s+h_g\right)\frac{\partial \rho_s}{\partial t}+\left(\Delta H_m-h_m+h_g\right)\frac{\partial \rho_m}{\partial t}$$

Dans le modèle d'Atreya, la cinétique de décomposition de la phase solide est donnée par l'équation (18) où ρ_s est la masse volumique du matériau vierge solide et ρ_{sf} celle du résidu charbonneux.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

$$(18). \qquad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -A_s\left(\rho_s - \rho_{Sf}\right)e^{-E_s/RT_s}$$

Les conditions initiales et aux frontières sont données par les égalités (19) à (24).

À t=0 et 0 < x < δ, δ étant l'épaisseur de la couche limite :

$$(19). \qquad Y_F(x,0) = 0 \ , \ Y_O(x,0) = Y_{O_\infty} \ , \ T(x,0) = T_\infty$$

À l'interface entre le solide et le gaz et pour t>0 et x=0 :

$$(20). \qquad \rho D \frac{\partial Y_F}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \dot{m}_s''\left(Y_F - Y_{FS}\right)$$

$$(21). \qquad \rho D \frac{\partial Y_O}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \dot{m}_s''\left(Y_O\right)$$

$$(22). \qquad -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}\bigg|_{x=0} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} - \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_\infty^4\right) = \alpha_s \dot{q}_e'' - h_c\left(T_s - T_\infty\right) - \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_\infty^4\right) - \dot{m}_s'' Q$$

Au bord de la couche limite et x = δ et t>0 (avec $\dot{q}_e''$ le flux de chaleur externe spécifié) :

$$(23). \qquad Y_F(\delta,t) = 0 \ , \ Y_O(\delta,t) = Y_{O_\infty} \ , \ T(\delta,t) = T_\infty \ , \ \dot{q}_r'' = \dot{q}_e''$$

Sur la face opposée au flux thermique incident d'un solide thermiquement épais (avec T_S la température de surface et L l'épaisseur du combustible) :

$$(24). \qquad T_s(L,t) = T_\infty$$

Des simplifications basées sur la physique peuvent être faites dans les équations précédentes. Le terme $\dot{q}_r''$ peut être négligé dans l'équation bilan de conservation d'énergie sauf pour de très grandes valeurs de flux de chaleur. Dans ses études, Atreya n'a considéré que des matériaux pour lesquels l'influence de l'humidité peut être négligée. Il ne tient également pas compte du terme $\frac{\partial h_g}{\partial x}$ qui représente les termes d'échange thermique imputables à l'écoulement des gaz pyrolysés à l'intérieur du matériau solide (voir le schéma 4) car il est très faible avant l'inflammation du matériau. Et enfin, $\frac{\partial \dot{q}_r''}{\partial x}$ qui se rapporte à la propriété diatherme d'un corps est ignorée.

D'autres simplifications peuvent être faites, mais elles ne seront pas présentées ici. L'intérêt était d'appréhender les termes influençant la pyrolyse d'un matériau ainsi que la mise en équation de ces phénomènes.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

2.2.3 Débit calorifique

Le débit calorifique est la caractéristique indispensable pour décrire quantitativement la taille d'un feu. Ce paramètre a même été qualifié comme étant la variable la plus importante dans un incendie [PEACOCK 1992, HUGGETT 1980]. Le débit calorifique $\dot{Q}$ exprimé en kW peut être défini comme la vitesse à laquelle une réaction de combustion produit de la chaleur. Il s'écrit selon la relation (25).

$$\dot{Q} = \dot{m}'' S \Delta H_c C \qquad (25).$$

Où $\dot{m}''$ est le débit massique surfacique de combustible (kg.m^{-2}.s^{-2}), *S* la surface de combustible en feu, ΔH_c l'enthalpie de combustion du combustible (J.kg^{-1}) et *C* est un coefficient quantifiant le caractère plus ou moins complet de la réaction de combustion. *C* est toujours inférieur à 1 ; il est voisin de 1 pour une réaction en milieu ouvert.

En considérant un foyer globalement, il est très difficile d'estimer le débit calorifique à partir de la relation (25) et en particulier lorsqu'il y a plusieurs matériaux car il faut associer une enthalpie de combustion et un débit massique surfacique à chacun. *S* et *C* sont également difficiles à quantifier car ils évoluent au cours de l'incendie et en particulier pour la combustion de matériau solide.

2.3 Modes de combustion rencontrés en situation d'incendie

Lors d'enquêtes post incendie, il est possible de rencontrer trois modes de combustions différents : la combustion lente ou le smoldering, la flamme de prémélange et la flamme de diffusion. Ce qui différencie la combustion lente des autres types de combustion est donc la flamme qui peut être définie comme un volume réactif de faible épaisseur dans lequel une réaction chimique d'oxydation des gaz issus de la pyrolyse a lieu [MARTIN 2008].

2.3.1 Combustion lente ou smoldering

Le smoldering est une forme de combustion lente, sans flamme, à basse température. Elle est entretenue par la chaleur dégagée lorsque l'oxygène attaque directement la surface d'un combustible en phase condensée [OHLEMILLER 2002]. C'est donc une réaction de surface et l'oxygène diffuse vers cette surface. Elle peut également être définie comme la propagation auto-entretenue d'un front réactionnel exothermique tirant son énergie de l'oxydation hétérogène du résidu carboné du combustible, dont sa matière volatile a été débarrassée. Les matériaux poreux formant, lorsqu'ils sont chauffés, une couche charbonneuse solide contenant du carbone ont fortement tendance à mener à une combustion lente auto-entretenue.

Lors de l'investigation, ce type de combustion est intéressant à repérer car :

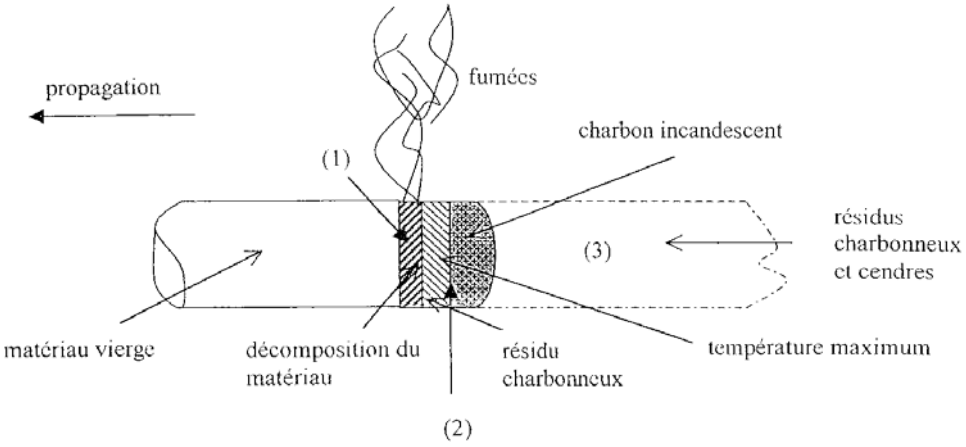
- Il produit, pour un matériau donné, plus de composés toxiques qu'une combustion avec flamme et cela peut jouer un rôle important lors de certaines intoxications.
- Il bascule parfois vers une combustion avec flamme. Cette dernière aura alors été initiée avec des énergies bien trop faibles pour produire directement une flamme. Il permet donc de ne pas écarter certaines sources d'allumage qui pourraient paraître trop faibles pour provoquer un incendie.

La cigarette est un exemple commun de ce type de combustion lente. La propagation d'un front de combustion le long d'éléments cylindriques horizontaux constitués de celluloses a été étudiée [MOUSSA 1977] et trois régions distinctes illustrées dans le graphique 7 ont été identifiées comme caractéristiques d'une combustion lente :

- Une zone de pyrolyse (repérée par le (1) sur le graphique 7) dans laquelle il y a une forte augmentation de température et un dégagement de produits volatils visibles à partir du matériau.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

- Une seconde zone charbonneuse (repérée par le (2) dans le graphique 7) où la température atteint son maximum, où le dégagement de produits volatils visibles s'arrête et où l'incandescence se produit. C'est dans cette zone que la chaleur est dégagée. Les températures maximales pour ce type de combustion sont de l'ordre de 600 à 750 °C.
- Et une dernière zone de résidus poreux de charbon et ou de cendre (repérée par le (3) dans le graphique 7). Il n'y a plus d'incandescence et la température diminue lentement.



7. *Représentation schématique d'une combustion lente stationnaire le long d'un cylindre horizontal de cellulose (adapté de [MOUSSA 1977])*

Les produits dégagés dans la première zone ne sont pas totalement oxydés. Ce sont les combustibles gazeux qui brûleraient dans une flamme au-dessus du combustible si la combustion n'était pas lente. Ces produits sont donc combustibles et, lorsqu'ils s'accumulent dans un volume clos, ils constituent une atmosphère inflammable pouvant potentiellement être la cause d'une explosion de fumée.

La propagation d'une combustion lente est contrôlée pour une grande partie par la quantité d'oxygène qui est transportée vers la zone de réaction. En effet, la chaleur dégagée lors de l'initiation de la combustion lente augmente la température locale et augmente donc également la vitesse de réaction locale et cela jusqu'à ce que tout l'oxygène à proximité soit consommé. Par la suite, la réaction continue de consommer de l'oxygène aussi vite que celui-ci atteint la zone de réaction. Localement, la concentration d'oxygène est ainsi toujours très faible ce qui limite la vitesse de réaction. Le déplacement de la zone de combustion lente dépend donc des conditions d'amené d'air vers la zone de réaction et par conséquent de l'emplacement dans le matériau où la combustion débute.

Voici l'illustration d'un cas dont le scénario proposé lors de l'enquête débute par une combustion lente. Alors que le locataire était absent depuis plusieurs heures de son logement, les secours sont alertés par des voisins ayant senti une odeur suspecte dans le couloir commun à tous les appartements de l'immeuble. Lorsque les pompiers interviennent, ils voient par la fenêtre de l'appartement une vive lueur rouge suivie immédiatement par un fort bruit d'explosion. Lors des constatations des enquêteurs, les dégâts dus au feu et aux fumées sont très majoritairement localisés dans la chambre à coucher. Dans cette dernière, un matelas en latex est retrouvé brûlé à environ 80%. Il faisait partie d'un ensemble mobilier constitué d'un lit escamotable verticalement entre deux meubles de penderie. De nombreux effets thermiques sont observés en partie haute de la pièce avec notamment la fonte partielle des châssis en PVC des fenêtres (voir la photo 9). Plusieurs cloisons de l'appartement sont endommagées suite à l'explosion (voir la photo 8).

Les enquêteurs ont avancé que la combustion du matelas semble résulter d'une lente montée en température de la mousse potentiellement imputable à une des deux lampes situées entre le lit escamotable et le haut du meuble le contenant qui aurait été laissée allumée ou à un échauffement au niveau d'une liaison électrique mal serrée. Cette dernière hypothèse est d'ailleurs privilégiée. Il en a résulté une combustion lente du matelas dans un environnement très confiné entre le mur et la planche du sommier. Celle-ci a consommé la quasi-totalité du matelas en dégageant une forte quantité de gaz imbrûlés, principalement d'après les analyses des produits de dégradation du copolymère butadiène styrène constitutif du matelas.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Même si l'incendie est relativement de faible intensité, l'élévation de température a été suffisante en partie haute de la chambre pour faire fondre le PVC[2] de la fenêtre. Lorsque la perte de tenue mécanique du bâti a été suffisante, l'affaissement du vitrage a permis une amenée d'air provenant de l'extérieur dans un mélange gazeux hautement explosible et très pauvre en oxygène. Cet apport d'oxygène a provoqué l'embrasement du mélange gazeux (lueur rouge vue par les premiers intervenants) immédiatement suivi d'une explosion d'atmosphère. Après l'explosion, la température dans le local a fortement diminué, ainsi que la concentration en gaz inflammables, faisant passer le mélange gazeux présent dans l'appartement en dehors des conditions d'explosivité.

Les imbrûlés issus de la combustion du matelas se sont alors redéposés par condensation sur toutes les surfaces solides de l'appartement. Cette condensation a été d'autant plus importante que la surface en question était froide ce qui explique les forts dépôts sur la céramique de la salle de bain (voir la photo 10).

L'analyse des dépôts a montré qu'il s'agit d'un mélange principalement constitué de composés aromatiques tels que le benzène, méthylbenzène, éthylbenzène, styrène, propylbenzène, benzaldéhyde, méthylstyrène, butylbenzène et acétylbenzène. Il a été mis en évidence après analyse des fragments de mousse restante que ces composés sont issus de la combustion et de la décomposition thermique du matelas.

8. *Vue de l'emplacement du lit à l'origine du sinistre*

9. *Déformation d'une fenêtre suite principalement à l'action des gaz chauds*

10. *Dépôt sur toutes les surfaces des imbrûlés de la combustion du matelas*

Les mécanismes gouvernant la propagation d'une combustion lente au sein d'un matériau poreux n'ont été étudiés que récemment. Ils ne seront pas développés dans ce chapitre, mais d'un point de vue investigation, il est intéressant de connaître les références permettant de calculer un ordre de grandeur des vitesses de propagation d'une combustion lente. Il faudra, pour en comprendre la théorie, se reporter aux références [OHLEMILLER 1983, DOSANJH 1987, TORERO 1995, TORERO 1996, DRYSDALE 1999a, OHLEMILLER 2002].

[2] La température de fusion du PVC est comprise entre 125 et 190 °C selon le dopage en chlore.

La cigarette, exemple classique de smoldering, est également connue pour initier de nombreuses combustions lentes de matériaux tels que les mousses d'ameublement et de literie [ROHR 1999]. Une revue bibliographique [BABRAUSKAS 1985] de la combustion lente des principaux matériaux utilisés pour la confection de meubles rembourrés est importante dans l'optique d'investigation. Dans ce document la dégradation des mousses polyuréthanes (PU) et des matériaux à base de cellulose est étudiée et une vitesse de propagation de la combustion de 0,1 $mm.s^{-1}$ est avancée pour les mousses PU.

Sous certaines conditions, la combustion lente peut éventuellement se transformer en une combustion avec flamme. La transition entre les deux modes de combustion n'est toujours pas parfaitement comprise. Elle est connue pour se produire spontanément. Il faut alors que le débit de gaz issus de la combustion ait augmenté au moins jusqu'à une valeur critique et ces gaz peuvent alors s'enflammer avec l'aide d'une source externe (ce qui revient à se placer dans des conditions d'allumage piloté) ou spontanément. En résumée, la transition requiert à la fois un mélange dans les limites d'inflammabilité entre les gaz dégagés par le matériau et l'air et nécessite également une source calorifique suffisante pour enflammer le mélange. Ces deux conditions doivent évidemment être réunies en un même lieu et à un même instant.

Des facteurs augmentant la production de chaleur ou diminuant la perte de chaleur vont faire basculer la combustion lente vers une combustion avec flamme en augmentant la température locale et la vitesse de production de gaz de pyrolyse [OHLEMILLER 2002]. Ces facteurs peuvent être :

- un apport supplémentaire d'oxygène. Dans le cas d'un meuble rembourré, il a été observé que la transition vers une combustion avec flamme ne peut se produire qu'après que la combustion lente ait duré une période de temps conséquente[3] [BABRAUSKAS 1979]. La propagation du front de combustion lente à travers le matériau semble donc être préalablement nécessaire à la transition. Quand le matériau est percé par le front de propagation, une cheminée est créée à travers laquelle l'air peut circuler et constituer ainsi l'apport supplémentaire d'oxygène.
- une augmentation des surfaces de combustion qui engendrent habituellement une diminution des pertes de chaleurs surfaciques par unité de volume de matériau se consumant.
- une augmentation de la géométrie concave du front de combustion lente ce qui a pour conséquence de réduire les pertes par rayonnement vers l'extérieur et augmenter la concentration locale en gaz combustible.
- une augmentation provoquée dans l'approvisionnement en oxygène de la zone de combustion lente.

Il ne faut pas négliger que la transition entre une combustion lente et une combustion avec flamme peut également être liée aux locaux dans lesquels les matériaux brûlent. L'oxygène disponible globalement et non plus localement et les courants d'air jouent un rôle majeur dans la transition. Cela peut être illustré en prenant l'exemple d'un matelas dans une pièce dont la porte est ouverte. Le matelas en mousse PU est allumé de façon à avoir une combustion lente. L'apparition de flamme à partir de la combustion lente peut éventuellement se produire à partir d'un temps relativement long. Si, une fois que la combustion avec flamme a débuté, la porte est fermée, une transition vers une combustion lente peut être observée et aucune flamme n'apparaîtra à nouveau tant que la porte n'est pas rouverte.

2.3.2 Flamme de prémélange

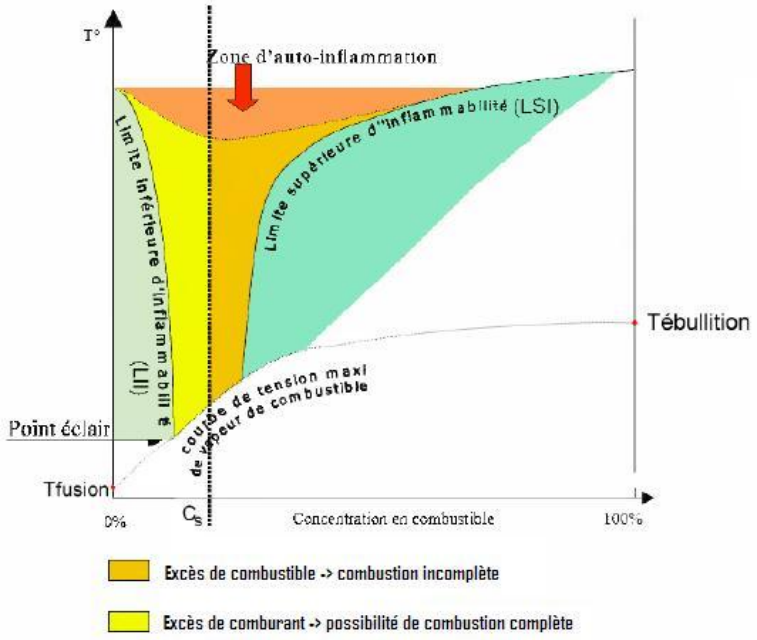
Lors de feux domestiques, il est très rare d'être confronté à des flammes de prémélange. C'est parfois le cas lors d'une mise de feu criminelle, mais en général, les problématiques rencontrées lors de l'enquête sont assez simples.

Une flamme de prémélange est obtenue lorsque le combustible et l'oxydant sont mélangés avant l'inflammation. Cependant, pour qu'il y ait combustion, il faut que le mélange de gaz satisfasse à des

[3] Dans les conditions expérimentales précises des essais présentés dans la référence [BARAUSKAS 1997], la transition d'une combustion lente vers une combustion avec flamme prend de 22 à 306 min après l'initiation du processus de combustion lente pour des lits et des chaises rembourrées

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

conditions de concentration et de température. En effet, pour tout combustible gazeux mélangé à l'air, il y a, à une température donnée, une concentration limite inférieure et une concentration limite supérieure entre lesquelles le mélange gazeux peut être enflammé et la flamme se propager. La limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI) sont tracées dans le diagramme 11 en fonction de la concentration en combustible et de la température.

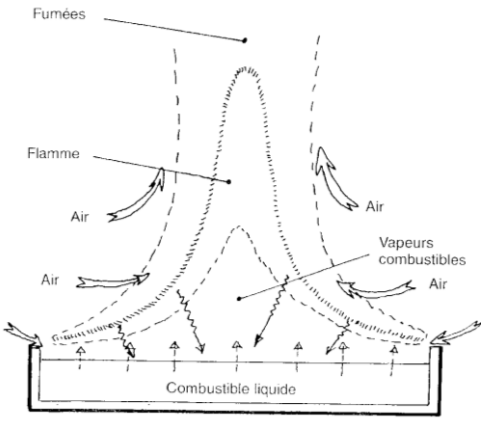


11. *Diagramme de limite d'inflammabilité en fonction de la concentration en combustible et de la température [LASSUS 2009]*

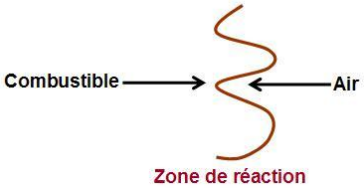
Dans le graphique 11 est introduit le point éclair. C'est la température minimale à laquelle doit être porté un matériau ou un produit pour que les vapeurs émises s'allument momentanément en présence d'une flamme dans des conditions spécifiques [NF EN ISO 13943 2001].

2.3.3 Flamme de diffusion

Dans une flamme de diffusion, le combustible et l'oxydant sont initialement séparés. Il y a combustion dans la zone où les gaz se mélangent (cf. image 13). Dans le cas simple de la combustion d'un liquide au-dessus d'un récipient, le combustible vaporisé se mélange avec l'air par entraînement et diffusion et, après inflammation, va brûler partout où les concentrations de combustible et d'oxygène sont dans les limites d'inflammation appropriées (cf. schéma 12).



12. *Schéma de la combustion d'un liquide [LASSUS 2009]*



13. *Représentation schématique de la zone de réaction*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

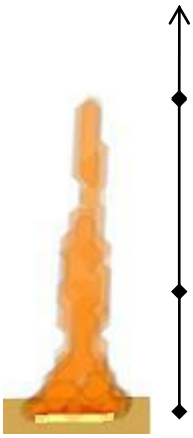
Dans le cadre des investigations, la majorité des flammes de diffusion rencontrées est obtenue à partir de combustibles liquides ou solides. Les combustibles gazeux sont donc sciemment omis de ce paragraphe.

Les flammes de diffusion alimentées par des foyers courants de quelques kilowatts sont dominées par les forces de flottabilité. Cela équivaut à dire que le débit de quantité de mouvement de la source a une influence négligeable devant celle du débit de quantité de mouvement qui est causé par la différence de masse volumique entre gaz chaud et air extérieur. Le nombre de Froude défini dans la relation (26) exprime le rapport entre les forces d'inertie et de gravité. Par conséquent, à la source des gaz combustibles pour les flammes courantes d'un incendie, le nombre de Froude est faible, c'est à dire de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} [CURTAT 2002]. Les flammes de diffusion rencontrées sont majoritairement turbulentes. Pour un même combustible, la flamme aura un régime laminaire ou turbulent en fonction du diamètre du foyer, la flamme devenant plus turbulente lorsque le diamètre augmente. Le diamètre à partir duquel la flamme devient turbulente dépend quand à lui de la nature du combustible. Des illustrations sont disponibles dans les références [DRYSDALE 1999a, QUINTIERE 2006].

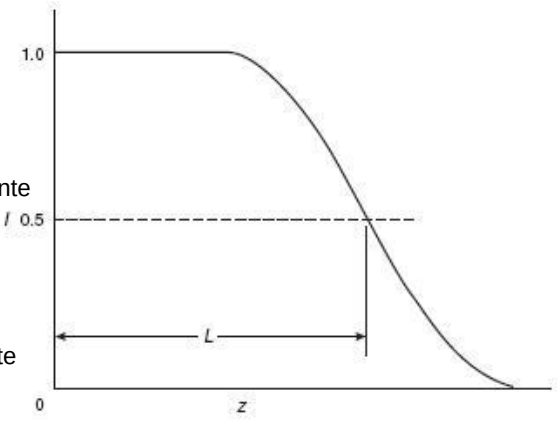
$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gD} D^2} \qquad (26).$$

Il a été montré [McCAFFREY 1979] que le panache au-dessus d'un brûleur carré de 30 cm est constitué de trois régimes distincts indiqués sur la figure 14 :

1. La zone près de la surface du brûleur où il y a une flamme persistante et un écoulement de gaz de combustion qui accélère. C'est la zone de flamme.
2. Une région dans laquelle il y a des flammes par intermittence et une vitesse d'écoulement presque constante. C'est la zone d'intermittence.
3. Le panache thermique qui est caractérisé par des vitesses et des températures qui décroissent avec la hauteur. Cette zone ne contient pas de flamme.



14. *Représentation des trois régimes du panache thermique de McCaffrey*



15. *Définition d'une hauteur de flamme moyenne en utilisant l'intermittence [HESKESTAD 2002]*

Une hauteur de flamme moyenne peut être définie à partir des zones données par McCaffrey. Il faut pour cela introduire l'intermittence *I(z)* à une distance *z* au-dessus d'une source. C'est la fraction de temps pendant laquelle il y a au moins une partie de la flamme qui est située au-dessus de la hauteur *z* [HESKESTAD 2002]. L'intermittence vaut 1 dans la région où la luminosité des flammes est toujours visible et diminue dans la région de flamme intermittente jusqu'à devenir nulle dans le panache inerte. La hauteur moyenne de flamme est alors définie comme la distance au-dessus de la source où l'intermittence a décliné jusqu'à 0,5. Concrètement, il sera supposé que cette hauteur de flamme

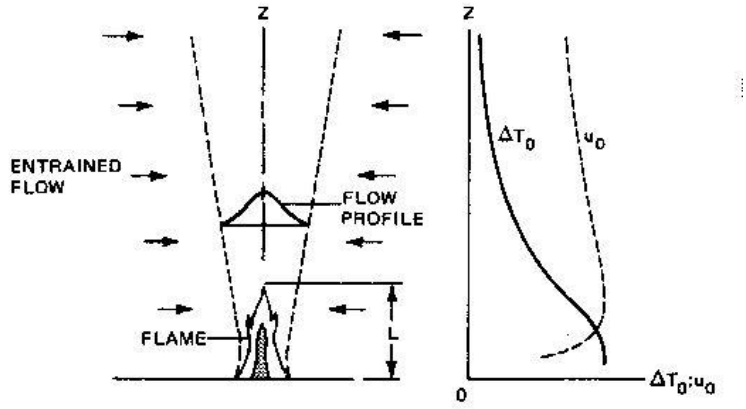
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

moyenne correspond à la distance au-dessus du foyer à laquelle, en moyenne, la combustion est achevée et où le panache inerte débute. Dans le chapitre 3, des corrélations pour évaluer la hauteur de flamme seront introduites et utilisées.

2.4 Panache thermique

Tous les feux passent par une étape initiale pendant laquelle un écoulement cohérent de gaz s'élève au-dessus d'une région localisée qui est le siège de la combustion, vers l'espace environnant composé essentiellement d'air non vicié. Cette étape débute à l'allumage, continue pendant un potentiel intervalle de temps au cours duquel le feu couve : il s'en suit le développement de flammes et s'achève avec l'apparition éventuelle de l'embrasement généralisé. L'écoulement ascensionnel de gaz est généralement turbulent, excepté quand la source calorifique est très petite, ce qui n'est jamais le cas lors des études de ce mémoire. Cet écoulement, incluant des flammes, est appelé panache thermique [HESKESTAD 2002]. Le mouvement ascensionnel de ce panache est régi par les forces de flottabilité induites par la différence de masse volumique entre les gaz chauds issus de la combustion et l'air environnant, plus froid. Le mouvement est freiné par la viscosité[4] de l'air à l'interface et l'air ambiant dilue le panache, réduit la température des gaz chauds et rapproche la masse volumique des deux gaz.

La figure 16 est une représentation schématique d'un panache issu de flammes. Les gaz, pyrolysés à partir du combustible par la chaleur provenant du feu, se mélangent avec l'air environnant et forment une flamme de diffusion de hauteur moyenne *L*. Il y a une frontière entourant les flammes et s'étendant au-dessus qui limite l'ensemble de l'écoulement des produits de combustion. L'air est entraîné sur cette surface. Le graphique de droite sur la figure 16 représente la vitesse et la température le long de l'axe du panache. Pour une flamme relativement grande, les températures sont à peu près constantes dans la partie inférieure de la flamme. Elles commencent à diminuer dans la partie supérieure intermittente de la flamme, là où la réaction de combustion s'estompe et où l'air entraîné refroidi l'écoulement. Les vitesses sur l'axe ont tendance à atteindre leur maximum légèrement en dessous de la mi-hauteur de la flamme et à toujours décroître en s'élevant au-dessus de la source.



16. *Représentation schématique de l'écoulement dans le panache thermique [HESKESTAD 2002]*

Le débit calorifique est soit rayonné, soit transporté par convection dans le panache thermique loin de la région de combustion. Si la majorité des gaz pyrolysés sont brûlés au-dessus du combustible, la fraction du débit calorifique total transporté par convection est rarement inférieure à 60% ou 70%. La part convectée du flux est transportée par le panache au-dessus des flammes alors que le reste du débit calorifique total libéré est rayonné dans toutes les directions.

De nombreux travaux [ZUKOSKI 1980, ZUKOSKI 1982, HESKESTAD 2002, McCAFFREY 1979, THOMAS 1963] ont permis d'exprimer grâce à des données expérimentales les caractéristiques des panaches en fonction du débit calorifique.

[4] Le nombre de Grashof exprime le rapport entre les forces de flottabilité et la viscosité

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les relations établies par Zukoski sont basées sur des équations analytiques dont les paramètres ont été définis avec des données expérimentales. Ces paramètres ont parfois été modifiés de façon à permettre un meilleur ajustement avec les données expérimentales. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin de travailler sur un panache idéal a été nécessaire pour obtenir des équations analytiques. Ce sont les suivantes :

- Le panache est supposé avoir une forme conique dont l'origine peut être ramenée à un point virtuel.
- Toute l'énergie du foyer est injectée au point représentant l'origine et est transportée sans perte. Il est donc considéré qu'aucune chaleur radiative n'est émise.
- Les variations de densité en fonction de la hauteur sont supposées négligeables[5]. Seule la différence entre la densité de l'air ambiant et la densité du panache est considérée.
- La vitesse ascendante de l'air du panache est supposée constante sur toute section horizontale du panache et la vitesse de l'air en dehors du panache est supposée nulle. De façon identique, la température est supposée constante sur une section horizontale
- L'entraînement de l'air sur les côtés du cône est supposé proportionnel à la vitesse ascendante du panache.

Les relations données par Zukoski expriment le débit d'air dans le panache, ainsi que la température et la vitesse ascendante en fonction de la hauteur.

Comparé au travail de Zukoski, Hekestad a utilisé des hypothèses plus réalistes. L'utilisation de ses résultats est donc moins restrictive. Le panache est encore supposé avoir une forme conique mais son origine ponctuelle est maintenant une origine virtuelle située à une distance en dessous de la source réelle de l'incendie. Le débit calorifique de l'incendie est remplacé par la part convective de ce débit de façon à prendre en compte l'énergie perdue par rayonnement qui ne contribue pas à l'augmentation des températures et des vitesses dans le panache. Les profils de température et de vitesse ne sont plus supposés constants sur une section horizontale mais comme ayant une forme gaussienne. Et enfin, les variations de densité en fonction de la hauteur sont prises en compte.

Les relations établies par Heskestad permettent d'évaluer la hauteur moyenne de flamme, le rayon du panache, la température et la vitesse sur l'axe du panache et le débit de masse d'air entraîné dans le panache.

McCaffrey a basé ses études, d'après des observations expérimentales, sur la division du panache en trois zones comme cela a été montré précédemment. Ses corrélations donnant la température et la vitesse sur l'axe du panache sont définies pour chacune des trois zones.

Il est intéressant de remarquer que les résultats obtenus grâce aux relations de McCaffrey sont 10% plus élevées que ceux calculés avec les équations de Hekestad.

Thomas a complété le travail de McCaffrey en étudiant des feux pour lesquels la hauteur de flamme est beaucoup moins grande que le diamètre de la source. Dans ces conditions, le débit d'air entraîné dépend beaucoup moins du débit calorifique mais du périmètre de la source.

Il faut noter que toutes ces corrélations ont été obtenues lors d'expériences réalisées sans confinement. Elles ne sont pas valables lorsque l'incendie est proche d'une paroi. Comme le panache est supposé axisymétrique, les corrélations ne conviennent par conséquent pas pour des situations où le panache est fortement influencé par la ventilation. De plus, ces corrélations ne dépendent pas du combustible mais seulement du débit calorifique dégagé par le foyer. Seule la part convectée de ce débit calorifique est parfois considérée. Il faut garder en mémoire que ceci est une limitation des corrélations car les pertes par rayonnement varient avec le combustible et, par conséquent, les températures de flamme également.

Les corrélations d'Heskestad et de McCaffrey seront utilisées et développées plus en détails dans le chapitre 3.

[5] Cette hypothèse restreint l'utilisation des équations de Zukoski à des incendies de faible puissance.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

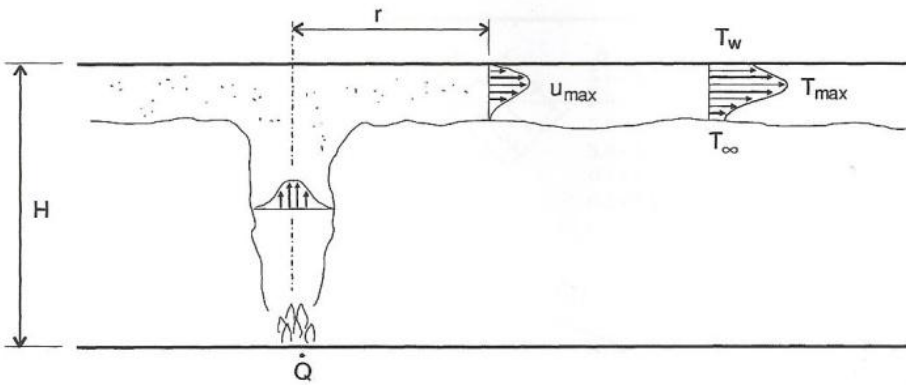
2.5 Jet sous plafond

Le terme « jet sous plafond[6] » se réfère à l'écoulement relativement rapide de gaz dans une couche superficielle au-dessous de la surface du plafond [ALPERT 2002] (voir la figure 17). Il est régi par les forces de flottabilité des produits chauds de combustion. Dans le cas d'un feu réel, les conditions pour obtenir un tel écoulement n'existent en général qu'au début du feu, quand la quantité de gaz chaud produite n'est pas suffisante pour s'accumuler en une couche de gaz chaud stagnante dans la partie supérieure du compartiment. L'écoulement jet sous plafond prend naissance dans la zone d'impact du panache sur le plafond. La couche s'épaissit ensuite en entraînant l'air frais du compartiment par sa frontière inférieure. Cet air entraîné refroidit les gaz de combustion dans le jet et réduit leur vitesse. La portion de gaz en contact avec le plafond est également refroidie par transfert thermique avec la paroi.

En général, l'épaisseur de la couche du jet sous plafond est estimée entre 5% et 12% de la distance du foyer au plafond. Les températures et vitesses maximales sont obtenues à une distance radiale du centre du foyer d'environ 1% du rapport entre la hauteur du foyer par la hauteur du plafond.

Alpert a proposé des corrélations pour approcher la température maximale et la vitesse maximale à une position donnée dans un écoulement de jet sous plafond engendré par un foyer stationnaire. Il les a établies pour des foyers dont la puissance est comprise entre 668 kW et 98 MW pour des hauteurs sous plafond variant de 4,6 à 15,5 m. Ces corrélations sont valables pour un jet sous plafond non confiné c'est-à-dire un jet sous plafond où la surface du compartiment est supposée être suffisamment grande pour que les effets des murs et d'autres obstacles sur le mouvement des gaz soient négligeables. Dans des petits volumes, comme ceux rencontrés dans les habitations, cela n'est valable que dans les premiers instants de l'incendie.

Les corrélations d'Alpert seront utilisées et présentées plus en détails dans le chapitre 3.



17. *Écoulement idéalisé de jet sous plafond [KARLSSON 2000]*

2.6 Feux en milieux confinés ventilés

Après l'allumage d'un incendie qui a été présenté au paragraphe 2.1, le foyer brûle librement dans le compartiment pendant ce qui est appelé la phase de croissance de l'incendie. Durant cette phase, la vitesse de combustion et la puissance sont uniquement affectées par la combustion elle-même et pas ou très peu par la présence des frontières du compartiment. Si suffisamment de combustible et d'air sont disponibles, le foyer va continuer à croître ce qui a pour conséquence l'augmentation de la température dans le compartiment. L'accroissement du foyer se traduit par une propagation des flammes à partir du premier objet enflammé et cela est éventuellement combiné à une propagation aux objets situés à proximité. Lors de cette phase, les foyers ayant assez d'oxygène pour brûler sont dit contrôlés par le combustible.

[6] Ceiling jet en anglais

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

La prédiction de la courbe d'évolution du débit calorifique du feu n'est possible que dans des cas très particuliers. Il faut donc émettre des hypothèses simplificatrices c'est pourquoi la croissance du foyer est le plus souvent assimilée à une croissance parabolique exprimée par l'équation (27).

$$\dot{Q} = \alpha_c t^2 \qquad (27).$$

avec α_c le coefficient de croissance du feu exprimé en kW.s^{-2}. Ce coefficient qui est fonction de la nature du combustible varie généralement entre des valeurs de l'ordre de 0,001 pour les feux à développement très lent et de 0,1 pour les feux à développement très rapide.

Après la phase de croissance, il faut différencier deux situations possibles selon que l'effet du confinement se fasse sentir ou non. S'il ne se fait pas sentir, le feu brûle alors librement, comme s'il était en milieu ouvert. La vitesse de combustion et le débit calorifique ne sont alors fonction que du combustible comme lors de la phase précédente.

Dans cette configuration, le débit massique surfacique de combustible exprimé en kg.m^{-2}.s^{-1} s'écrit alors selon la relation (28).

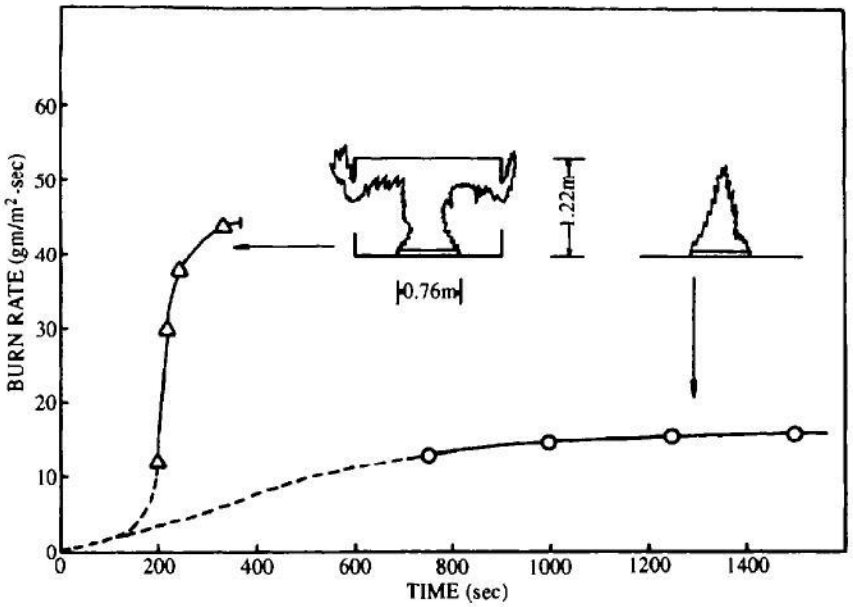
$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''_f - \dot{q}''_l}{L_v} \qquad (28).$$

Où $\dot{q}''_f$ est le flux de chaleur provenant de la flamme en W.m^{-2}, $\dot{q}''_l$ les pertes de chaleurs exprimées comme un flux à travers la surface du combustible et L_v la chaleur latente de vaporisation en J.kg^{-1}. Dans cette configuration, $\dot{q}''_f$ est dominé par le rayonnement si la surface du combustible est supérieure à environ 0,3 m. Pour la majorité des combustibles, 30% de l'énergie libérée dans la flamme est rayonnée vers l'environnement et le reste est dispersé par convection dans le panache thermique [DRYSDALE 1999a].

Lorsque l'effet du confinement se fait sentir, l'expression du débit massique surfacique de combustible diffère (cf. équation (29)). Il est dorénavant influencé par le rayonnement des parois qui se sont échauffées et qui renvoient éventuellement un flux thermique radiatif en direction du foyer, tout comme le font les fumées qui ont pu s'accumuler au-dessus et autour du foyer.
Si le foyer est dans un compartiment, l'énergie dissipée par rayonnement n'est pas totalement perdue et une partie est rayonnée en retour en direction du combustible. Le flux additionnel reçu par la surface du combustible s'écrit $\dot{q}''_e$ dans la relation (29). La figure 18 illustre l'effet du confinement sur la vitesse maximale de combustion d'une plaque de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) qui, dans le cas confiné, devient près de quatre fois supérieure au cas non confiné.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''_f - \dot{q}''_l + \dot{q}''_e}{L_v} \qquad (29).$$

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



18. *Effet du confinement sur la vitesse de combustion d'une plaque de PMMA [FRIEDMAN 1975]*

À ce stade de développement de l'incendie, un phénomène d'embrasement généralisé, également appelé flashover, peut alors se produire. Il est généralement défini comme la transition d'un feu en phase croissante vers un feu pleinement développé dans lequel tous les combustibles présents dans le compartiment participent à la combustion [WALTON 2002]. L'embrasement généralisé n'est pas un phénomène ponctuel, c'est une phase de transition entre deux états ; cependant, c'est un évènement rapide par rapport à la durée d'un feu. De nombreuses autres définitions existent, les plus classiques étant [THOMAS 1982] :

1. La transition d'un feu localisé à un foyer à tous les autres foyers potentiels du local.
2. La transition d'un feu contrôlé par le combustible à un feu contrôlé par la ventilation.
3. La propagation soudaine des flammes à tous les gaz imbrûlés accumulés sous plafond

La dernière de ces définitions ne concerne que l'un des différents mécanismes impliqués dans la transition vers un feu pleinement développé. La deuxième des définitions est généralement la conséquence de la première c'est pourquoi ce qui semble être la meilleure définition de l'embrasement généralisé est finalement l'union des deux premières. Il ne faut cependant pas oublier qu'un embrasement généralisé peut se produire sans pour autant que le feu pleinement développé devienne contrôlé par la ventilation comme pour un local avec de très grandes ouvertures par exemple.

Dans un compartiment, les sources de flux de chaleur potentielles en plus de celle du foyer initial sont les différentes surfaces échauffées et les produits de combustion ainsi que les gaz imbrûlés qui se sont accumulés sous le plafond. Chacune de ces sources participe à l'apparition du flashover avec une importance plus ou moins grande selon la position du foyer initial dans le local, la nature des combustibles, leurs positionnements respectifs et le niveau de ventilation.

Il a été montré expérimentalement [WATERMAN 1968] qu'un flux thermique d'environ 20 $kW.m^{-2}$ au niveau du sol est nécessaire pour que l'embrasement généralisé se produise. Mais ce critère est à considérer avec précaution car ce flux est très insuffisant pour atteindre l'auto-inflammation de la majorité des combustibles. Cependant, un tel flux est largement suffisant pour favoriser l'inflammation pilotée ou la propagation rapide de flamme à la surface de la majorité des combustibles [DRYSDALE 1999a]. Des températures sous plafond de l'ordre de 600°C sont également avancées dans plusieurs études [HÄGGLUND 1974, FANG 1975] mais la température sous plafond provoquant l'embrasement généralisé dépend très sensiblement de la hauteur du compartiment.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En conclusion, même s'il semble que le rôle joué par le rayonnement des fumées chaudes soit prédominant dans le déclenchement d'un embrasement généralisé, il ne faut pas oublier qu'il y a beaucoup de paramètres pouvant accroître la vitesse de propagation du feu et les surfaces en combustion et qu'il est impossible de généraliser lesquels seront prépondérants.

Des méthodes existent pour prédire les conditions d'occurrence d'un embrasement généralisé [WALTON 2002]. Par exemple, le débit calorifique nécessaire pour avoir un embrasement généralisé peut être relié à la surface A_0 et à la hauteur H_0 de l'ouverture d'un compartiment [BABRAUSKAS 1980] grâce à la relation (30).

$$\dot{Q}_{fo} = 750 A_0 \sqrt{H_0} \quad (30).$$

Une autre relation (31) existe, prenant en plus en compte le coefficient de transfert de chaleur effectif h_k (qui est égal au rapport entre la conductivité thermique du mur en $kW.m^{-1}.K^{-1}$ et l'épaisseur du mur), la surface totale du compartiment A_T [McCAFFREY 1981].

$$\dot{Q}_{fo} = 610 (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{1/2} \quad (31).$$

Une dernière relation [THOMAS 1981] est donnée par l'équation (32).

$$\dot{Q}_{fo} = 7,8 A_T + 378 A_0 \sqrt{H_0} \quad (32).$$

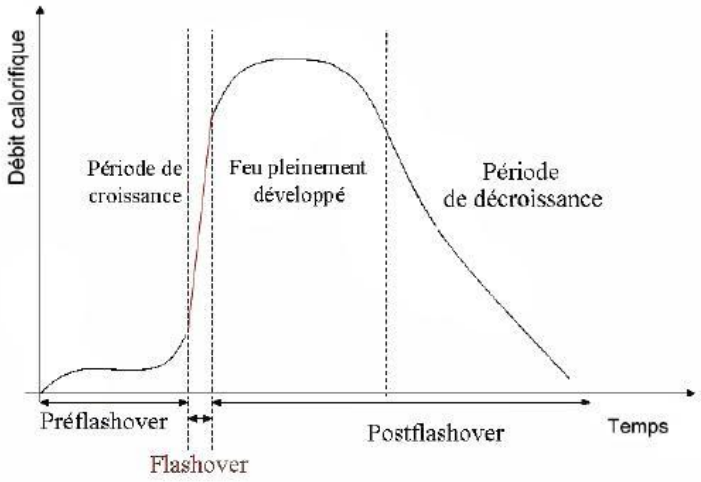
Dans certaines configurations, les ordres de grandeur des débits calorifiques pouvant mener à des embrasements généralisés sont utiles à prendre en compte dans une optique d'investigation. D'autant plus que les relations (30) à (32) donnent des valeurs conservatives, c'est-à-dire que les débits calorifiques calculés sont des valeurs minimales pour atteindre des embrasements généralisés [BABRAUSKAS 1984].

C'est pendant la phase où le feu est pleinement développé que les valeurs maximales du débit calorifique sont atteintes. L'alimentation en air peut alors devenir progressivement limitée en regard du besoin du foyer : le feu devient progressivement sous-ventilé. Dans cette configuration, le feu est dit contrôlé par la ventilation. Au cours de cette phase, il est courant que plus de combustible soit pyrolysé que ce que l'oxygène disponible puisse permettre d'en brûler. C'est alors qu'un feu confiné-ventilé suffisamment oxygéné se différencie d'un feu confiné-ventilé insuffisamment oxygéné. Dans cette dernière configuration, également appelée sous ventilée, il est alors possible que des imbrûlés soient entraînés par l'écoulement hors du compartiment et qu'ils brûlent dans un autre compartiment ou à l'extérieur [LASSUS 2009]. Pendant la phase de feu pleinement développé, l'environnement à l'intérieur du compartiment a un effet considérable sur la vitesse de pyrolyse des objets en train de brûler [WALTON 2002].

La phase de décroissance débute lorsque la majorité du combustible a été consommée et que le débit calorifique diminue. Le foyer peut changer de mode de ventilation pendant cette période en redevenant contrôlé par le combustible [WALTON 2002].

Ainsi, les différentes phases d'un incendie en milieu confiné-ventilé sont illustrées sur la courbe de débit calorifique schématique de la figure 19. Les phases d'allumage et de croissance (préflashover et flashover), de feu pleinement développé et de décroissance (postflashover) y sont clairement visibles.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



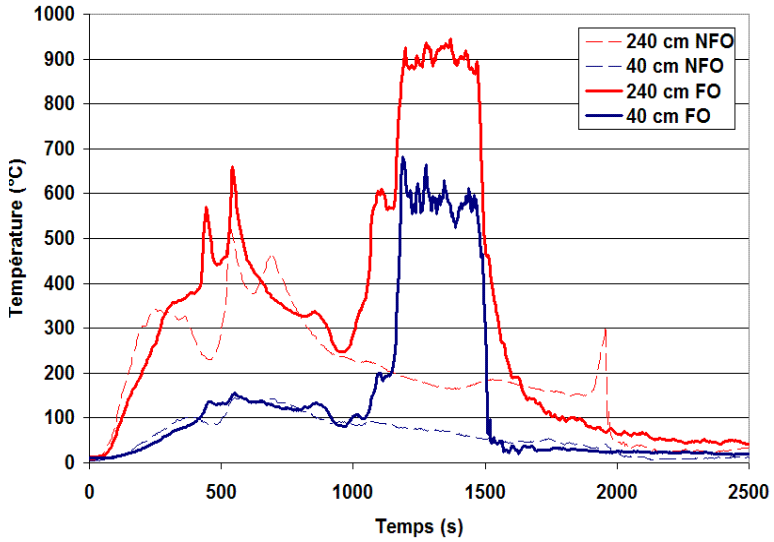
19. *Débit calorifique illustrant les phases d'un feu en milieu confiné-ventilé [LASSUS 2009]*

Les notions théoriques traitant du développement d'un incendie qui viennent d'être présentées vont être illustrées par l'exemple suivant. Dans le graphique 20 sont tracées les températures mesurées à 40 et 240 cm du sol lors d'un essai d'un feu de chambre d'hôtel. Cet essai a été répété trois fois à l'identique mais seuls deux d'entre eux sont présentés ici. Lors de ces expériences, l'allumage est réalisé à l'aide de deux allume-feux solides placés sur la face supérieure d'un lit constitué d'un sommier et d'une tête de lit en bois, d'un matelas en mousse polyuréthane, de draps en coton, d'une couverture en laine et d'un dessus de lit en matière synthétique. Si l'allumage est réalisé directement sur le couvre-lit, le feu peut ne pas démarrer car le matériau ne permet une propagation des flammes ni surfacique car la combustion ne dégage pas assez d'énergie pour qu'elle soit auto-entretenue, ni en profondeur car une couche de charbon qui se forme sous la source d'allumage ralentit fortement le transfert de chaleur en direction des autres éléments du lit. Avant l'allumage, le matelas est donc légèrement creusé et les éléments le recouvrant découpés de façon à ce que la source d'allumage soit directement en contact avec le polyuréthane et que la propagation ne soit ainsi pas trop retardée.

Les 300 premières secondes des essais sont assimilées à la phase de croissance de l'incendie. Les températures mesurées lors des deux expériences à 40 et 240 cm sont alors très proches l'une de l'autre et suivent une croissance parabolique (voir le graphique 20). Après 300 s, les effets du confinement et surtout de la ventilation commencent à ne plus être négligeables. Les deux cas se démarquent alors dans les valeurs atteintes à 240 cm : une différence de 120 °C est d'ailleurs observée entre les températures maximales mesurées sur les deux essais. Toujours à cette hauteur, les températures décroissent ensuite entre 600 et 975 s de façon quasiment identique pour les deux cas et atteignent environ 250 °C. Cette décroissance est causée par la quantité de combustible provenant du premier lit qui commence progressivement à manquer.
À environ 500 s, il y a une décroissance des températures mesurées sur le cas NFO tracé en pointillé dans le graphique 20 alors qu'elle n'est pas observée sur le second essai. La décroissance s'explique par une vitesse de propagation aux autres éléments combustibles moins rapide dans le cas NFO et en particulier vers le mobilier compris entre les deux lits.
Entre 300 et 975 s, les températures mesurées à 40 cm sont semblables d'un cas à l'autre et varient légèrement autour d'une valeur seuil moyenne de 130 °C.
La puissance du foyer et la ventilation dans la chambre ne permettent pas aux flammes de se propager, à partir de la source principale, vers les autres éléments de la pièce. En effet, la porte ouverte de la chambre donnant sur un couloir désenfumé (soufflage et extraction mécanique), les gaz chauds ont tendance à être évacués vers le couloir et à ne pas s'accumuler dans la chambre. Après 975 s, les deux cas se différencient alors nettement, l'un atteignant des conditions d'embrasement généralisé et l'autre non. Cette différence provient du changement de la ventilation du foyer pour l'essai atteignant un embrasement généralisé. En effet, dans ce cas, les sollicitations thermiques sont suffisantes pour faire progressivement céder une des deux fenêtres de la chambre jusqu'à la faire chuter 900 s après le début de l'expérience. Avec cette ouverture supplémentaire, les conditions de ventilation changent et influencent le développement du foyer : l'embrasement généralisé peut débuter. À cause d'une modification de l'équilibre de pressions après la chute de la fenêtre, les gaz

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

chauds ont plus tendance à s'accumuler dans la chambre et à être évacués par l'ouverture nouvellement créée. Les flammes se dirigent alors plus vers le fond de la chambre. Les températures augmentent ensuite très rapidement pour atteindre des valeurs seuils de 900 °C à 240 cm et 600 °C à 40 cm pendant plus de 300 s. La phase de décroissance commence avec l'intervention des pompiers 1 500 s après le début de l'incendie. Dans le cas où aucune fenêtre ne se brise, le feu décroît lentement une fois que l'ensemble du combustible du premier matelas est totalement consommé. Le feu s'éteint par manque de combustible faute d'avoir pu se propager aux autres matériaux de la pièce.



20. *Températures mesurées lors des deux essais à 40 et 240 cm du sol. (FO = flashover ; NFO = pas de flashover)*

La photo 21 a été prise dans la chambre où l'embrasement généralisé n'a pas été atteint. Alors que le matelas qui a été allumé a été totalement consumé en brûlant la face supérieure du sommier en bois (premier plan de la photo 21), le lit situé dans le fond de la chambre à moins de 1,5 m du premier n'a subi absolument aucune dégradation. La tête de lit visible sur la droite de la photo et qui a été déplacée lors de l'intervention des pompiers est elle aussi uniquement carbonisée sur la partie contre laquelle le lit était appuyé. Le foyer primaire s'est à peine communiqué aux palettes de bois placées entre les deux lits. Le dépôt de suie sur les murs laisse penser qu'une stratification des fumées était observée dans la chambre avec une hauteur libre de fumée de 50 cm.

Comme cela est visible sur la photo 22, l'embrasement généralisé a été atteint sur ce second essai : tous les combustibles présents dans la chambre ont participé à l'incendie. Des deux literies complètes, seules quelques parties en bois du sommier largement carbonisées sont retrouvées. La combustion des suies déposées sur les parois ainsi que l'uniformité et le niveau des dégradations sur le sol, les murs et le plafond sont ici synonymes d'embrasement généralisé et de feu pleinement développé.

21. *Vue de la chambre après l'essai pour lequel l'embrasement généralisé n'est pas atteint*

22. *Vue de la chambre après l'essai pour lequel l'embrasement généralisé est atteint*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En appliquant les équations (30) et (32) afin d'évaluer le débit calorifique nécessaire pour avoir un embrasement généralisé, des valeurs de 1 540 et 1 600 kW sont respectivement obtenues. Elles sont légèrement supérieures au débit calorifique maximum qu'un lit de cette taille peut dégager. La combustion de la literie dans la chambre de cette dimension ouverte avec une porte de cette taille ne semble donc pas susceptible de conduire à elle seule à l'embrasement généralisé. Cependant, un changement dans la ventilation induit par la chute de la fenêtre influence la propagation du foyer et permet d'atteindre un embrasement généralisé.

Cet exemple a été choisi car il matérialise les aspects théoriques présentés dans ce chapitre. De plus, le caractère imprévisible du feu y est également parfaitement illustré : pour deux configurations quasiment identiques, deux scénarios de développement du foyer très différents peuvent être observés. Il est extrêmement difficile de mettre en avant le ou les paramètres prépondérants qui ont fait basculer l'un des scénarios vers un embrasement généralisé et l'autre non.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3 Choix de l'outil numérique pour les besoins en investigation

3.1 Généralités sur la modélisation numérique en l'incendie

Depuis une quarantaine d'années, les systèmes informatiques et les modèles mathématiques ont évolués de telle sorte qu'il est maintenant envisageable de modéliser des phénomènes physiques et chimiques aussi complexes que ceux rentrant en jeu dans un incendie. Les premiers modèles dits probabilistes qui déterminaient le développement d'un incendie à partir d'un ensemble de données statistiques [McMAHON et AL. 1993] ont peu à peu laissé la place à des modèles déterministes basés sur la résolution de lois physiques et chimiques gouvernant un feu. À l'intérieur même des modèles déterministes appliqués à l'incendie, deux grandes tendances se distinguent aujourd'hui : les modèles de zones et les modèles de champs.

Les modèles de zones sont basés sur l'hypothèse de stratification des fumées. Dans un bâtiment, les gaz chauds issus de la combustion du foyer ont tendance, sous l'effet de la poussée d'Archimède, à s'accumuler sous le plafond et à créer deux zones : une première zone en partie basse dans laquelle de l'air frais sans fumée ni suie est présent, et une zone haute contenant les gaz de combustion, plus chauds que ceux de la partie basse. À l'intérieur de chaque zone, les caractéristiques physiques et chimiques telles que la température ou la composition en espèce sont supposées uniformes à un instant donné. Des bilans énergétiques, de matières et d'espèces sont résolus entre les zones gazeuses (zone haute, zone basse, flamme, panache et l'extérieur) et les zones de surface solide (parois et combustible). De nombreuses lois empiriques sont introduites pour résoudre les bilans comme la quantité d'air entraîné dans la flamme et le panache par exemple. Ce paragraphe n'a pas pour but d'expliquer en détails le fonctionnement des modèles de zones, pour cela il faut se reporter aux nombreuses références, notamment : [CURTAT 2002, JONES 2001, QUINTIERE 1995].

Des limites d'utilisation découlent de l'hypothèse de base du modèle de zone : la stratification des gaz chauds n'est pas toujours observable sur un incendie réel car ce phénomène dépend de nombreux paramètres comme la géométrie des lieux ou encore de la puissance du foyer par rapport au volume des locaux. De plus, la hauteur de stratification est parfois difficile à déterminer lorsqu'elle est observable car la limite entre la zone basse et la zone haute n'est jamais facile à évaluer précisément par rapport au gradient de températures d'un feu réel. Enfin, les modèles de zone doivent être appliqués dans des conditions identiques à celles où les lois empiriques utilisées ont été établies : même cinétique de feu (stationnaire, décroissant, …), volumes des locaux comparables, débit calorifique du même ordre, … Les avantages des modèles de zone devant les modèles de champs sont indéniablement les temps de mise en œuvre et de calculs extrêmement courts. Ils sont de l'ordre de la minute de calcul pour simuler plusieurs heures de feu avec un modèle de zone, alors que le temps de calcul se compte en jours pour simuler la même durée de feu avec un modèle de champ. Les modèles de zone sont également plus stables et robustes et ils permettent un dimensionnement rapide d'une structure ou d'un dispositif expérimental par exemple.

À la différence des modèles de zones, le domaine de calcul des modèles de champ n'est plus séparé en deux à partir de l'hypothèse de stratification, mais est divisé en un ensemble de volumes infinitésimaux. Dans ces volumes, le modèle résout numériquement de façon instationnaire les lois d'échange et de conservation de la masse, de l'énergie, des espèces et de la quantité de mouvement. De plus, les modèles de champs sont en général très peu régis par des relations empiriques : ils s'appuient sur une théorie physique et chimique infinitésimale. Du fait des grands volumes concernés par un incendie et de la puissance de calcul actuellement disponible, des sous-modèles sont utilisés pour la résolution de phénomènes tels que le rayonnement, la combustion ou encore la turbulence. Cela introduit des erreurs et des simplifications par rapport à la résolution directe des équations

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

lesquelles ne sont d'ailleurs même pas réellement connues concernant la combustion. L'introduction de ces modèles entraîne également des restrictions d'utilisation du code à champ comme lors de la définition d'une géométrie à partir d'un maillage structuré.

Par rapport aux modèles de zone, le temps pour paramétrer le fichier d'entrée d'une simulation et calculer avec une résolution correcte du maillage quelques minutes de l'incendie, se compte avec un modèle de champs en heure plutôt qu'en minutes. De plus la complexité et la précision croissantes des données d'entrée se révèlent parfois handicapantes car les informations ne sont pas toujours disponibles. Cependant, les modèles de champs s'affranchissent de la majorité des relations empiriques qui sont parfois imputées comme un défaut des modèles de zones. Avec un modèle de champs, l'écoulement est calculé en tout point du maillage et cela même pour des géométries complexes.

3.2 Présentation sommaire de FDS

Le Laboratoire Central de la Préfecture de Police a choisi d'utiliser comme outil numérique d'aide à l'investigation un code à champs appelé Fire Dynamics Simulator (FDS). Aujourd'hui, FDS est un outil de plus en plus utilisé dans le monde de l'incendie et en particulier pour des applications d'ingénierie dans le domaine de la sécurité. Les principales raisons de la capacité du code à évoluer rapidement et de l'intérêt grandissant de la communauté scientifique envers FDS sont les suivants :

- Bien qu'il ne dispose pas réellement de préprocesseur, il reste relativement facile à utiliser et à paramétrer.
- FDS est disponible gratuitement sur le site[7] du National Institute of Standards and Technology (NIST). Ses sources sont libres et codées principalement en FORTRAN.
- Il commence, à travers un nombre grandissant de publications scientifiques, à être reconnu comme étant fiable pour certaines applications.
- Les résultats des calculs sont visibles à l'aide d'un logiciel de visualisation gratuit et particulièrement soigné appelé Smokeview.
- L'interaction entre développeurs et utilisateurs, tout comme entre utilisateurs, ne cesse d'augmenter via la création de forums de discussions[8] ou de groupes de bêta-testeurs notamment.
- L'utilisation de FDS demande une puissance de calcul raisonnable puisque les simulations peuvent être effectuées sur un ordinateur de bureau et pas nécessairement sur un calculateur.

La version utilisée dans ces travaux, sortie en 2004, est numérotée 4. Plus de 20 ans séparent le moment où le système d'équations sur lequel se base FDS a été écrit [REHM 1978] et la première version du code mise à disposition en 2000. Un historique des développements jusqu'à cette première version est disponible dans la référence [CLEMENT 2000]. FDS ne cesse d'évoluer depuis.

Les principales caractéristiques de la version 4 de FDS utilisée dans ces travaux sont résumées dans le tableau 23.

Dans ce chapitre, les détails de FDS ne seront pas présentés. En effet, comme aucune modification du code n'a été effectuée dans ce travail, il n'a pas été jugé nécessaire de se focaliser sur cette présentation, mais plutôt sur celle des validations menées par rapport aux objectifs d'utilisation dans un but d'investigation. Pour une lecture exhaustive du fonctionnement de FDS, il est conseillé de se reporter aux notices techniques de FDS [McGRATTAN 2006, McGRATTAN et al. 2006] ainsi qu'à d'autres travaux comme, par exemple, ceux de la référence [DESANGHERE 2006].

[7] http://www.fire.nist.gov/fds/
[8] http://groups.google.com/group/fds-smv?pli=1

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Modèle hydrodynamique – Solveur des équations de Navier Stokes	Écoulements à faible nombre de Mach Discrétisation par différences finies Précision du second ordre en temps et en espace Méthode prédicteur/correcteur Simulation aux grandes échelles, modèle de Smagorinsky DNS utilisable
Modèle de combustion	Concept de fraction de mélange Combustion contrôlée par le mélange Chimie de réaction infiniment rapide Flamme de diffusion Modèle de pyrolyse
Modèle de rayonnement	Équation de transfert radiatif Rayonnement diffus Gaz gris non dispersif Résolution numérique par volumes finis Rayonnement selon une centaine d'angles discrets (possibilité donnée à l'utilisateur d'intervenir sur ce paramètre)
Conditions aux limites	Transferts d'énergie régis par des corrélations empiriques Transfert thermique *1D* au niveau de chaque maille solide

23. *Principales caractéristiques du code FDS*

Pendant la réalisation de cette thèse, la version 5 de FDS a été disponible à partir de 2007. De nombreuses simulations ayant déjà été effectuées sur la version 4, il a été décidé de ne pas basculer vers cette nouvelle version. En effet, une grande partie des conclusions sur la version 4 est applicable en l'état sur la 5. Les principales évolutions concernent :

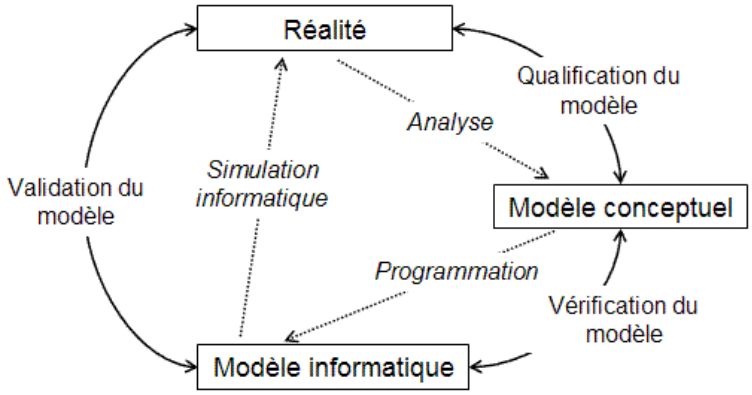
- le modèle de combustion qui est dorénavant multi étapes
- les frontières solides qui ne sont plus uniquement considérées comme homogènes mais qui sont maintenant multi couches
- une gestion différente des points de mesure permettant par exemple un asservissement plus souple et complet d'un sprinkler ou de l'ouverture d'une porte
- la possibilité d'avoir plusieurs zones ayant des pressions de fond différentes de la pression ambiante facilitant ainsi la gestion des fuites.

3.3 Validation de l'outil numérique

3.3.1 Stratégie de validation

Les deux étapes principales pour évaluer une simulation numérique de type Computational Fluid Dynamics (CFD) sont appelées vérification et validation et souvent abrégées en V&V. Pour définir la V&V, il faut commencer par expliquer les différences qui existent entre les divers groupes définis dans le schéma 24, adapté de la référence [SCHLESINGER 2000]. Il représente les différentes phases de modélisation et de simulation. Dans ce schéma, un modèle est considéré comme une représentation d'un système physique permettant d'améliorer l'aptitude à comprendre, prédire et contrôler le fonctionnement de ce système. Deux types de modèle sont définis. Le premier est le modèle conceptuel qui modélise le phénomène physique par le biais d'équations mathématiques obtenues par l'analyse d'études expérimentales, théoriques ou numériques. Le second, le modèle informatique est quant à lui une implémentation sous forme de programme ou de code de calcul du modèle conceptuel. La modélisation consiste à élaborer ou adapter un modèle et son utilisation est une simulation.

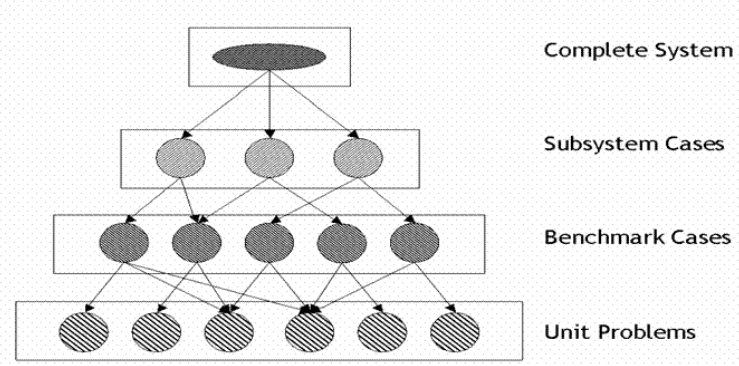
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



24. *Phases de modélisation et de simulation [SCHLESINGER 2000]*

Le schéma 24 introduit également les phases de vérification et de validation entre la réalité, le modèle conceptuel et le modèle informatique. La vérification est le processus qui détermine si l'implémentation du modèle représente précisément le modèle conceptuel du développeur ainsi que la solution du modèle [AIAA 1998, ASTM E1355]. Quant à la validation, c'est le processus qui détermine à quel degré un modèle est une représentation précise du monde réel dans la perspective de l'usage souhaité du modèle. Le terme de prédiction est employé si le modèle est utilisé pour déterminer l'état d'un système physique dans des conditions pour lesquelles le modèle CFD n'a pas été validé.

Dans cette étude, aucune attention n'est portée à l'étape de vérification de FDS car il est considéré que ce travail, étant plus de la responsabilité du développeur de l'outil, a été réalisé correctement au préalable. Dans ce chapitre, seule la démarche de validation est entreprise avec pour objectif d'appliquer FDS à des reconstitutions, dans un but d'investigations, de scénarios d'incendie. Pour cela, une approche de validation multiblocs est choisie. D'après l'American Institute of Aeronautics and Astronautics [AIAA 1998], cette approche décompose le système complet à simuler au minimum en trois niveaux de complexités décroissantes appelés respectivement sous-systèmes, benchmarks (ou problèmes modèles) et enfin problèmes unitaires (cf. graphique 25).



25. *Décomposition multiblocs du système complexe pour l'objectif de validation [AIAA 1998]*

Le niveau supérieur du graphique 25 correspond au système complet représentant l'application finale pour laquelle le logiciel doit être validé. Aucune simplification du cas n'est à ce niveau considérée et la géométrie étudiée est complexe dans ses dimensions, ses formes ou sa disposition. Les phénomènes physiques sont fortement couplés ; lors de l'incendie d'un appartement, le rayonnement est couplé à la combustion qui elle-même est couplée à la turbulence, etc. …

Le niveau suivant est une subdivision du système complet en plusieurs sous-systèmes dont la géométrie est simplifiée et pour lesquels le niveau de couplage des phénomènes physiques est réduit.

Le second niveau de décomposition du système complet correspond aux benchmarks qui sont des cas de validation séparant les sous-systèmes de façon à ce que seuls deux phénomènes physiques

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

couplés soient étudiés. La géométrie de ces problèmes modèles est également simplifiée par rapport aux niveaux supérieurs.

Le dernier niveau de décompositions multiblocs est considéré comme le plus haut niveau de simplification. Sur ces problèmes unitaires, les phénomènes physiques sont très faiblement couplés.

L'une des difficultés de cette approche multiblocs est que, plus on s'éloigne du niveau du système complet, c'est-à-dire plus le problème est simplifié, plus la quantité de données nécessaires pour la validation augmente et plus ces données doivent être précises. Il n'est donc pas toujours aisé de les acquérir et cela a un coût financier élevé. La seconde difficulté réside dans la décomposition du problème complet en sous-systèmes, benchmarks et problèmes unitaires, décomposition qui peut être infinie. La multiplication de ces décompositions s'accompagne donc par une augmentation des simulations à effectuer dans l'étape de validation. La méthode de validation consistant à commencer par évaluer les résultats des simulations des niveaux les plus bas de simplification pour complexifier progressivement les cas d'étude est certainement la méthode la plus efficace. Cependant, elle s'accompagne d'un coût qu'il n'est pas toujours possible de payer.

Dans ce chapitre, une combinaison de différentes méthodes de validation est envisagée. Il est procédé à l'analyse de plusieurs cas d'études situés au premier niveau de décomposition multiblocs, les sous-systèmes. Cette analyse est accompagnée d'études de sensibilités sur des cas complets.

Il est à noter que, au contraire de la version 4 de FDS, la version 5 est accompagnée de documents complets détaillant les étapes de vérification [McDERMOTT 2009] et de validation [McGRATTAN 2009].

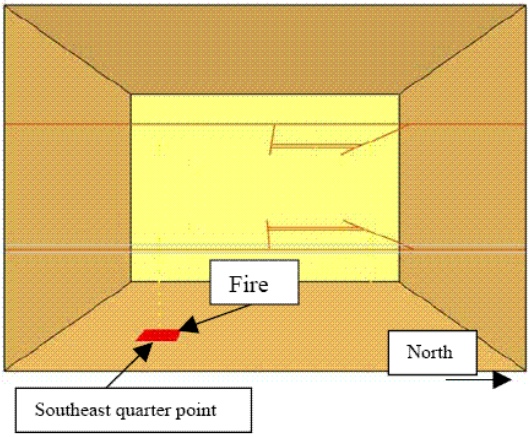
3.3.2 Détermination d'un critère de taille de maille

3.3.2.1 Étude bibliographique

Pour un projet de recherche visant à évaluer la sûreté de personnes dans leurs maisons en cas d'incendies, des simulations ont été réalisées avec la version 4 de FDS par le National Research Council Canada [BOUNAGUI 2003]. La première étape de l'étude est celle qui a le plus d'intérêt pour ces travaux de thèse. Elle consiste à déterminer la taille de cellule optimale utilisée dans les simulations effectuées afin de calculer les conditions de tenabilité d'une personne dans l'incendie de son habitation. Pour ce faire, un cas fictif (cf. image 26) est utilisé reproduisant une maison constitué de :

- Trois étages compris dans un volume rectangulaire de base mesurant 10,77 m par 9,24 pour une hauteur de 8,22 m.
- Une ouverture de 0,9 m de large pour 2,4 m de haut, située au rez-de-chaussée et communiquant vers l'extérieur du domaine.
- Deux escaliers de 3 par 0,9 m de surface au sol. Le premier, situé à 2,7 m du sol, fait communiquer le rez-de-chaussée avec le premier étage et le second, à 5,5 m du sol, relie le premier au second étage. Ces surfaces restent ouvertes sur l'ensemble des simulations.
- Trois foyers différents sont utilisés. Ils ont une croissance rapide en αt^2 suivie par une phase où leur débit calorifique est constant et égal à 1 500, 2 500 et 3 000 kW. Ces valeurs maximales du débit calorifique sont obtenues respectivement à 179, 231 et 253 s. La source calorifique considérée est un brûleur au propane de 1 m par 1 m placé au rez-de-chaussée.
- Quatre tailles de mailles ont été utilisées au rez-de-chaussée : 0,2, 0,14, 0,1 et 0,08 m. Pour les deux étages supérieurs, la taille de maille est constante sur toutes les simulations et fixée à 0,2 m.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



26. *Géométrie de la maison utilisée dans [BOUNAGUI 2003]*

Les auteurs étudient, pour chacune des puissances de feu, la convergence des résultats en fonction de la taille de cellule ; ils s'intéressent en particulier à l'évolution temporelle de la température en un point du rez-de-chaussée. Ainsi, une convergence en maillage est atteinte pour des tailles de mailles de 0,08 m pour le foyer de 1 500 kW, et de 0,1 m pour les foyers de 2 500 et 3 000 kW. Les tailles de mailles trouvées pour atteindre une convergence en température dépendant de la puissance imposée au foyer, le nombre sans dimension R^* défini dans l'égalité (33) [MA 2003], représentatif de la résolution du panache simulé, est introduit. Dans chacun des cas simulés, la convergence en maillage est atteinte lorsque R^* est inférieur ou égal à 0,07. Cette valeur est utilisée par les auteurs pour choisir la taille de maille adaptée à leur étude.

$$R^* = \frac{max(\partial x, \partial y, \partial z)}{D^*} \qquad (33).$$

Dans l'équation (33), D^* le diamètre caractéristique du feu (34) et ∂x, ∂y et ∂z les tailles de maille dans les trois directions de l'espace.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gD}D^2} \right)^{\frac{2}{5}} D = \dot{Q}^{*2/5} D \qquad (34).$$

Dans l'équation (34), D le diamètre effectif du feu, $\dot{Q}$ le débit calorifique total (kW), ρ_∞ la masse volumique à température ambiante, c_p la capacité thermique à pression constante du gaz, T_∞ la température ambiante (exprimée en K), g l'accélération de la gravité et $\dot{Q}^*$ le nombre de Froude du feu donné par l'équation (35).

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gD}D^2} \qquad (35).$$

Tous les cent pas de temps, l'index de résolution du feu (FRI) est enregistré pour indication par FDS dans un fichier de sortie. C'est un indicateur de qualité de résolution du calcul [McGRATTAN 2006] : c'est la fraction de la valeur stœchiométrique idéale de la fraction de mélange qui est utilisée dans le calcul. Les auteurs de l'étude [BOUNAGUI 2003] utilisent le FRI pour estimer la convergence du calcul. À quel pas de temps est retenue la valeur que les auteurs utilisent ? Quelle valeur faudrait-il utiliser ? Il ne semble pas opportun d'utiliser le FRI dans la suite de ces travaux de recherche car ce paramètre, calculé à chaque pas de temps, varie assez rapidement. Ce FRI n'est qu'une indication donnée à l'utilisateur de FDS et non pas une donnée de sortie.

D'autres études de sensibilité au maillage de FDS sont disponibles. Petterson a comparé deux tests expérimentaux, réalisés par Gott [GOTT et AL. 1997], à des résultats de simulations effectuées avec la version 2 de FDS [PETTERSON 2002]. Pour des feux réalisés dans des hangars de grand volume

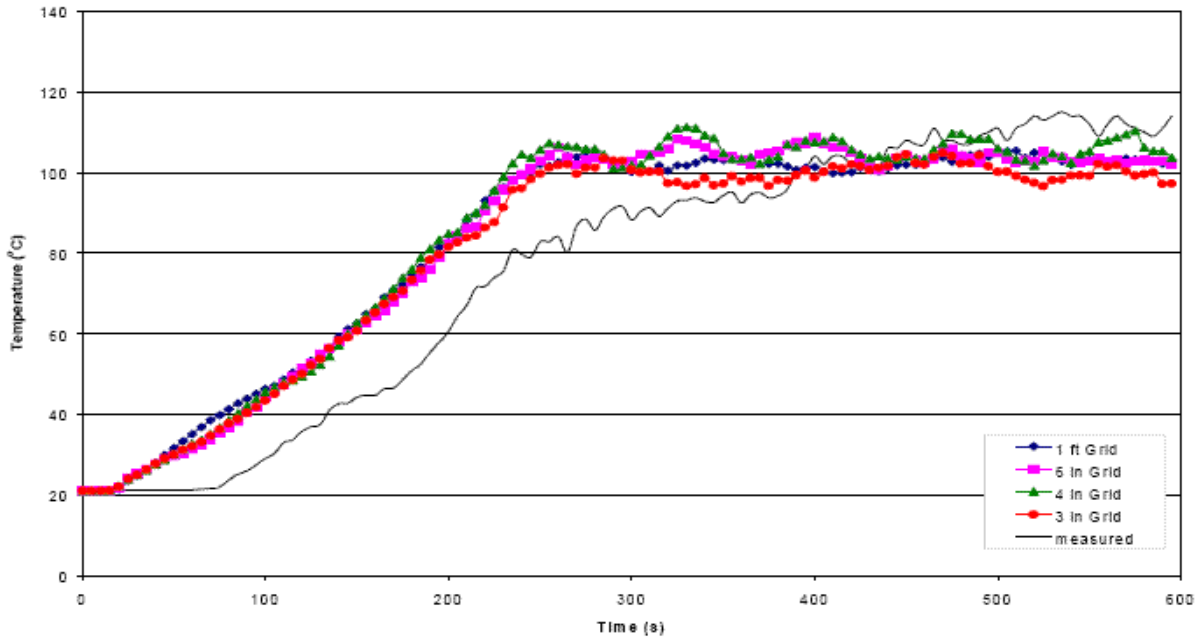
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

de 98 × 74 × 15 m^3, ses simulations, fortement limitées par la puissance de calcul disponible, ont été effectuées avec des maillages trop grossiers pour qu'une convergence en maillage soit attendue. Des foyers de puissances comprises entre 5,58 et 6,76 MW sont simulés avec des tailles de maille de 0,6 à 3,6 m. Cela correspond à des R^* compris entre 0,3 et 1,9. Il en est de même pour la seconde configuration constituée de deux chambres ISO de 2,4 × 3,6 × 2,4 m^3 accolées et séparées par une ouverture de la taille d'une porte standard centrée sur la largeur du volume ; la face latérale la plus éloignée du foyer est ouverte. Les débits calorifiques varient de 55 à 165 kW et les simulations ont des mailles de 0,1, 0,15 et 0,30 m, ce qui correspond à des R^* compris entre 0,08 et 0,34. Les auteurs considèrent que les températures simulées sont comprises dans les incertitudes expérimentales de 15% pour des R^* inférieurs à 0,17. Sur les figures présentées par Petterson, il est constaté que cela est vérifié pour la majorité des points de mesure disposés dans le volume sauf ceux directement à la verticale du brûleur entre le sol et 1 m de hauteur où, même avec un R^* de 0,08, les températures ne sont pas comprises dans les incertitudes expérimentales de 15 %. Ce point de mesure placé dans les flammes fait apparaître une difficulté du code à simuler des températures de flammes correctes. Cette étude de sensibilité au maillage de FDS est donc jugée comme n'étant pas assez complète. Mais il est cependant possible de conclure que :

- Pour un foyer de 6,76 MW placé dans un grand volume à échelle industrielle, un R^* de 0,3 n'est pas suffisant pour atteindre une convergence en maillage.
- Pour des foyers de faible puissance inférieure à 165 kW, dans une configuration spatiale proche de celle rencontrée en habitation, un R^* supérieur à 0,08 correspond à un maillage trop grossier pour atteindre la convergence dans le panache du foyer, mais cela est suffisant dans le reste du domaine simulé.

Une étude générale plus complète [FRIDAY et AL 2001] a été menée en réalisant la simulation de sept des vingt cinq essais en grandeur réelle, effectués dans un local de 18,3 m de longueur par 12,2m de largeur et 6,1 m de haut sur lesquels un nombre conséquent de points de mesures expérimentaux ont été mis en œuvre. Deux types de foyer ont été utilisés : des feux stationnaires ou croissants en αt^2 avec une puissance maximale allant de 500 kW à 2 MW [NOWLEN 1987]. Les résultats des essais ont été comparés à des simulations faites avec la première version de FDS libre d'accès. Pour chaque essai, plusieurs simulations ont été réalisées avec des tailles de mailles fixées à 0,6, 0,3, 0,2 et enfin 0,15 m. En général, les températures simulées sont supérieures aux températures mesurées ; les écarts de température les plus élevés, de l'ordre de 100 °C, sont situés au niveau du panache thermique. Les auteurs concluent, qu'une amélioration des températures simulées par rapport à celles mesurées est en général observée en passant d'un maillage de 0,6 à 0,3 m mais pas de 0,3 à 0,2 m ; cela équivaut pour une puissance de 500 kW à des R^* respectivement de 0,85, 0,42 et 0,33 et pour un foyer de 2 MW à des R^* de 0,49, 0,24 et 0,19. Comme c'est dans cette zone que les écarts entre températures expérimentales et simulées sont les plus grands, une étude complémentaire a été menée sur la dépendance au maillage des températures dans le panache, c'est-à-dire dans la zone au-dessus de la flamme et juste sous le plafond. Des essais ont été effectués sur un domaine de 3 m par 3 m par 6,1 m de hauteur et les températures ont été mesurées à 12 cm du plafond. Des calculs avec des cellules de 0,31 m (R^*=0,42), 0,18 m (R^*=0,25), 0,12 m (R^*=0,16) et 0,09 m (R^*=0,12) ont été exécutés. Peu de différences sont observées sur les valeurs des températures obtenues avec les différents maillages (voir le graphique 27). Elles sont surestimées de 20% dans la phase croissance du foyer et, une fois que le foyer est stabilisé, elles sont du même ordre, autour de 100 °C. La résolution du maillage joue un rôle important dans la précision des résultats des simulations de FDS, cependant, sur les cas étudiés, curieusement peu de changements ont au final été observés entre ces diverses simulations pour un point situé sous le plafond.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



27. *Températures dans le panache pour 4 tailles de mailles sur l'expérience simulée par Friday et confrontation aux valeurs expérimentales [FRIDAY et AL 2001]*

Au regard des études présentées dans ce paragraphe, les résultats obtenus à l'aide des différentes versions de FDS semblent avoir une dépendance variable à la taille de maille utilisée. En effet, cette sensibilité paraît augmenter entre la version initiale et la quatrième. Cela provient certainement du rapport entre la puissance des foyers et le volume considéré ou la hauteur sous plafond. Comme il n'est pas possible de généraliser ces résultats, il a été décidé de mener des simulations complémentaires pour un cas ayant un foyer d'une puissance et un domaine de calcul proches de ceux que le LCPP est susceptible de rencontrer lors de ses investigations et pour lesquels les résultats de ces travaux seront appliqués. L'utilisation du paramètre adimensionné R^* parait pertinent pour optimiser les tailles de mailles afin d'obtenir une convergence des résultats. Pour la version 4 de FDS utilisée, la valeur de 0,07, comme cela est recommandé par Bounagui [BOUNAGUI 2003], semble être une valeur appropriée qui sera confirmée par l'étude complémentaire décrite ci-dessous.

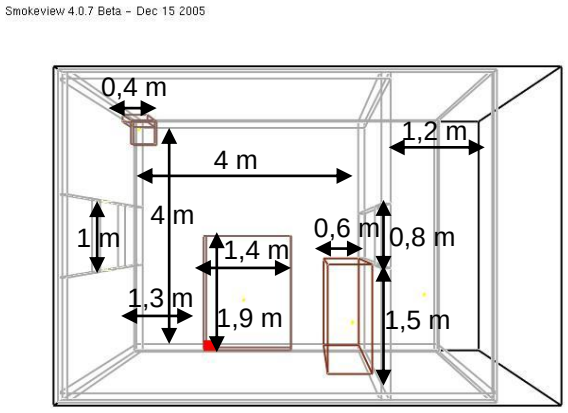
3.3.2.2 Étude complémentaire sur un cas de chambre d'hôtel

3.3.2.2.1 Présentation du cas

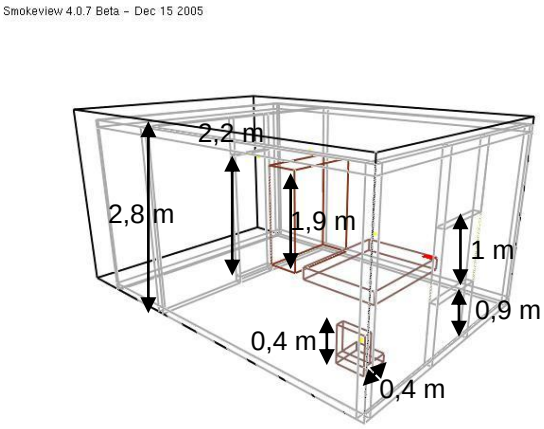
Les simulations présentées dans l'étude bibliographique du paragraphe précédent sont toutes à l'échelle industrielle. Lors de ses investigations, le LCPP travaille rarement sur des locaux d'une telle dimension. La majorité des incendies qu'il rencontre a lieu dans des locaux d'habitation. C'est pourquoi une configuration aux dimensions plus proches de celles rencontrées par le LCPP a été choisie pour poursuivre cette analyse de sensibilité au maillage.
Un cas fictif d'un feu dans une chambre d'hôtel a été retenu. Leur potentiel calorifique moyen est de 310 $MJ.m^{-2}$ [d'HOOP 2005]. Celui du cas retenu est de 60 $MJ.m^{-2}$. Une valeur inférieure a été choisie car tous les matériaux de revêtement ne sont pas pris en compte (moquette, lino, frisette en bois, etc.). Le départ de l'incendie est situé à la tête du lit et il a la possibilité de se propager aux mobiliers adjacents. Des simulations ont été effectuées pour huit tailles de mailles différentes et en configuration porte de la chambre ouverte puis fermée.

Le cas d'étude est composé d'une chambre d'hôtel communiquant avec une portion de couloir par une porte. La chambre donne vers l'extérieur par une fenêtre en verre de 10 cm d'épaisseur qui disparaît après 420 s de simulation pour reproduire un bris thermique de la vitre. La chambre est équipée d'un lit de 20 cm d'épaisseur disposé à 30 cm du sol. Un fauteuil, dont l'assise et le dossier mesurent 10 cm d'épaisseur, est disposé dans un coin de la chambre. Le mobilier de la chambre est complété par une armoire, située dans le coin opposé de celui occupé par le fauteuil. Le couloir, quant à lui, ne comporte aucun élément mobilier. Il est fermé sur la droite par un mur et ouvert sur la gauche. La configuration et les cotes des lieux sont visibles sur les images 28 et 29.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



28. *Vue de dessus de la chambre d'hôtel fictive*



29. *Vue d'ensemble de la chambre d'hôtel fictive*

Les caractéristiques de la mousse utilisée pour le matelas du lit et le fauteuil sont les suivants :

- température initiale de 20°C
- épaisseur de 0,1 m
- densité de 40 $kg.m^{-3}$
- capacité thermique massique de 0,33 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

Le matériau est considéré comme combustible et thermoplastique :

- sa température d'auto-inflammation est de 280 °C
- son enthalpie de vaporisation vaut 1500 $kJ.kg^{-1}$
- son enthalpie de combustion est égale 30000 $kJ.kg^{-1}$
- sa vitesse maximale de combustion est de 0,03 $kg.m^{-2}.s^{-1}$

Pour initier la propagation, un brûleur carré de 20 cm de côté est placé à la tête du lit (voir la zone rouge sur les images 28 et 29). Sur cette surface, un débit calorifique par unité de surface de 5 000 $kW.m^{-2}$ est imposé, ce qui équivaut à 200 kW. Cette valeur peut paraître élevée pour simuler le départ d'un incendie, c'est pourquoi une étude de sensibilité des simulations à la puissance imposée par le brûleur est effectuée aux paragraphes 3.3.2.2.7 et 3.3.2.2.8.

Afin d'évaluer la sensibilité au maillage des simulations FDS, des mailles cubiques uniformes respectant un rapport de forme de 1 ont été choisies sans raffinement local du maillage. Huit tailles de mailles ont été utilisées, du très grossier avec des cellules de 0,2 m au fin de 0,05 cm (cf. tableau 30).

Nom du cas	Nombre de mailles dans chaque direction	Nombre total de mailles	Taille d'une maille (m)	R^*
Chambre 31	30 × 20 × 15	9 000	0,2	0,164
Chambre 7	45 × 30 × 24	32 400	0,13	0,111
Chambre 41	60 × 40 × 30	72 000	0,1	0,083
Chambre 8	75 × 50 × 36	135 000	0,08	0,067
Chambre 10	81 × 54 × 40	174 960	0,074	0,061
Chambre 5	90 × 60 × 45	243 000	0,066	0,055
Chambre 9	105 × 70 × 54	396 900	0,055	0,046
Chambre 6	120 × 80 × 60	576 000	0,05	0,042

30. *Caractéristiques des maillages de la chambre d'hôtel*

La réaction chimique utilisée dans les simulations, les positions des points de mesure et les caractéristiques du verre, du béton des murs et du bois des mobiliers sont disponibles en annexes.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.2.2.2 Propagation à partir du brûleur

La première comparaison des simulations est qualitative : c'est une analyse temporelle et spatiale du déplacement des flammes et de la propagation du feu au sein de la pièce. Ainsi, il apparaît pour l'ensemble des simulations une séparation en deux groupes :

- Le premier regroupe les cas Chambre 31 et 7 pour lesquels le feu ne se propage pas aux mobiliers. Le foyer reste localisé à la tête du lit et s'éteint très vite, avant même la fin du débit calorifique de la source d'allumage.
- Le second groupe rassemble tous les autres cas (Chambre 41, 5, 6, 8, 9, 10) pour lesquels le feu se propage à l'ensemble du lit, suivi de l'apparition de flammes persistantes sur le fauteuil puis l'armoire.

Cette première division, synthétisée dans le tableau 31, fait apparaître une influence de la taille de maille sur la propagation du foyer. Les chambres 31 et 7 correspondent aux cas maillés les plus grossièrement avec des cellules de 0,13 et 0,20 m c'est-à-dire un R^* de 0,111 et 0,164. Ils ne permettent pas d'obtenir une propagation. Cela serait le cas avec une puissance supérieure imposée au brûleur mais, d'une part, ces nouvelles valeurs n'auraient vraiment plus été représentatives des premières minutes d'un incendie et, d'autre part, toutes les simulations ont été effectuées avec une source d'allumage identique et en changer n'aurait pas permis de confronter les résultats de chaque cas. Concernant le second groupe, une influence de la taille de maille sur l'évolution temporelle de l'incendie est aussi visible. En effet, comme cela est montré dans le tableau 31, le temps mis pour que les flammes disparaissent varie de 906 s avec une maille de 8 cm (chambre 8) à 1 158 s avec une maille de 6,6 cm (chambre 5).

Lorsqu'il n'y a pas de propagation, cela se remarque également dans les températures maximales atteintes. Ainsi, dans le couloir, elles ne dépassent jamais les 82 °C ce qui est largement inférieur aux 300 °C environ des autres simulations (voir le tableau 31).

Ces résultats sont importants lorsque le code numérique est utilisé dans une logique d'investigation. Étudier l'aspect temporel est parfois une des finalités des simulations. Si de tels écarts sont observés sur les durées de combustion des matériaux, il faut s'interroger sur le crédit à apporter aux informations temporelles car elles sont fortement dépendantes de la résolution du maillage. Sur le cas de la chambre d'hôtel, les valeurs de temps de propagation d'un élément mobilier à un autre ou de durée de combustion ne sont donc à considérer que comme des ordres de grandeur temporels.

Nom du cas	Propagation au reste du mobilier	Lieu des dernières flammes	Temps des dernières flammes (s)	Température maximale dans le couloir (°C)	R^*
Chambre 31	Non	Tête du matelas	58,5	82	0,164
Chambre 7	Non	Tête du matelas	42	36	0,111
Chambre 41	Oui	Fauteuil	1 086	335	0,083
Chambre 8	Oui	Fauteuil	906	285	0,067
Chambre 10	Oui	Fauteuil	1 108,5	292	0,061
Chambre 5	Oui	Fauteuil	1 158	298	0,055
Chambre 9	Oui	Fauteuil	918	284	0,046
Chambre 6	Oui	Fauteuil	993	290	0,042

31. *Propagation du feu pour les huit simulations de la chambre d'hôtel*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

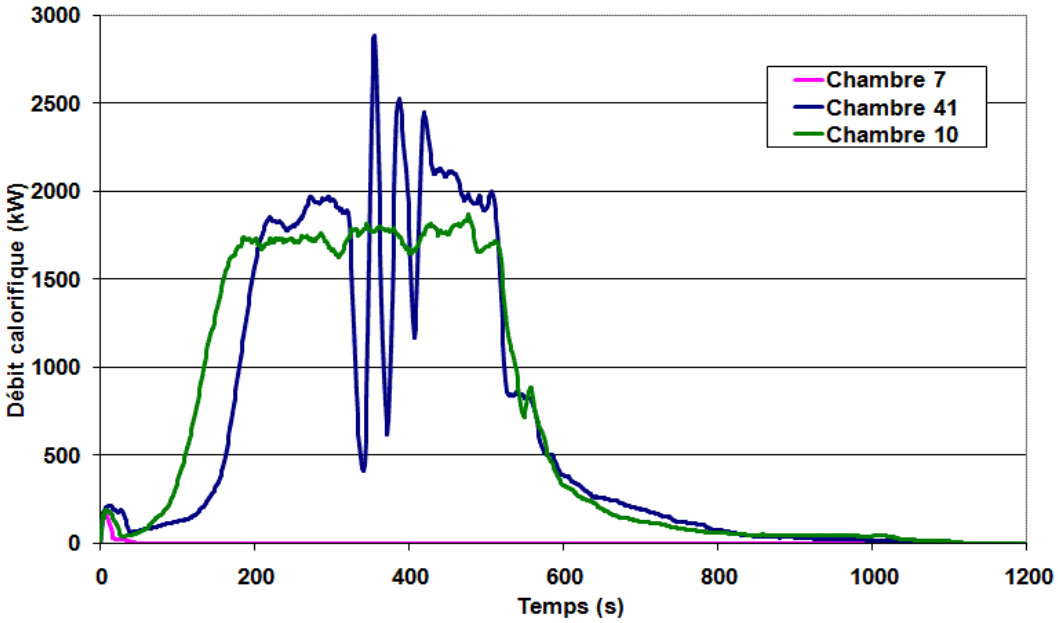
3.3.2.2.3 Sensibilité du débit calorifique à la taille de maille

En étudiant le débit calorifique en fonction du temps tracé sur le graphique 32 pour trois des huit configurations, la division en deux groupes évoquée au paragraphe 3.3.2.2.2 est parfaitement observable. Le débit calorifique du cas Chambre 7 ne dépasse pratiquement jamais les 200 kW ce qui correspond à la puissance dégagée par le brûleur. Avec le cas Chambre 31, ils constituent la famille A représentative des simulations pour lesquelles le foyer reste localisé à la tête du lit dans la zone proche du brûleur imposé pendant les 100 premières secondes.

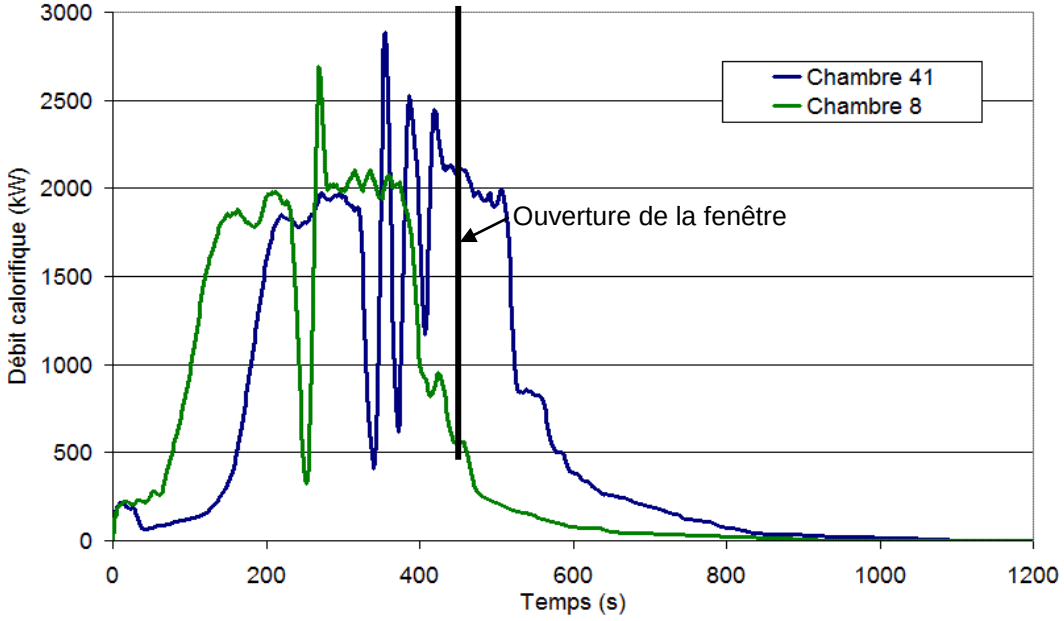
Pour les cas restants, il y a toujours propagation aux éléments combustibles à partir du brûleur. Cependant, il est encore possible de diviser ces cas en deux familles en fonction de leur comportement : la première, qui sera appelée famille B, comprend les cas Chambre 41 et 8 et la seconde, la famille C, regroupe les cas Chambre 5, 6, 9 et 10.

Pour la famille B, lorsque le feu est pleinement développé, de fortes variations du débit calorifique sont observées autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 1 800 kW. L'amplitude de ces variations dépasse parfois 1 400 kW. Ce phénomène est visible sur le graphique 33 pour les deux configurations de maillage de la famille B. Ces fortes variations apparaissent lorsque l'oxygène présent dans l'air de la chambre n'est plus disponible en quantité suffisante pour que la combustion continue : le débit calorifique chute car il n'y a plus de combustion, de l'air frais pénètre alors dans la chambre car les pressions entre la chambre et le couloir se sont rééquilibrées et la combustion reprend vivement car l'apport de comburant est massif et cela se traduit par une brusque augmentation du débit calorifique. Ces fortes variations correspondent à une alternance d'extinctions des foyers suivies de leur réinflammations.

Pour la famille C, l'évolution du débit calorifique est très proche de celle de la famille B à l'exception des fortes variations qui ne sont plus observables. Elle correspond à un développement classique d'incendie piloté par le combustible sans phase d'extinction et de réinflammation. Elle comprend les phases d'allumage, de propagation, d'embrasement généralisé, de stabilisation lorsque le feu est pleinement développé et de décroissance lorsque le combustible vient à manquer (cf. chapitre 2).



32. *Évolutions temporelles du débit calorifique pour les cas Chambre 41 (famille B), 7 (famille A) et 10 (famille C)*



33. *Évolutions temporelles du débit calorifique pour les cas de la famille B*

Nom du cas	Famille	Taille de maille	R^*
Chambre 31	A	0,2	0,164
Chambre 7	A	0,13	0,111
Chambre 41	B	0,1	0,083
Chambre 8	B	0,08	0,067
Chambre 10	C	0,074	0,061
Chambre 5	C	0,067	0,055
Chambre 9	C	0,056	0,046
Chambre 6	C	0,05	0,042

La distinction en trois familles est intimement liée à la taille des mailles utilisées dans les simulations (cf. tableau 34). En effet, une hiérarchisation des familles en fonction de la taille de maille est constatée : la famille A correspondant aux maillages les plus grossiers, la famille B aux deux tailles suivantes et la famille C aux plus fins. Il est supposé que si une simulation est réalisée avec des mailles d'une taille comprise entre 0,13 et 0,2 m, elle se comportera comme la famille A c'est à dire que le feu sera localisé uniquement à la tête du lit et ne se propagera pas plus. Et de même avec la famille B pour des mailles comprises entre 0,08 et 0,1 m et avec la C pour des mailles inférieures à 0,074 m.

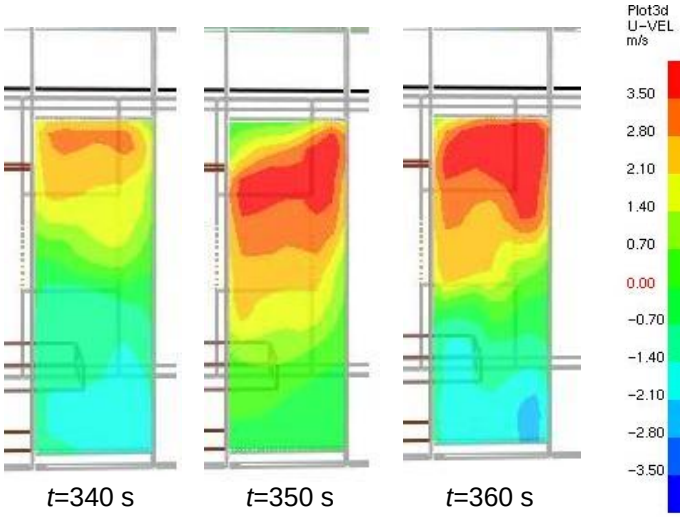
Il est maintenant indéniable que la taille des mailles a une influence directe et non négligeable sur la simulation et notamment sur la dynamique de l'incendie.

34. *Taille de maille de chacun des cas et famille à laquelle ils appartiennent.*

À partir du scénario d'un départ de feu localisé à la tête du lit, il est hautement probable que dans une majorité des cas réels, le foyer y reste confiné si la puissance de la source d'allumage est faible. Cependant dans notre cas d'étude, 5 000 $kW.m^{-2}$ sont imposés sur une surface de 0,04 m^2 soit 200 kW. Cela correspond à la puissance maximale dégagée par la combustion de deux ou trois oreillers ou encore celle d'un téléviseur. Dans ces conditions, il devrait y avoir une propagation au matelas voire une généralisation de l'incendie à l'ensemble de la chambre si la quantité d'oxygène disponible est suffisante. Il n'y a pas de propagation pour les chambres 31 et 7, le modèle retranscrit mal la réalité physique avec de telles tailles de mailles. Le maillage est trop grossier pour modéliser correctement la hauteur et la température de flamme. Par conséquent, le flux thermique incident en direction du matelas est sous-estimé et la température du matériau n'atteint jamais la valeur critique de pyrolyse. De même, il est possible de se demander si la physique du feu est bien retranscrite pour les deux cas de la famille B. Bien que les fortes variations de débit calorifique puissent avoir une justification physique [voir les mesures de débit calorifique de certains essais de la référence [LASSUS 2009], elles sont ici la conséquence d'un phénomène purement numérique typique hors du domaine de convergence numérique car elles disparaissent en raffinant le maillage. Ces fortes

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

variations débutent toujours par une chute du débit calorifique. Une surpression de la chambre par rapport au couloir empêche l'oxygène de pénétrer et il n'y a par moment que du fluide qui circule en direction du couloir par la porte de la chambre. Lors d'un feu établi, piloté par la ventilation, il est en général considéré que deux tiers de la surface d'une ouverture sont utilisés pour évacuer les gaz de combustion alors que le dernier tiers amène de l'air frais. Lors des simulations de la famille B, il existe, peu de temps avant le début des fortes variations, des périodes où la quasi totalité de la surface de la porte est utilisée pour expulser les gaz de combustion. Cela est observable à l'aide des vitesses perpendiculaires au plan des vues tracées sur l'image 35.



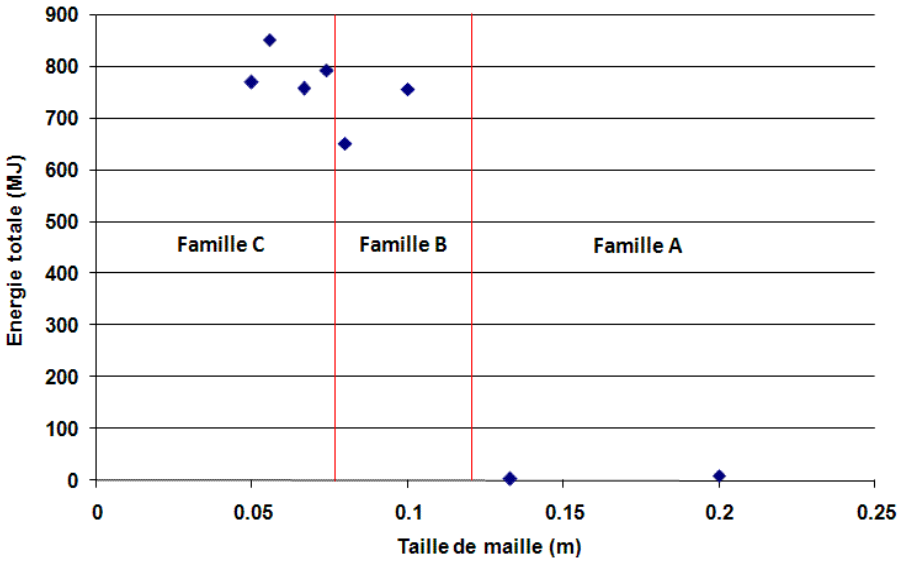
35. *Vitesses horizontales perpendiculaires au plan du chambranle de la porte séparant la chambre du couloir pour le cas Chambre 41 (famille B)*

Les familles A et B sont donc constituées de simulations dont les résultats ne sont pas physiques. Un critère limite supérieur de taille de maille pourrait être envisagé en fonction de la qualité du résultat. Des fortes variations non physiques dans le débit calorifique permettront d'écarter rapidement une simulation pour un manque de résolution du maillage.

3.3.2.2.4 Sensibilité de l'énergie à la taille de maille

Une méthode indirecte pour comparer les débits calorifiques est de les intégrer par rapport au temps pour en déduire l'énergie dégagée par la combustion lors de la simulation ; cette technique ne prend pas en considération l'évolution temporelle du débit calorifique. Les résultats obtenus pour les huit cas de la chambre d'hôtel sont tracés dans le graphique 36 ; la distinction est faite sur ce graphique pour chacune des familles. L'énergie dégagée par la famille A est négligeable par rapport à celle des autres cas. C'est quasiment uniquement l'énergie amenée par le brûleur car il n'y a pas de propagation à la surface du matelas et, par conséquent, aucune autre source de production d'énergie. Pour les deux autres familles, les valeurs de l'énergie sont de l'ordre de 760 MJ ± 15 %. Une telle variation pourrait amener à conclure que, même lorsqu'il y a propagation du foyer, l'énergie dégagée est très dépendante de la taille de maille. Cependant, il faut garder en tête que FDS adapte au maillage les dimensions de ses obstructions solides et la matière combustible qui y est contenue conditionne l'énergie qui sera dégagée. Une obstruction solide de 1,04 m est maillée par 10 cellules de 10 cm : il ne mesure donc plus que 1 m dans le calcul. Ainsi, le lit a par exemple, pour les deux configurations extrêmes, soit un volume de 0,47 m^3 (760 MJ – 12 %) soit de 0,60 m^3 (760 + 15 %) : il n'est pas possible de définir dans FDS un matelas de dimensions identiques avec des cellules de 8 et de 5,56 cm. En conclusion, lorsque la puissance du brûleur est suffisante pour qu'il y ait propagation, l'énergie est très peu dépendante de la taille maille ; dans ce cas fictif de la chambre d'hôtel, il y a propagation lorsque des mailles de 0,1 m sont utilisées, ce qui équivaut à un R^* de 0,08.

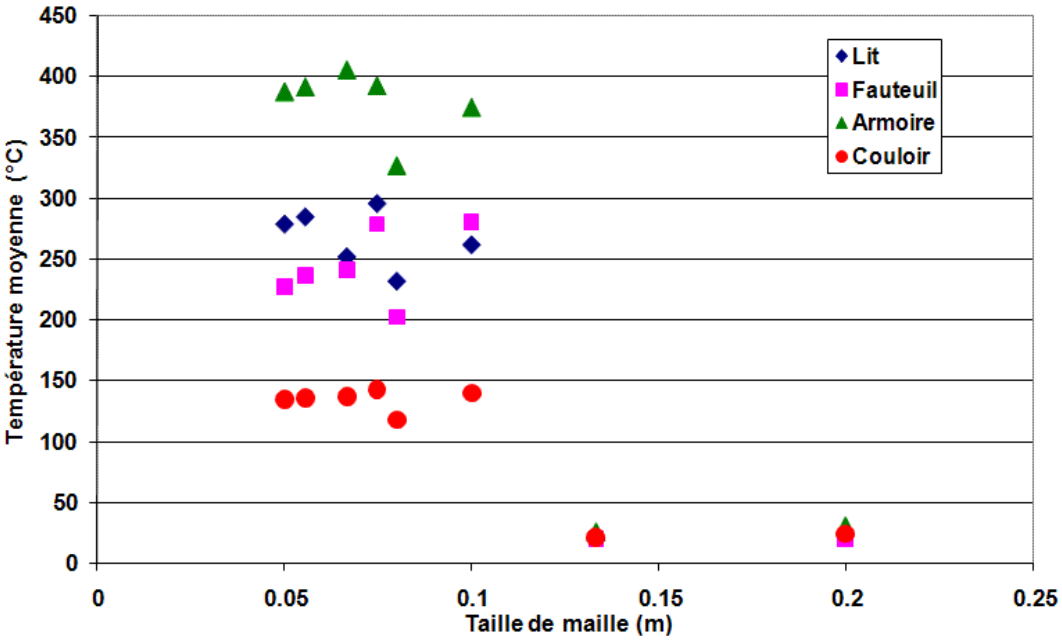
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



36. *Energie totale dégagée en fonction de la taille de maille*

3.3.2.2.5 Sensibilité de la température à la taille de maille

Les températures atteintes aux quatre points de mesure présentés sont maintenant étudiées. La famille A n'est pas prise en compte car, comme il n'y a pas propagation à partir du brûleur, les températures atteintes dans ces simulations sont négligeables par rapport aux cas ayant une propagation. En moyennant les températures en chaque point de mesure entre le début du calcul et 1000 s, il est possible de comparer les configurations. En se focalisant uniquement sur ces valeurs, une convergence des résultats en fonction de la taille de maille est atteinte dès qu'un R^* inférieur à 0,067 est utilisé (cf. graphique 37), ce qui correspond à des cellules de 0,074 m pour cette puissance de feu. Ce critère sur le R^* coïncide avec l'ensemble des cas de la famille C. Il aurait été intéressant de confirmer ces résultats avec une dernière simulation au maillage encore plus fin dont le R^* serait de l'ordre de 0,03 mais cela nécessiterait plus de puissance de calcul que celle disponible.

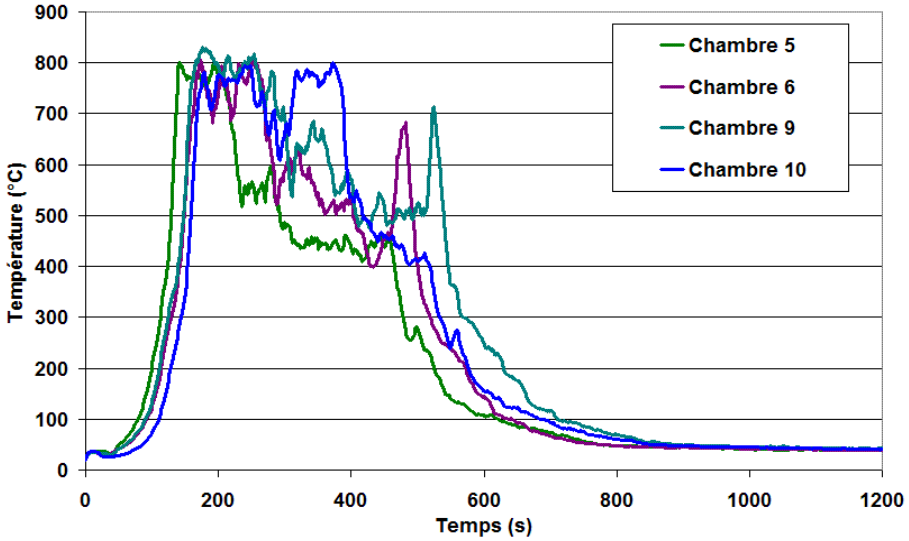


37. *Température moyenne entre 0 et 1000 s en fonction de la taille de maille aux quatre points de mesure*

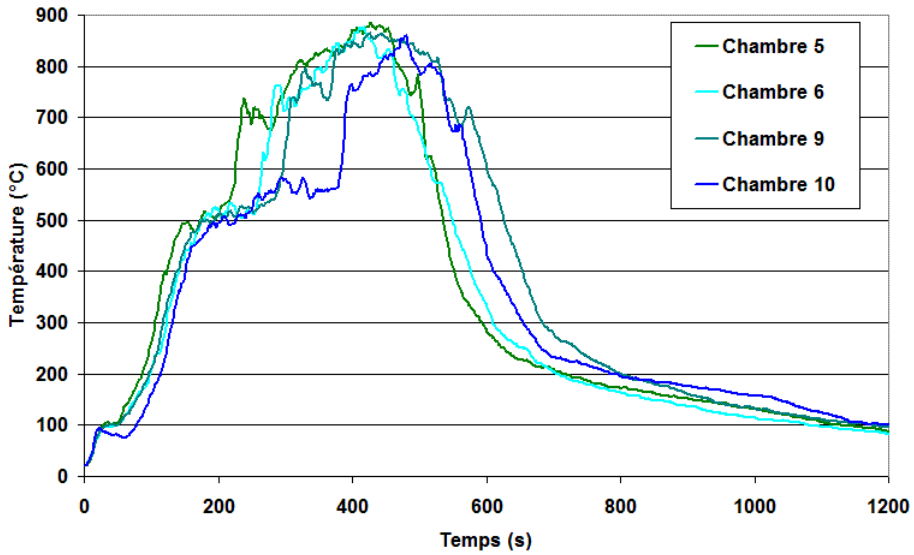
Cependant, à l'intérieur même de la famille C, des différences entre les évolutions temporelles des températures sont observables et en particulier pour les points de mesure du lit, de l'armoire et du fauteuil. Mis à part un léger décalage temporel, les valeurs atteintes, de l'allumage jusqu'à la fin de la

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

phase de croissance à 200 s, sont équivalentes pour les quatre configurations de maillages (cf. graphique 38, 39, 40 et 41) ; ces deux cents premières secondes sont le temps que met le foyer pour se propager de la tête du lit à l'ensemble du matelas à partir du brûleur. L'évolution des températures varie ensuite d'un cas à un autre en fonction de l'inflammation des foyers secondaires : la chaise et l'armoire s'enflamment plus ou moins vite, sans qu'une relation directe à la taille de maille ne soit établie. L'instant où la décroissance du foyer commence, est également très variable d'une simulation à l'autre, même au sein d'une même famille. Au léger écart de temps à l'allumage, il faut rajouter les différences de temps de combustion dues à la quantité de matière à brûler déjà évoquées précédemment, causées par l'adaptation au maillage des parois solide de FDS.

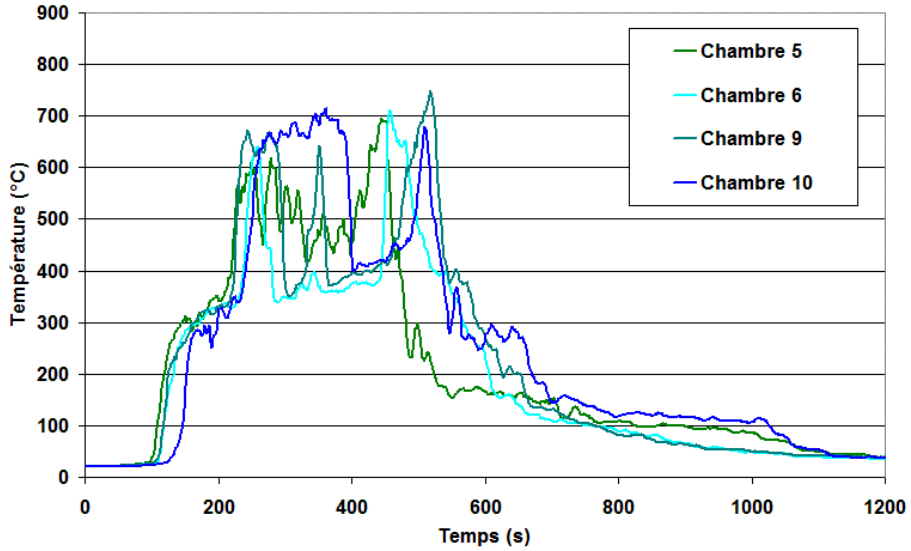


38. *Température au-dessus du lit pour la famille C*

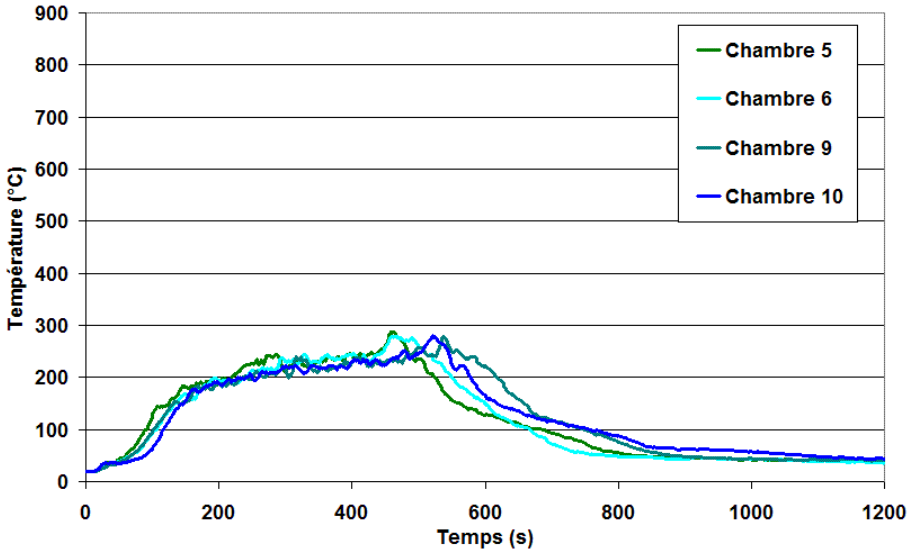


39. *Température au-dessus de l'armoire pour la famille C*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



40. *Température au-dessus du fauteuil pour la famille C*



41. *Température dans le couloir pour la famille C*

Ces différences sont lissées dans le couloir où les températures maximales atteintes sont environ trois fois inférieures avec 300 °C dans le couloir pour 900 °C au-dessus du lit. De plus, les points de mesure au-dessus du lit, de l'armoire et du fauteuil sont certainement disposés trop près des éléments combustibles ; en effet, ils sont par moment situés dans la partie intermittente des flammes et cela explique les fluctuations importantes en fonction du temps sur un même point de mesure. Enfin, une erreur est faite par FDS sur le calcul des températures de flamme [MA 2003].

Il est donc mieux, et cela semble logique, d'éviter de placer un point de mesure à proximité immédiate d'un élément qui se consume. En effet, pour ce type de point de mesure, ce qui importe le plus est de savoir si, dans la simulation, l'élément brûle où non, pour pouvoir ensuite comparer cet état avec les constatations réelles. Il est de ce fait moins important de savoir quelle est la température maximale qu'il atteint.

Ces conclusions présentées pour la température sont identiques pour de nombreux scalaires comme la densité de suie ou la fraction de mélange.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.2.2.6 Impact de la taille de maille sur le temps de calcul

L'amélioration d'un maillage en multipliant le nombre de cellules se fait au détriment du temps de calcul qui augmente environ seize fois lorsque la taille de cellule est divisée par deux (cf. tableau 42). Pour avoir des temps de calculs raisonnables tout en s'assurant de garder des résultats de qualités, il est donc important de trouver un critère limite à partir duquel l'amélioration des résultats en affinant un maillage n'est plus rentable par rapport au surcoût du temps machine. Bien évidemment, la définition du temps de calcul raisonnable est très subjective. Il est déjà fonction de la puissance de calcul disponible ; toutes ces simulations ont été réalisées sur une station de travail biprocesseurs de 3,6 GHz avec 3,25 Go de RAM. Il dépend également de la finalité des simulations ; lorsqu'elles sont menées dans le but de valider des scénarios d'incendie, la démarche ne s'inscrit pas, en général, dans une situation d'urgence. Dans le cas fictif de la chambre d'hôtel présenté dans ce paragraphe ayant une surface au sol de 21 m^2 environ, et très peu de charge calorifique, trois jours de calculs paraissent être un maximum ; cela correspond approximativement au cas de la Chambre 10 ayant un R^* de 0,061.

Nom du cas	Temps	R^*
Chambre 31	8 min	0,164
Chambre 7	43 min	0,111
Chambre 41	13 h 30	0,083
Chambre 8	1 j 2 h	0,067
Chambre 10	2 j 21 h	0,061
Chambre 5	2 j 16 h	0,055
Chambre 9	5 j 8 h	0,046
Chambre 6	7 j 23 h	0,042

42. *Temps de calcul pour toutes les configurations de la chambre d'hôtel*

3.3.2.2.7 Étude de sensibilité de la propagation du foyer en fonction de la puissance du brûleur initiant la combustion

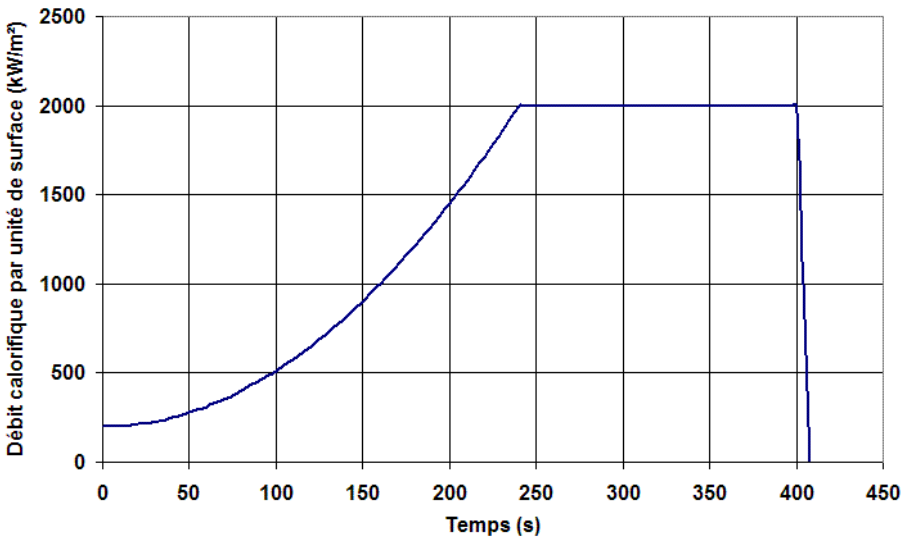
Dans les simulations, la source d'allumage est généralement représentée, pour des raisons de simplicité, par un brûleur au débit calorifique imposé sur une surface donnée (en moyenne de l'ordre de 0,049 m^2 dans ce paragraphe donc légèrement supérieur à celui des paragraphes précédents). Cependant, ce brûleur n'est pas toujours très représentatif de l'ensemble de sources d'allumage potentielles. Il s'accompagne par exemple toujours de flammes ainsi que d'un dégagement de fumées ; il n'est donc pas caractéristique d'un allumage par une cigarette pour laquelle la combustion se fait de façon incandescente. De plus, les simulations précédentes ont été faites avec un brûleur d'une valeur de 200 kW, ce qui peut paraître élevé. Il faut noter que, dans la réalité, la puissance de la source d'allumage est variable ; par conséquent, dans des conditions correctement ventilées, une cigarette qui se consume dégage moins d'énergie que la combustion consécutive à l'inflammation du déversement d'un jerrican d'essence. Pour rappel, une cigarette a un débit calorifique de 5 W lorsqu'elle se consume et une corbeille à papier 100 kW. Il est donc important d'étudier, pour les simulations, l'influence de la puissance du brûleur sur le déroulement de l'incendie et les conditions thermiques atteintes. Il faut rappeler que le choix de la puissance d'allumage est fonction de la taille des mailles comme cela a été vu au paragraphe *3.3.2.2.2.*

Le domaine de calcul est maillé uniformément avec des cellules de 7,4 cm, ce qui correspond, lorsqu'il y a propagation des flammes, à un R^* de 0,061 ; cette taille de cellule ne change pas sur l'ensemble de l'étude de sensibilité. Pour le brûleur, huit débits calorifiques surfaciques constants compris dès l'instant initial entre 500 et 5 000 $kW.m^{-2}$ sont successivement imposés pendant 100 s (cf. tableau 43). La surface du brûleur mesure 0,22 x 0,22 m^2. Pour un neuvième cas appelé brûleur 0, le débit calorifique surfacique augmente jusqu'à la valeur de 2 000 $kW.m^{-2}$ selon une courbe en $\alpha_c t^2$ (voir le graphique 44).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Nom du cas	Débit calorifique surfacique imposé au brûleur ($kW.m^{-2}$)	Débit calorifique imposé au brûleur (kW)
Brûleur 0	2 000 (avec augmentation en $\alpha_c t^2$)	70
Brûleur 1	5 000	175
Brûleur 3	2 500	85
Brûleur 4	1 500	50
Brûleur 5	1 000	35
Brûleur 7	875	30
Brûleur 8	812,5	28
Brûleur 6	750	26
Brûleur 2	500	17

43. *Débit calorifique surfacique imposé au brûleur pendant les 100 premières secondes de la simulation pour les cas brûleur 1 à 8 et pour les 400 premières secondes pour brûleur 0*



44. *Débit calorifique surfacique imposé au cas brûleur 0*

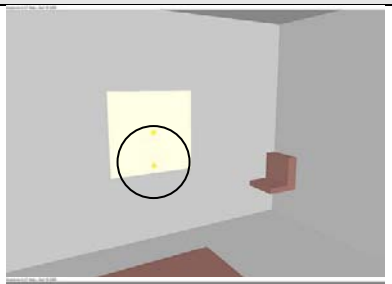
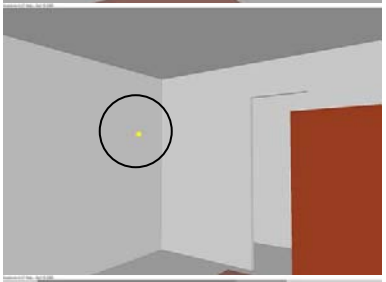
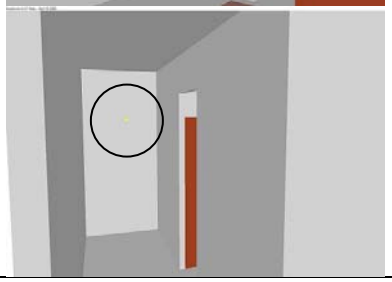
Par rapport au cas de référence présenté au paragraphe 3.3.2.2, l'emplacement des points de mesure est modifié. Ils sont dorénavant disposés près de la fenêtre, et avant et après la porte séparant le couloir et la chambre (voir le tableau 45).

La valeur minimale du débit calorifique surfacique pour qu'il y ait propagation sur la surface du lit est de 875 $kW.m^{-2}$, ce qui correspond à 30 kW pour le brûleur d'allumage utilisé. Ce débit calorifique minimal nécessaire pour propager les flammes à la surface du matelas est très largement supérieur à celui d'une cigarette. Ceci peut apparaître comme une limite importante dans la reconstitution numérique des scénarios d'incendie. En effet, il n'est pas possible de prétendre simuler les premiers instants de l'incendie (les quelques premières dizaines secondes), mais plutôt ceux qui suivent la propagation à partir de la source de faible puissance : la cigarette communique le feu au matelas et la simulation commence lorsque la combustion dégage 30 kW. De plus, la modélisation utilisée pour l'investigation n'aura jamais pas pour but de vérifier l'hypothèse d'inflammabilité du foyer primaire. Les modèles ne sont pas adaptés pour le faire et l'investigateur se basera plutôt sur des essais, des études statistiques ou bibliographiques pour justifier son scénario d'allumage.

Dans le tableau 46 sont récapitulées les énergies dégagées pour chaque simulation. L'énergie dégagée par les matériaux qui brûlent correspond à l'énergie totale dégagée dans le domaine de calcul à laquelle est soustraite l'énergie amenée par le brûleur. Comme la puissance du brûleur change d'un calcul à l'autre, la comparaison est biaisée sans cette correction. Les cas brûleur 2, 6 et 8 pour lesquels il n'y a pas eu de propagation se distinguent car l'énergie dégagée par les matériaux qui brûlent ne dépasse jamais les 800 kJ, ce qui est cent fois inférieur aux autres calculs. Lorsqu'il y a

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

propagation, les valeurs sont très proches : le débit calorifique du brûleur n'a, dans cette configuration, pas d'influence sur l'énergie totale dégagée dans le domaine de calcul.

Nom du point de mesure	Coordonnées du point de mesure (X ; Y ; Z)	Visualisation du point de mesure
Fenêtre	(0,1 ; 2 ; 1)	
Chambre	(2,5 ; 3 ; 1.8)	
Couloir	(4,6 ; 1,2 ; 2)	

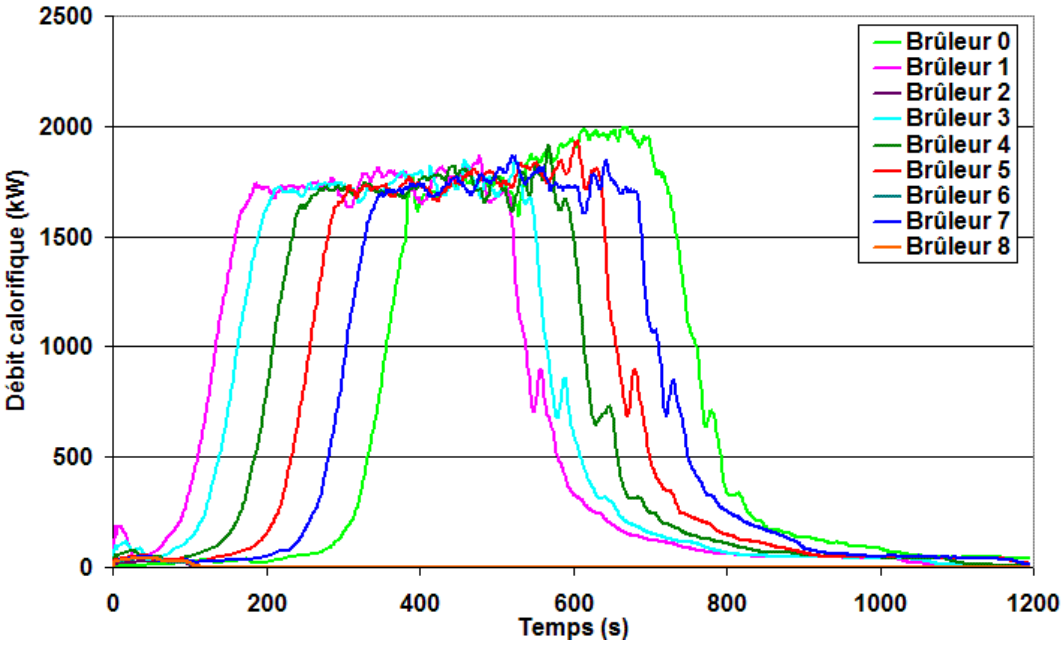
45. *Nom, coordonnées spatiales et visualisation des points de mesure disposés dans la chambre d'hôtel*

Nom du cas	Énergie totale dégagée (kJ)	Énergie dégagée par les matériaux qui brûlent (kJ)	Propagation au mobilier
Brûleur 0	808 680	795 985	Oui
Brûleur 1	793 100	775 850	Oui
Brûleur 3	792 200	783 575	Oui
Brûleur 4	794 800	789 625	Oui
Brûleur 5	799 700	796 250	Oui
Brûleur 7	795 500	792 480	Oui
Brûleur 8	3 460	660	Non
Brûleur 6	3 180	595	Non
Brûleur 2	2 460	735	Non

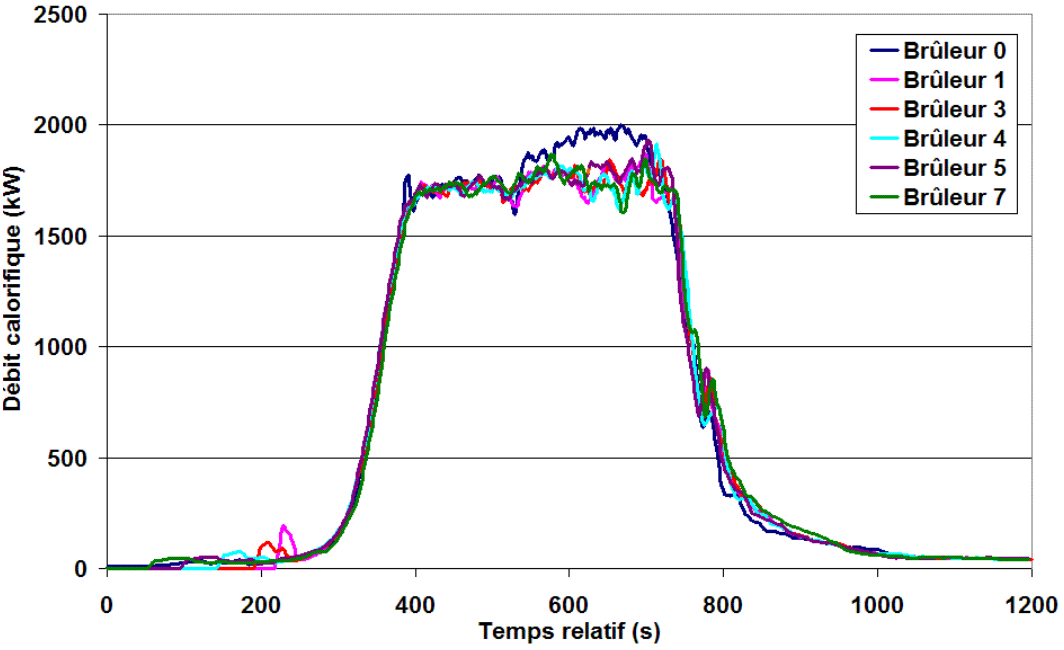
46. *Énergie dégagée et état de la propagation des flammes au mobilier*

Lorsqu'il y a propagation, l'allure générale des courbes de débit calorifique est identique d'un cas à l'autre. Elles sont caractérisées par un délai d'allumage, une courbe de croissance rapide, un plateau à 1 740 kW et une décroissance lorsque le combustible commence à manquer (voir le graphique 47). Selon la valeur du débit calorifique imposée au brûleur, le délai d'allumage est plus où moins élevé. En effet, sauf pour le cas brûleur 0 où une croissance en $\alpha_c t^2$ est utilisée, plus le débit calorifique du brûleur est élevé, plus ce délai est faible. En décalant les courbes des débits calorifiques des brûleurs 1, 3, 4, 5 et 7 respectivement de 221, 193, 145, 97 et 52 secondes, le graphique 48 est obtenu. Quelle que soit la puissance utilisée pour initier la propagation, il y a très peu de différences dans la phase de croissance puisque les courbes sont superposables sur les 450 premières secondes. Il en est de même pour la phase de décroissance après 730 s environ. Pour les valeurs des débits calorifiques atteints sur le palier, le cas brûleur 0 se démarque à partir de 540 s avec une surestimation de 12% par rapport aux autres cas.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



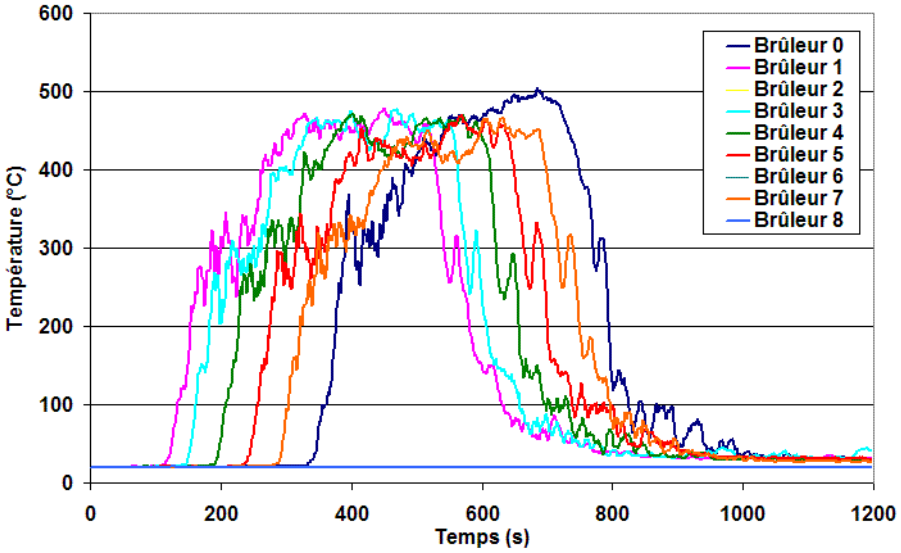
47. *Débits calorifiques des neuf cas simulés*



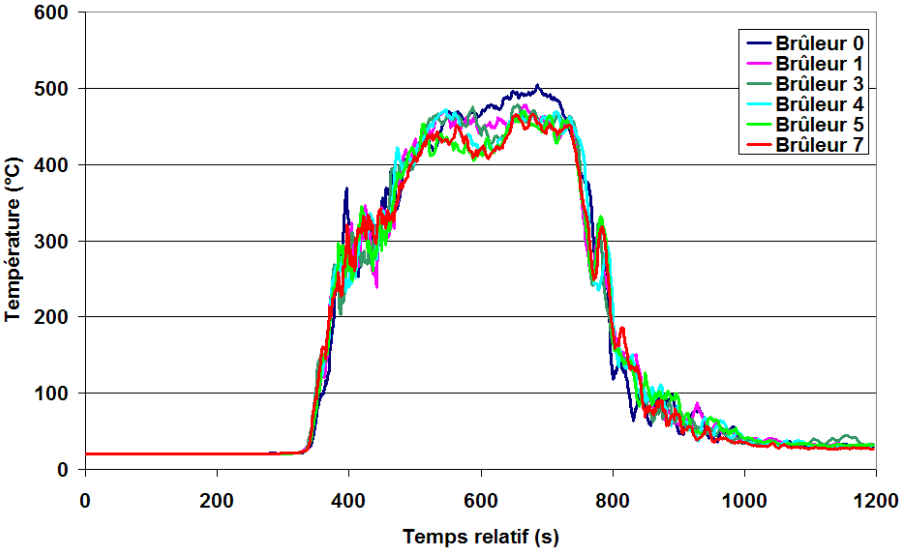
48. *Débits calorifiques recalés des six cas ayant une propagation*

Les mêmes observations que pour le débit calorifique sont faites sur les températures atteintes aux trois points de mesure. Les allures générales des courbes sont identiques et, en effectuant le même décalage temporel, elles sont toutes quasiment superposables. Seul le cas brûleur 0 se démarque légèrement entre 500 et 750 s au point de mesure près de la fenêtre avec une surestimation de la température d'une dizaine de degré environ ce qui correspond à un écart relatif négligeable de 1,5 %.

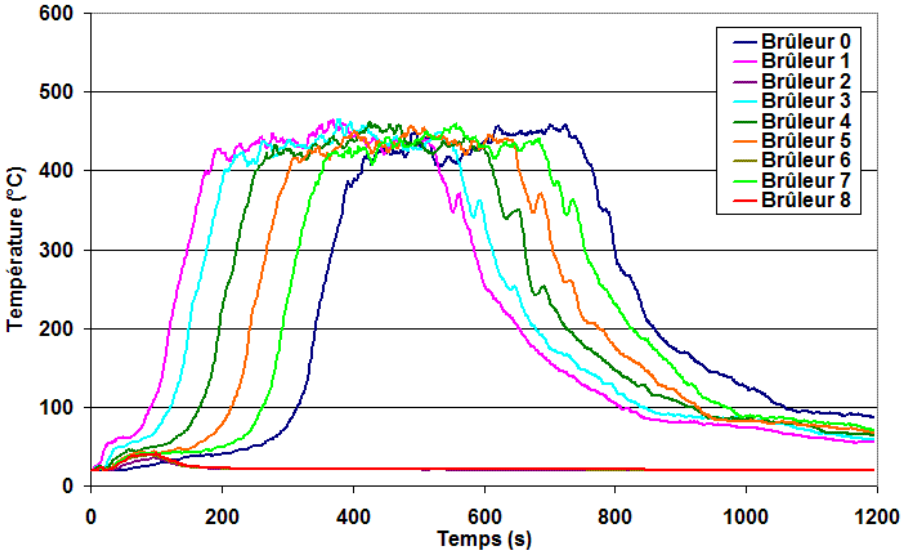
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



49. *Températures près de la fenêtre*

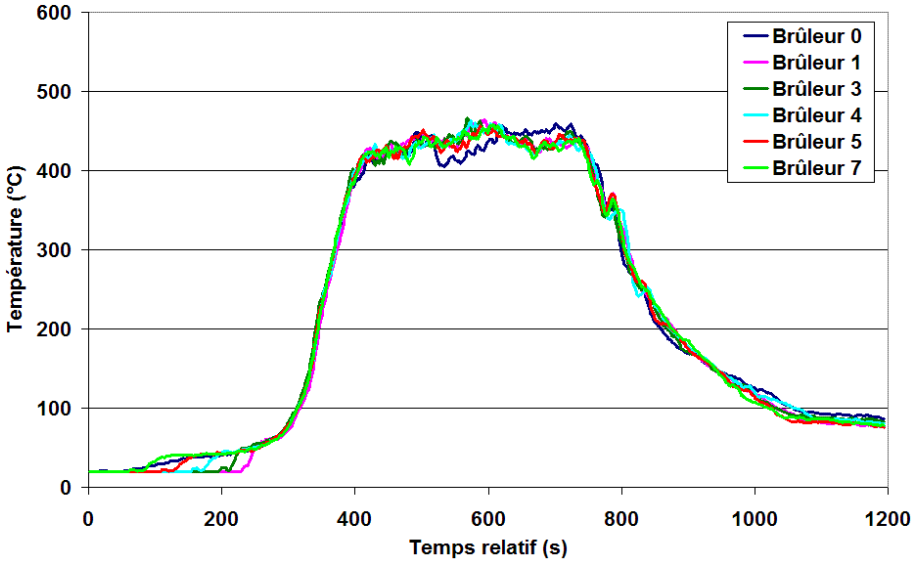


50. *Températures recalées près de la fenêtre*

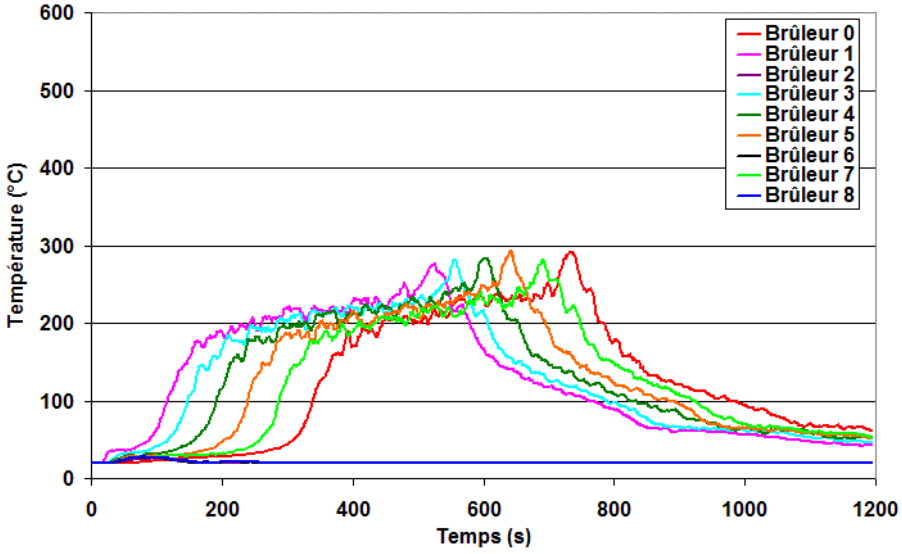


51. *Températures dans la chambre*

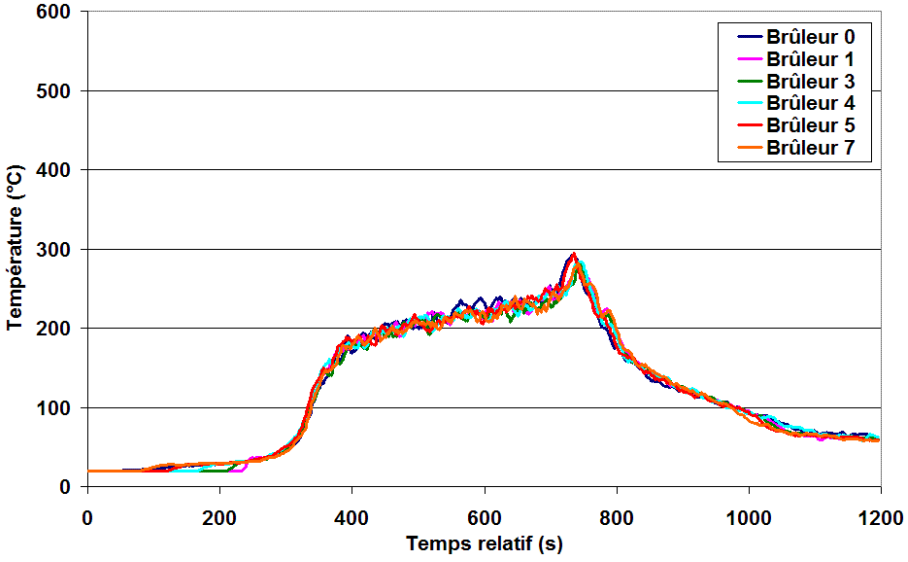
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



52. *Températures recalées dans la chambre*



53. *Températures dans le couloir*



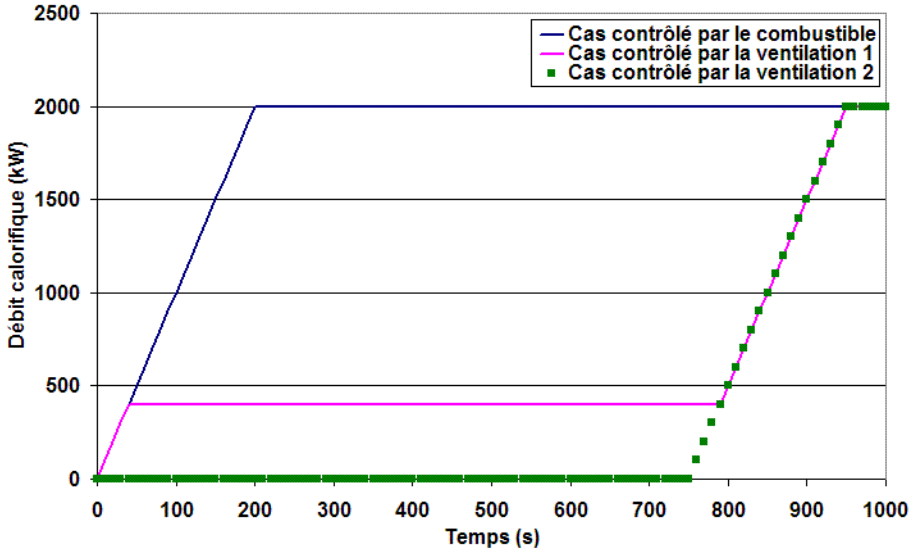
54. *Températures recalées dans le couloir*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.2.2.8 Conclusion sur l'influence de la puissance du brûleur d'allumage

Lorsqu'il y a propagation dans la chambre d'hôtel, la puissance imposée au brûleur d'allumage n'a pas d'influence notable sur l'énergie totale dégagée dans le domaine de calcul, le débit calorifique et la température. La seule influence est un décalage temporel dans l'évolution du feu, son développement étant d'autant plus rapide que le débit calorifique imposé au brûleur est élevé. Cela s'explique car la combustion est toujours contrôlée par le combustible (voir le chapitre 2). Dans le cas où elle est contrôlée par la ventilation, la puissance imposée au brûleur peut avoir plus d'influence sur le développement général de l'incendie. Cela est illustré par le graphique 55 sur lequel sont tracés les débits calorifiques de trois cas hypothétiques dont les valeurs numériques sont choisies de façon à illustrer le plus simplement le propos. Le premier débit calorifique, dont la combustion est contrôlée par le combustible, suit une croissance linéaire jusqu'à atteindre une valeur constante de 2 000 kW après 200 s. Cette valeur constante atteinte dépend de la surface des combustibles, de leur débit maximum de pyrolyse, etc.. Ainsi, lorsqu'à 800 s une amenée d'air caractéristique d'une ouverture de porte ou d'un bris de fenêtre se produit, cela n'a aucune influence sur la valeur constante du débit calorifique atteint. Ce n'est plus vérifié pour le cas 1 contrôlé par la ventilation. Après 40 s, le comburant vient à manquer et la quantité disponible ne permet plus de dégager que 400 kW. À 800 s, lorsqu'il y a une amenée d'air supplémentaire, le débit calorifique suit alors une croissance linéaire pour atteindre une valeur constante de 2 000 kW après 950 s. En considérant maintenant le même cas contrôlé par la ventilation mais dont la puissance imposée au brûleur utilisé pour initier la combustion serait inférieur, un décalage temporel du débit calorifique est alors observé. Ainsi, le délai d'allumage du débit calorifique du cas contrôlé par la ventilation 2 commence 750 s après le 1. À cause de l'amenée d'air supplémentaire à 800 s, cette configuration dont la combustion aurait du être contrôlée par la ventilation ne l'est plus.



55. *Exemple d'évolution temporelle de débit calorifique*

En conclusion, lorsque la temporalité d'évènements pouvant modifier le régime de combustion est connue, la puissance imposée au brûleur initiant la combustion est un paramètre pouvant avoir une influence non négligeable sur les simulations. Les conclusions dressées à la suite de la simulation de scénarios d'incendie sont alors potentiellement erronées si la puissance du brûleur est mal dimensionnée. Ainsi, lorsqu'un scénario est simulé, le débit calorifique minimal pour obtenir la propagation des flammes pour le maillage choisi est recherché. Cette valeur est utilisée pour les simulations si elle est supérieure à celle de la cause de l'incendie. Dans le cas où le débit calorifique de la cause de l'incendie est supérieur à la valeur minimale pour atteindre la propagation dans les simulations, la valeur réelle sera retenue ; cela peut être le cas lors de déversements d'accélérant par exemple.

Sur le cas test fictif de la chambre d'hôtel du paragraphe 3.3.2.2, un brûleur de 200 kW est choisi. Cette valeur peut paraître élevée pour simuler certaines sources d'allumage. Cependant, comme le feu est contrôlé par le combustible, diminuer ou augmenter cette valeur n'aurait qu'un effet sur le délai d'allumage, plus ou moins long, et non pas sur les températures atteintes, les débits calorifiques et

l'énergie dégagée par la combustion du mobilier. Les conclusions des paragraphes 3.3.2.2.3, 3.3.2.2.4 et 3.3.2.2.5 ne sont donc pas à remettre en cause si une puissance différente de 200 kW est utilisée.

3.3.2.2.9 Simulations dans la configuration porte de la chambre fermée

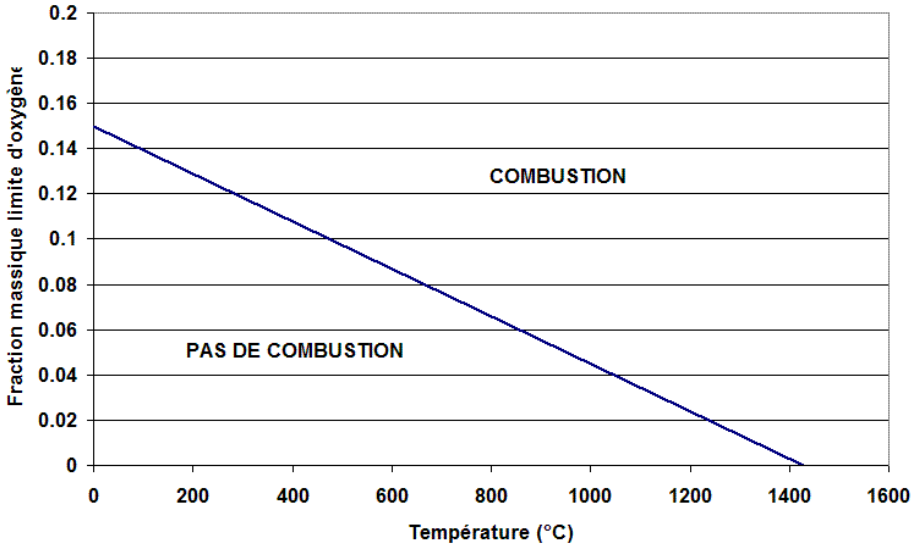
Le cas de la chambre d'hôtel présenté au paragraphe 3.3.2.2 est à nouveau étudié afin de vérifier que la physique élémentaire d'un incendie est respectée lors d'une simulation. Il est observé si, en maintenant la porte fermée entre la portion de couloir et la chambre, le feu s'éteint de lui-même lorsque l'oxygène n'est plus présent dans l'air en quantité suffisante pour maintenir une combustion avec flamme. Ainsi, il est attendu que le feu s'éteigne si la fraction volumique d'oxygène atteint une valeur limite inférieure ou si la température dans la pièce est insuffisante pour maintenir la combustion des matériaux. Pour cette étude, deux maillages différents sont utilisés. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 56. La Chambre 1 est considérée, pour les puissances de feu atteintes, comme maillée grossièrement alors que le maillage de la Chambre 2 est, au contraire, plus fin. Des stratégies de maillage « extrêmes » sont étudiées en ne considérant que ces deux cas. La puissance du brûleur d'allumage est de 80 kW ce qui correspond à une valeur moyenne parmi les cas étudiés précédemment.

Nom du cas	Grille	Taille d'une maille (m)	Nombre de mailles
Chambre 1	$60 \times 40 \times 30$	0,1	72 000
Chambre 2	$120 \times 80 \times 60$	0,05	576 000

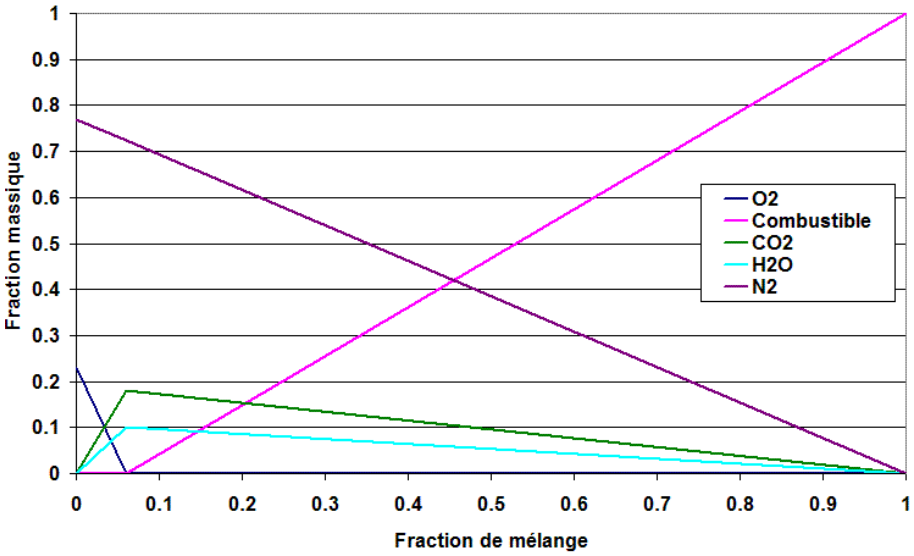
56. *Caractéristiques des maillages des cas Chambre 1 et Chambre 2*

Modéliser dans FDS la suppression d'un feu due à l'épuisement de l'oxygène dans le compartiment est difficile car les mécanismes physiques qui s'appliquent à ce phénomène s'exercent à des échelles de longueur plus petites que celles représentées par une cellule d'un maillage. Dans le code de calcul, les flammes s'éteignent à cause d'une diminution de la température et d'une dilution de l'oxygène apporté. Avec le modèle à fraction de mélange, seul l'effet de dilution est pris en compte car il est supposé que le combustible et l'oxygène brûlent sans se soucier de la température ; à partir du moment où de l'oxygène et du combustible sont mélangés, il y a combustion. Cependant, un algorithme simple de suppression a été implémenté dans FDS qui permet de juger si une flamme est viable ou non à proximité de la surface respectant la stœchiométrie de la fraction de mélange.
Le modèle simple de suppression de flamme qui est implémenté dans FDS marche de la façon suivante : la fraction de mélange continue à être utilisée pour suivre la progression du mélange du combustible avec l'air environnant mais, maintenant, le volume environnant est évalué pour déterminer s'il est ou non le lieu d'une réaction de combustion. C'est selon la droite tracée dans le graphique 57 que le modèle détermine les valeurs limites de température et de la fraction volumique en oxygène pour lesquelles la combustion a lieu ou non. Les valeurs fixées par défaut de 0,15 pour l'indice limite d'oxygène et de 1 427 °C pour la température critique de flamme sont conservées dans cette étude. Il est important de noter que lorsque l'environnement gazeux se trouve dans la zone dans laquelle la combustion n'est pas possible, la relation d'état du type de celle donnée dans le graphique 58 n'est plus valable pour les valeurs de Z en dessous de la stœchiométrie, car à ce moment là, le combustible peut être mélangé avec les autres produits de combustion.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



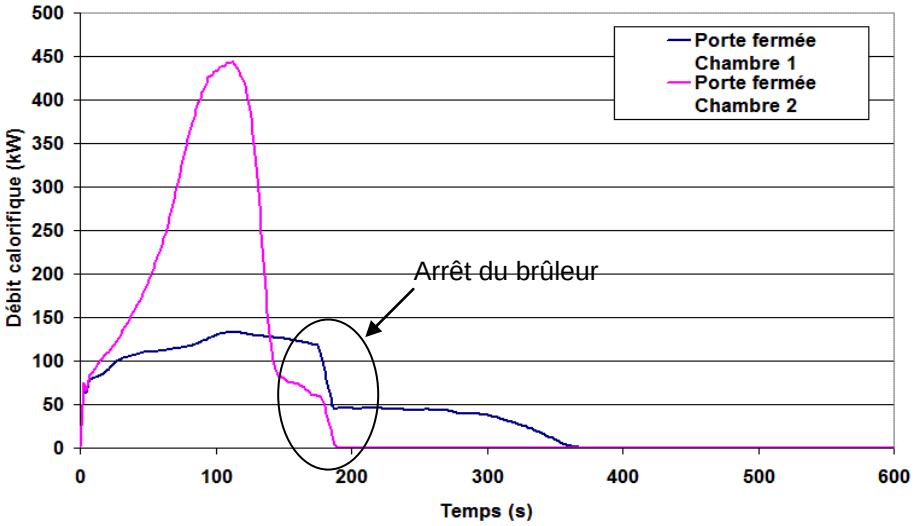
57. *Conditions de température et fraction volumique limite d'oxygène pour déterminer l'occurrence de la combustion*



58. *Relation d'état pour le propane*

Dans les deux simulations, le modèle de suppression de flamme fonctionne : le feu s'arrête de lui-même après environ 360 s pour la Chambre 1 utilisant des mailles de 10 cm et 190 s pour la Chambre 2 ayant des mailles de 5 cm. Avec la première simulation, le foyer reste très localisé à la tête du lit alors qu'avec la seconde, il se propage pendant les cent premières secondes sur une surface beaucoup plus grande. Les flammes atteignent d'ailleurs largement le plafond pour la Chambre 2 ce qui n'est jamais le cas avec l'autre maillage. Par conséquent, dans la Chambre 2, la consommation de l'oxygène présent dans la pièce est beaucoup plus rapide et l'extinction du feu se produit ainsi plus tôt que dans la simulation de la Chambre 1. Cela est illustré par le débit calorifique dégagé dans le domaine de calcul (cf. graphique 59) qui dépend de la quantité de combustible et de comburant disponible, le second étant le facteur limitant dans ce cas. Ces différences observées dans les résultats entre les deux simulations sont uniquement dues aux effets de l'influence de la taille de maille sur la propagation du foyer sur la dynamique de l'incendie.
Par retour d'expérience, le cas Chambre 2 semble plus réaliste car, dans la configuration d'un feu de matelas dans un local clos de petit volume, d'importantes dégradations dues à une forte sollicitation thermique à la verticale du combustible sont en général visibles.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

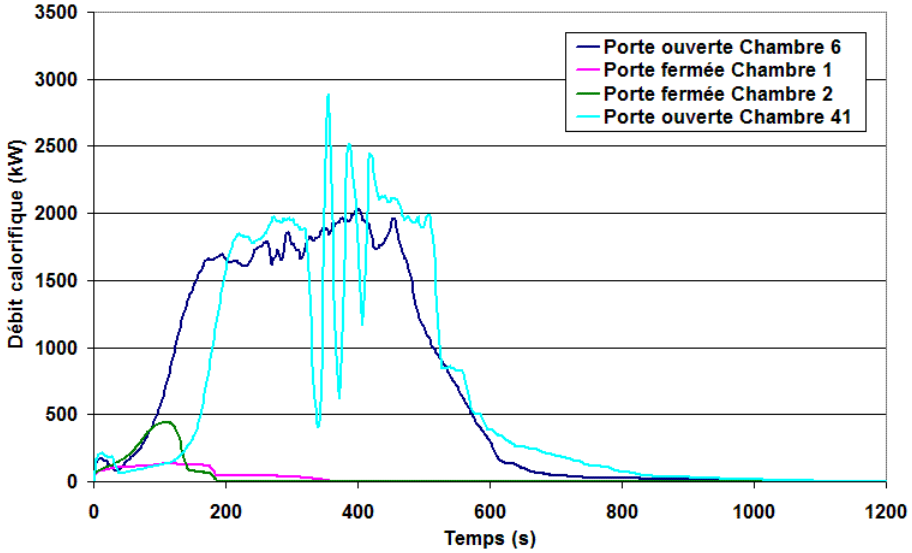


59. *Débit calorifique en fonction du temps pour les simulations porte fermée – Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et de 5 cm pour Chambre 2*

Les brusques coupures observées à 180 secondes dans les courbes de débit calorifiques des cas Chambre 1 et Chambre 2 indiquées par le cercle dans le graphique 59 coïncident au temps d'arrêt du brûleur servant à initier le feu. Pour les deux cas, le brûleur de forme cubique dégage 20 kW sur quatre de ses faces. La chute de débit thermique au retrait du brûleur pour les deux cas étudiés est de cet ordre : 75 kW pour Chambre1 et 70 kW pour Chambre 2. L'ensemble de l'oxygène nécessaire à la combustion a été consommé dans les 180 premières secondes de la Chambre 2, c'est pourquoi le débit calorifique devient nul quelques secondes après que le brûleur soit retiré. La propagation ayant été moins importante pour la Chambre 1, moins d'oxygène a été consommé dans les premiers instants c'est pourquoi la combustion se poursuit encore quelques secondes avant de disparaître lentement. La Chambre 1 libère environ 27 MJ c'est-à-dire environ moins de 30% que les 40 MJ de la Chambre 2. Quelle que soit la taille de maille utilisée, ces deux exemples montrent que l'algorithme de suppression de flamme fonctionne. Il n'est pas jugé dans ce paragraphe de la validité du temps auquel la combustion est supprimée, seule son occurrence est étudiée. Il est considéré que la combustion cesse lorsque le débit calorifique est nul sur le graphique 59. Le temps auquel la combustion cesse est différent d'un cas à l'autre, mais ceci est une conséquence de la propagation du foyer sur la surface du matelas qui est dépendante de la taille de maille utilisée.

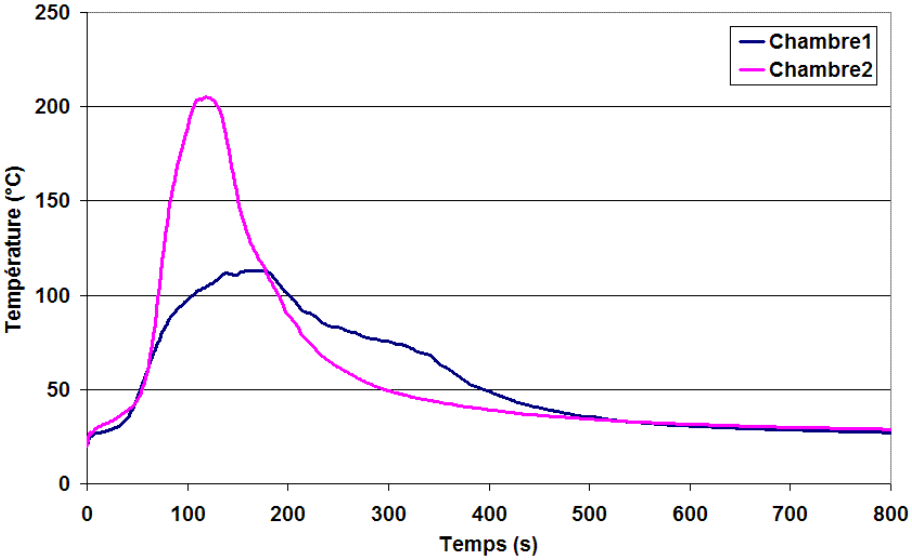
Sur le graphique 60 ont été reportées les valeurs du débit calorifique obtenues avec la porte fermée et la porte ouverte pour deux tailles de cellules différentes. Comme cela a été détaillé dans les paragraphes précédents, il existe, pour les valeurs obtenues porte ouverte, un décalage temporel d'une soixantaine de secondes du début de la propagation sur la surface du matelas ce qui se traduit par une augmentation du débit calorifique qui se stabilise par la suite lorsque le foyer est pleinement développé. Sur les cents premières secondes de la simulation, les débits calorifiques (cf. graphique 60) sont identiques pour les deux tailles de mailles utilisées et pour les deux positions de porte, ouverte ou fermée. Par conséquent, l'amenée d'air dans la chambre par la porte n'a donc que peu d'influence pour les premiers instants du développement du feu et en particulier sur la pyrolyse du matériau constituant le matelas.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



60. *Débit calorifique pour les simulations en configuration porte ouverte et fermé - Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et 41 et de 5 cm pour Chambre 2 et 6*

Les températures au-dessus du lit sont tracées dans le graphique 61. Les différences entre les cas Chambre 1 et 2 sont légèrement lissées en comparaison des débits calorifiques. Un écart de 35 % existe entre les deux calculs, le maillage le plus fin surestimant la température de 90 °C par rapport à l'autre configuration.



61. *Température au-dessus du lit en fonction du temps pour les simulations porte fermée – Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et de 5 cm pour Chambre 2*

3.3.2.2.10 Conclusion : valeur optimale du R pour le cas d'un feu dans une chambre d'hôtel*

Des simulations ont été effectuées dans ce paragraphe sur le cas fictif d'un incendie dans une chambre d'hôtel. Il a été observé que, quelle que soit la taille de maille utilisée, l'algorithme de suppression des flammes fonctionne : la combustion cesse par manque de comburant. Cette conclusion est uniquement qualitative car il n'y a eu aucune comparaison effectuée avec des résultats expérimentaux. L'étude menée sur la chambre d'hôtel et les recherches bibliographiques mettent en avant un impact de la taille de maille sur la dynamique de l'écoulement. En effet, plus un maillage est fin, plus les structures d'écoulement sont reproduites en détails. Cependant, cette amélioration n'est pas toujours perceptible sur des quantités physiques telles que la température. Il est important de déterminer à partir de quelle taille de maille le raffinement n'apporte plus assez de bénéfices par rapport au temps de calcul supplémentaire. Pour aider à cette optimisation, l'étude bibliographique a

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

montré l'importance du nombre adimensionné R^*. La valeur de 0,07 a été avancée [BOUNAGUI 2003]. À partir des résultats obtenus sur les simulations de la chambre d'hôtel, une valeur quasiment équivalente a été trouvée, c'est-à-dire inférieure à 0,067 (Voir les résultats pour la chambre 8 reportés dans le tableau 31).

Cependant, l'une des faiblesses de la présente démarche est que les résultats des simulations de la chambre d'hôtel ne sont jamais comparés à des résultats expérimentaux. Une convergence des résultats en fonction de la taille de maille est atteinte lorsqu'un R^* inférieur à 0,067 est utilisé, mais quelle est la validité de ces simulations par rapport au cas réel ? C'est pourquoi il a été décidé d'effectuer de nouvelles simulations qui seront soient comparées à des corrélations dont le domaine de validité est connu, soit à des résultats expérimentaux. Le choix des expériences à simuler par la suite s'est fait dans l'optique de valider certains aspects du code comme la hauteur et la température de flamme, la température et la vitesse dans le panache ou encore dans le jet sous plafond. Ces travaux de thèse sont réalisés dans le but d'étudier les premiers instants de l'incendie. Cela correspond à la phase pendant laquelle le foyer est en général en plein développement. Un panache au-dessus de l'origine de l'incendie se forme. Des flammes apparaissent et leurs hauteurs augmentent en même temps que le foyer se propage. Et enfin, avant que le volume ne soit envahi par les fumées, un jet sous plafond se constitue lorsque les fumées du panache impactent le plafond. L'écoulement se comporte ensuite comme un écoulement confiné. Il semble donc important que FDS reproduise correctement les phénomènes prépondérants lors de ces premiers instants : ceci justifie le choix des cas de validation présentés dans les paragraphes qui suivent.

3.3.3 Modélisation des hauteurs et des températures de flamme

La hauteur de flamme [CURTAT 2002] est la position verticale du point au-dessus duquel il n'y a plus de réactions de combustion. Dans le cadre de nos études, c'est à dire pour des sources de diamètre supérieur à 10 cm environ, les régimes de la flamme sont toujours turbulents (cf. chapitre 2). Cela se traduit, entre autre, par une forte variation de la hauteur de flamme due à des instabilités et des fluctuations périodiques ou à la non homogénéité du combustible (fissures, percements, …) qui engendre une irrégularité éventuelle dans l'apport de combustible. Une hauteur de flamme est donc une quantité qui n'est pas définissable de façon unique. Il existe d'ailleurs plusieurs approches pour les mesurer en estimant soit une moyenne temporelle de la hauteur appréciée par l'œil d'une personne, soit une hauteur limite stable ou encore la hauteur limite d'intermittence.

D'un point de vue numérique, il est important de modéliser correctement les hauteurs de flamme car de nombreux paramètres calculés dépendent de cette flamme tels que le rayonnement, l'énergie dégagée par la combustion, etc.. Une bonne simulation des écoulements dans le panache inerte après la zone de flamme, le jet sous plafond et le reste du domaine de calcul débutent donc par un calcul correct de cette zone de flamme. De plus, d'un point de vue investigation, il est intéressant de parfaitement caractériser numériquement les flammes pour savoir par exemple si elles sont susceptibles d'impacter un plafond pour le scénario considéré. Par ailleurs, les températures maximales sont atteintes au sein des zones de flamme lors d'un incendie. C'est pourquoi il est primordial de les simuler correctement de façon à pouvoir lier les dégradations constatées lors d'une investigation post incendie aux résultats calculés par FDS.

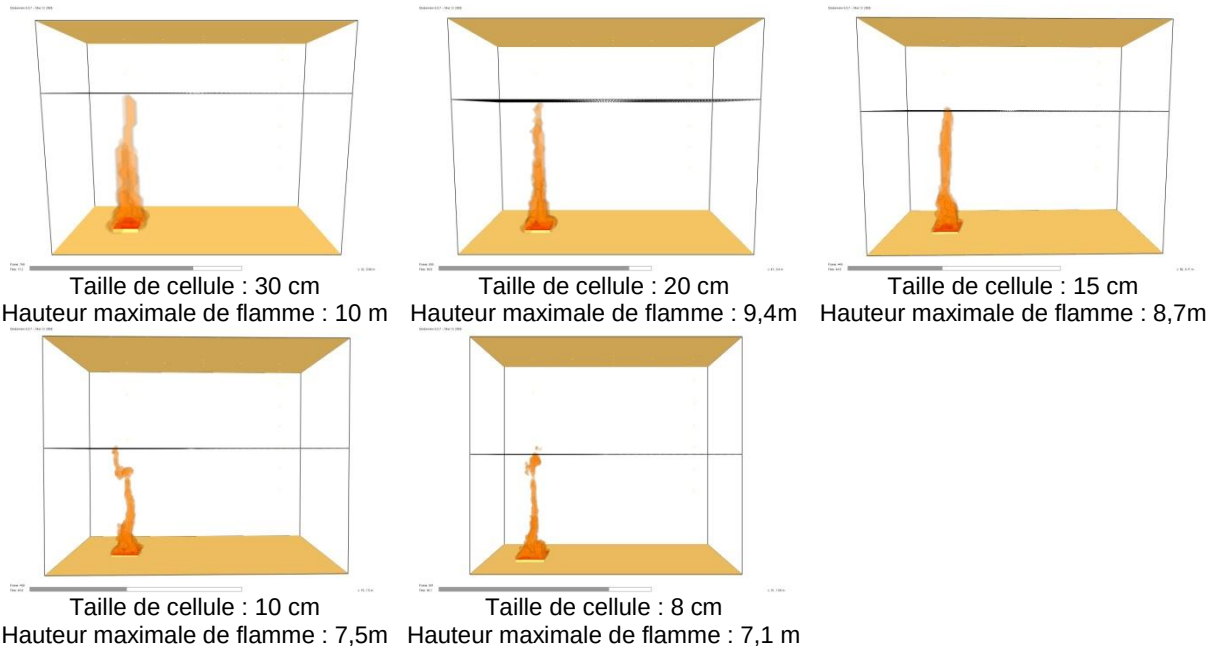
L'ensemble de ce paragraphe ne s'intéresse qu'à des flammes libres dont le débit calorifique est contrôlé par le combustible. En aucun cas, le feu devient sous-ventilé ou contrôlé par la ventilation.

3.3.3.1 Aperçu de la problématique

Les figures 62 montrent les hauteurs maximales de flamme d'un foyer de 3 650 kW débitant sous un plafond de 14 m, le volume étant ouvert sur ses quatre faces latérales. Dans ces figures sont tracés les débits calorifiques par unité de volume. Les surfaces colorées en orange sont les cellules dans lesquelles plus de 100 $kW.m^{-3}$ sont dégagés. Les hauteurs de flammes indiquées pour ces figures correspondent à la hauteur maximale au-dessus du foyer où un débit calorifique par unité de volume supérieur à 100 $kW.m^{-3}$ est dégagé. Cette approximation de la hauteur maximale de flamme permet d'observer, en fonction de la taille de cellule, une très forte disparité entre les hauteurs maximales de flamme. En effet, pour le maillage le plus fin, la hauteur de flamme maximale est près de 3 m inférieure à celle obtenue avec un maillage grossier. L'intérêt de ce paragraphe est donc de définir un

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

critère de maillage assurant une résolution spatiale suffisante pour reproduire correctement les hauteurs et les températures de flamme.



Taille de cellule : 30 cm
Hauteur maximale de flamme : 10 m

Taille de cellule : 20 cm
Hauteur maximale de flamme : 9,4m

Taille de cellule : 15 cm
Hauteur maximale de flamme : 8,7m

Taille de cellule : 10 cm
Hauteur maximale de flamme : 7,5m

Taille de cellule : 8 cm
Hauteur maximale de flamme : 7,1 m

62. *Débit calorifique par unité de volume supérieur à 100 kW.m^{-3} - Hauteur maximale de flamme avec cinq simulations utilisant des tailles de maille différentes*

3.3.3.2 Étude bibliographique sur les hauteurs de flamme

3.3.3.2.1 Corrélations d'Heskestad

De nombreuses corrélations existent pour évaluer une hauteur de flamme libre. La hauteur de flamme moyenne est souvent définie à partir de l'intermittence *I(z)* à une distance *z* au-dessus d'une source. *I(z)* est la fraction de temps pendant laquelle il y a au moins une partie de la flamme qui est située au-dessus de la hauteur *z*. L'intermittence vaut 1 dans la région où la luminosité des flammes est toujours visible et diminue dans la région de flamme intermittente jusqu'à devenir nulle dans le panache inerte. La hauteur moyenne de flamme est alors définie comme la distance au-dessus de la source où l'intermittence a décliné jusqu'à 0,5. Concrètement, il sera supposé que cette hauteur de flamme moyenne *L* correspond à la distance au-dessus du foyer à laquelle la combustion est achevée et où le panache inerte débute.

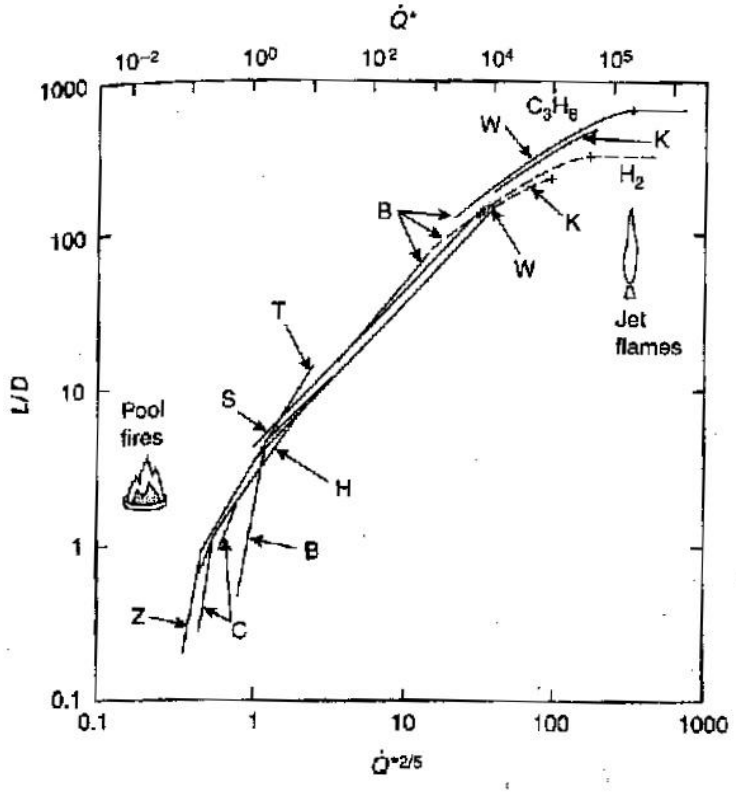
Quelques expressions de hauteur moyenne de flamme ont été compilées par McCaffrey [HESKESTAD 2002]. Il a tracé (cf. graphique 63) la hauteur de flamme normalisée *L/D*, en fonction du nombre adimensionné de $\dot{Q}^*$ dont la définition est rappelée dans l'équation (36). Les corrélations compilées sont celles de Becker et Liang [BECKER 1978], Cox et Chitty [COX 1985], Heskestad [HESKESTAD 1984], Kalghatgi [KALGHATGI 1984], Steward [STEWARD 1970], Thomas [THOMAS 1963], Hawthorne et al. [HAWTHORNE 1949], Zukoski [ZUKOSKI 1984].

$\dot{Q}^*$ est le nombre de Froude et il est défini par la relation (36).

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{gD} D^2} = \left(\frac{D^*}{D}\right)^{5/2} \quad (36).$$

Avec $\dot{Q}$ le débit calorifique total, ρ_∞ et T_∞ respectivement la masse volumique et la température ambiantes, c_p la chaleur spécifique à pression constante, *g* l'accélération de la gravité et *D* le diamètre du foyer.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



63. *Corrélations pour le calcul des hauteurs moyennes de flamme en fonction du nombre de Froude [HESKESTAD 2002]*

Des observations ont montré que la hauteur de flamme normalisée varie linéairement avec $\dot{Q}^{*2/5}$ sur une large gamme de valeurs de $\dot{Q}^*$, grossièrement comprises[9] entre 1 et 1000. Pour les plus grands feux, $\dot{Q}^*$ est inférieur à 2 [KARLSSON 2000]. Seule la partie gauche du graphique 63 est étudiée.

L'une des corrélations la plus utilisée est celle de Heskestad [HESKESTAD 2002], donnée par la relation (37).

$$L = -1{,}02D + 0{,}235\dot{Q}^{2/5} \qquad (37).$$

En effectuant quelques simplifications, elle s'écrit également pour la grandeur *L/D* selon la relation (38).

$$\frac{L}{D} = 3{,}7\dot{Q}^{*2/5} - 1{,}02 \qquad (38).$$

Elle donne de bons résultats sur l'ensemble des différents régimes du graphique 63, excepté pour le régime de jet de flamme qui ne sera jamais rencontré dans les investigations menées par le LCPP. Lors des essais menés pour établir les corrélations, les hauteurs de flamme ont été mesurées par traitement d'images collectées par photos et vidéos.

Ces corrélations sont valables pour les conditions atmosphériques normales (293 K, 1 bar). Si une de ces conditions n'est pas respectée, il faut alors revenir, pour déterminer la hauteur moyenne de flamme, à la relation (39) dont l'expression plus complexe utilise les caractéristiques de l'air et du matériau.

[9] Dans les conditions ambiantes, $\dot{Q}$ varie grossièrement entre 3 et 3 000 MW pour un foyer de 2 m de diamètre.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

(39). $$L = -1{,}02D + A_L \dot{Q}^{2/5} \text{ avec } A_L = 15{,}6\left[\frac{c_p T_\infty}{g\rho_\infty^2 \left(\Delta H_c / r_s\right)^3}\right]^{1/5}$$

c_P est la capacité thermique massique de l'air, T_∞ et ρ_∞ la température et la densité ambiantes, g la gravité, ΔH_C l'enthalpie de combustion et enfin r_s le rapport massique d'air sur le combustible à la stœchiométrie.

Les corrélations sont établies à partir de feux calibrés à base de combustibles gazeux simples (méthane, propane ou encore gaz naturel). Elles correspondent aux cas des flammes libres. Il existe aussi d'autres corrélations pour les cas des flammes se développant contre une paroi ou dans un angle. Ces corrélations sont établies pour des configurations très précises et donc, en toute rigueur, valables uniquement pour le cas par lequel elles sont établies. Elles ont donc un domaine d'utilisation restreint. La qualité des résultats ne pourra pas être assurée lors d'une utilisation des corrélations hors de ce domaine d'application ou trop éloignée de la configuration initiale.

3.3.3.2.2 Modélisation des hauteurs de flamme

Une première étude [MA 2003] réalisée avec FDS 2.0 a calculé la hauteur de flamme pour $\dot{Q}^*$ compris entre 0,1 et 10. Pour déterminer la hauteur de flamme à partir des calculs réalisés avec FDS, les auteurs moyennent sur 4 s les valeurs du débit calorifique par unité de volume. Ces valeurs sont ensuite intégrées dans le domaine de combustion au-dessus de la surface du brûleur ; un débit calorifique en fonction de la hauteur est ainsi obtenu. La hauteur où 99% du débit calorifique est atteint est considérée comme le sommet de la flamme. Cela équivaut à considérer qu'au-dessous de cette hauteur, 99% de la réaction chimique se produit. En utilisant cette méthode, c'est avec un R^* égal à 0,05 que les hauteurs de flamme simulées sont les plus proches des hauteurs maximales obtenues à l'aide de la corrélation de Zukoski. Si R^* est supérieur à cette valeur, la hauteur de flamme est sous-estimée ; elle est surestimée si R^* est inférieur. Ce R^* égal à 0,05 est beaucoup plus strict que la première valeur de 0,1 avancée dans la littérature pour la simulation du panache d'un foyer avec un modèle LES [BAUM 1997]. De plus, une difficulté apparaît pour l'utilisateur puisqu'il est ici également confronté à une borne inférieure de R^* à respecter.

Un effort de validation et de vérification a été entrepris pour cinq codes de calcul incendie dans le domaine des installations nucléaires [NUREG-1824 2007]. FDS 4 faisant partie de cette liste, la suite de ce paragraphe s'intéresse à la vérification et la validation des hauteurs de flamme proposées dans l'étude NUREG.

Deux critères sont utilisés pour caractériser la capacité des modèles à reproduire un phénomène physique. Le premier s'attache à vérifier que les modèles physiques sont appropriés pour que le calcul soit effectué. Le second vérifie s'il y a des erreurs relatives calculées supérieures aux incertitudes expérimentales et aux incertitudes des paramètres d'entrée du modèle.

Deux tests expérimentaux de la référence [NUREG-1824 2007] apportent des données susceptibles d'être comparées à des calculs FDS : l'ICFMP BE #2 et l'ICFMP BE #3.

Lors de ces deux séries de tests, la hauteur de flamme a été évaluée à l'aide d'observations visuelles, de photos ou de vidéos. Comme cela l'a été rappelé précédemment, il est difficile de mesurer précisément des hauteurs de flammes. Sur cette étude, l'erreur maximale effectuée dans l'évaluation des hauteurs de flamme à partir de photos ou de vidéos est d'approximativement 1 diamètre du foyer. Les hauteurs de flamme ont été évaluées dans FDS en traçant à l'aide de Smokeview soit le volume dans lequel l'énergie provenant de la combustion est dégagée (sans qu'une valeur seuil ne soit indiquée comme au §3.3.3.1), soit l'isosurface de la fraction de mélange à la stœchiométrie ($Z=Z_f$). La hauteur de flamme qui pourrait être appelée instantanée, est le sommet du volume dans lequel est dégagé l'énergie ou celui de l'iso-surface de fraction de mélange. Une moyenne sur l'axe vertical de cette hauteur de flamme instantanée donne la hauteur de flamme calculée par FDS.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

- Cas expérimental ICFMP BE #2

Cette campagne expérimentale a été menée dans le but d'étudier le mouvement des fumées dans un grand volume ayant un plafond en pente. Les caractéristiques de l'essai sont les suivantes :

- Le volume expérimental mesure 19 m de haut pour 27 m de long et 14 m de large
- 8 essais sont menés pour des puissances allant de 2 MW à 4 MW (Ce qui correspond à des R^* de 0,1 à 0,07 pour les maillages utilisés)
- Le foyer est disposé au centre du volume
- Le combustible utilisé est l'heptane
- Pour deux des cas, toutes les portes sont fermées et les uniques amenées d'air proviennent des fuites. Le dernier cas est réalisé avec les deux portes de 0,8 m de large par 4 m de haut ouvertes et la ventilation mécanique d'un débit de 11 $m^3.s^{-1}$ situé au plafond activée
- Les températures ont été mesurées en 2 points au-dessus des flammes.

Les hauteurs de flamme visibles sont obtenues en moyennant temporellement des hauteurs de flamme maximales instantanées. Elles ont été estimées entre 3,8 m et 4,8 m pour l'expérience et entre 5 m et 6 m pour la simulation lorsque le débit calorifique est à son maximum. FDS surestime la hauteur de flamme. Il n'est pas précisé si les hauteurs de flamme ont été déterminées à l'aide de la fraction de mélange ou du débit calorifique par unité de volume.

- Cas expérimental ICFMP BE #3

Voici rapidement, les principales caractéristiques de l'essai :

- 15 tests sont réalisés lors de l'étude
- Des foyers d'hydrocarbure vont de 350 kW à 2,2 MW (Cela correspond à des R^* de 0,16 à 0,08 pour les maillages utilisés)
- Le compartiment mesure 21,7 m par 7,1 m sur une hauteur de 3,8 m et est équipé d'une porte de 2 m sur 2 m et d'un système mécanique d'injection et d'extraction d'air

Les hauteurs de flamme calculées par FDS sont de l'ordre de celles observées sur les photographies, aux erreurs d'estimations près. Cependant, ces erreurs d'estimations des hauteurs de flamme mesurées sont considérables. D'ailleurs, aucune valeur de l'estimation par FDS de la hauteur de flamme n'est portée dans l'étude pour ces essais. L'étude du NUREG [NUREG-1824 2007] ne permet donc pas d'avancer une conclusion définitive sur la capacité de FDS à simuler correctement les hauteurs de flamme.

La surévaluation du premier cas ICFMP BE#2 peut être attribuée au modèle simplifié de combustion combiné au maillage qui n'est pas assez précis pour évaluer correctement la hauteur de flamme bien qu'il soit quand même déjà très fin (R^* compris entre 0,07 et 0,1).

Sur les deux exemples ICFMP BE#2 et #3, les R^* utilisés dans la zone du foyer pour les simulations sont en moyenne de l'ordre de 0,08 (équivalent respectivement à des tailles de maille de 0,13 m et 0,1 m). Ces valeurs de R^* sont légèrement supérieures à celles que ont été déterminées dans les paragraphes précédents. Aucune indication précise n'est portée dans la référence [NUREG-1824 2007] quant à une éventuelle étude de sensibilité à la taille de maille des hauteurs de flamme.

Les hauteurs de flamme évoquées dans le document [NUREG-1824 2007] sont obtenues en moyennant temporellement des hauteurs de flamme maximales instantanées. Il n'est donc pas possible de comparer ces hauteurs à celles qui auraient pu être calculées à l'aide de la relation d'Heskestad. En effet, ces dernières sont des hauteurs moyennes de flamme déterminées à partir de hauteurs maximales instantanées moyennées grâce à une méthode d'intermittence à 50%.

Enfin, plus récemment [LIN 2009], l'effet du maillage sur le rayonnement thermique et les hauteurs de flamme d'un foyer a été étudié. Les simulations sont comparées à des mesures effectuées sur des feux d'heptane dans des bacs de 20, 30 et 38 cm de diamètre. Lors de ces essais, une balance mesure la perte de masse du combustible pour pouvoir ensuite l'utiliser comme donnée d'entrée des simulations FDS. Un radiomètre mesure, à des distances du centre du brûleur de 55, 82,5 ou 104,5 cm (dépendant de la puissance du foyer), le rayonnement thermique entre le sol et 1,80 m de hauteur.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les foyers ont des débits calorifiques de 681,2, 915,8 et 948,5 $kW.m^{-2}$ respectivement pour les diamètres de foyer croissants. Le foyer est photographié lors des essais. La hauteur de flamme est moyennée à partir de ces photographies.
Par défaut, une centaine d'angles solides est utilisée dans le calcul FDS pour simuler le rayonnement thermique. Après avoir effectué une étude de sensibilité, les auteurs montrent que le rayonnement thermique simulé est très sensible au nombre d'angles solides et que les valeurs simulées ne sont plus dépendantes du nombre d'angles solides lorsque cinq cents angles sont utilisés. Cette valeur est donc choisie pour effectuer l'ensemble des simulations de l'étude [LIN 2009].
Les calculs pour les foyers de 20 et 30 cm montrent que les hauteurs de flamme ne sont plus dépendantes de la taille de maille utilisée lorsque R^* est inférieur à 0,077. Pour ces R^*, les hauteurs de flamme simulées sont du même ordre que les mesures, à savoir environ 58 cm pour le foyer de 20 cm de diamètre et 91 cm pour celui de 30 cm de diamètre. Les hauteurs de flamme sont sous-estimées lorsque qu'un R^* supérieur à 0,077 est utilisé. Pour une puissance donnée, la hauteur de flamme simulée augmente donc en réduisant la taille des cellules, c'est-à-dire en raffinant le maillage.

De nombreuses corrections sont effectuées dans FDS lorsque le maillage est grossier. Elles peuvent influencer la hauteur de flamme calculée. En effet, pour commencer, une correction sur la fraction stœchiométrique de mélange est parfois réalisée [McGRATTAN 2003] pour des foyers dont le diamètre caractéristique D^* est petit par rapport au diamètre physique et/ou le maillage est relativement grossier. La surface stœchiométrique définie par $Z=Z_f$ sous-estime alors la hauteur de flamme observée. Il a été trouvé empiriquement dans cette même étude qu'une bonne estimation de la hauteur de flamme est obtenue avec des maillages grossiers si la fraction de mélange est corrigée dans la région de combustion par l'équation (40).

$$\frac{Z_{f,eff}}{Z_f} = min\left(1, C\frac{D^*}{\delta x}\right) \quad (40).$$ *; C étant une constante empirique valant 0,6*

Lorsque la résolution du calcul augmente, $Z_{f,eff}$ approche la valeur idéale Z_f.

Il faut également savoir qu'une autre correction est effectuée au niveau de la flamme lorsqu'un maillage grossier est utilisé. En effet, dans ce cas, une quantité disproportionnée d'énergie provenant de la combustion est dégagée près des côtés du brûleur. Le débit calorifique par unité de surface du contour de la flamme est proportionnel au gradient local de fraction de mélange et de la valeur locale de la diffusivité du matériau. Le gradient de fraction de mélange à la base du feu est élevé car un flux de combustible pur rencontre l'air environnant. La diffusivité est également élevée pour des maillages grossiers car elle est reliée à la viscosité du modèle de Smagorinsky [McGRATTAN 2006].

Une valeur limite maximale est imposée au débit calorifique local par unité de surface de flamme afin d'éviter que trop d'énergie ne soit dégagée trop près du brûleur quand un maillage grossier est utilisé. Lorsque trop d'énergie est dégagée localement par unité de surface de flamme, l'énergie dégagée sur l'ensemble de la surface de flamme est surévaluée si cette surface est égale à celle d'une flamme réelle. Il faut donc imposer une valeur limite supérieure à l'énergie dégagée localement. Elle est déterminée en supposant les flammes de forme conique de surface A_c donnée par l'équation (41) et de hauteur H déterminée à l'aide de la corrélation d'Heskestad (38). La surface ainsi déterminée est inférieure à celle d'une flamme réelle.

$$A_c = \pi r\sqrt{r^2 + h^2} \quad (41).$$

Toute énergie amputée par cette valeur limite supérieure est redistribuée sur le volume entier délimité par la surface de flamme.

Enfin, la part rayonnée du débit thermique est fonction à la fois de la température de flamme et de sa composition chimique. Dans FDS aucune de ces deux quantités n'est calculée très précisément, à cause du modèle à fraction de mélange et du maillage qui n'est en général jamais assez fin pour obtenir une température de flamme correcte. Ainsi, pour les calculs dont les tailles de cellule sont de l'ordre du centimètre ou plus, la température près de la surface de la flamme ne peut être utilisée comme terme source dans l'équation de transfert radiatif. Les températures calculées correspondent dans FDS à des températures moyennées au sein de chaque maille. Or pour une flamme de diffusion, il paraît logique d'obtenir des valeurs élevées de températures localisées dans une zone très mince de

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

l'espace correspondant au front de flamme. Comme FDS n'utilise qu'une valeur moyennée sur la maille, les températures sont sous-estimées à proximité de la flamme si le maillage est trop grossier. Et comme le terme source radiatif a une dépendance en T^4, cette sous-estimation de la température se fait d'autant plus ressentir. FDS utilise alors le taux de dégagement de chaleur pour calculer le terme source de rayonnement selon l'équation (42).

$$\kappa L_b = \max\left(\chi_r \frac{\dot{q}'''}{4\pi}, \kappa \frac{\sigma T(x)^4}{\pi}\right) \quad (42).$$

Avec κ le coefficient d'absorption, σ la constante de Stefan-Boltzmann, $\dot{q}'''$ est le taux de dégagement de chaleur par unité de volume, L_b la luminance émise par le corps noir et χ_r la fraction locale de cette énergie qui est émise sous forme de rayonnement. Cette dernière est une grandeur qui est généralement mesurée pour un foyer considéré dans sa globalité. FDS fait donc ici l'hypothèse que la fraction d'énergie rayonnée locale est identique à la valeur globale.

Les études évaluant les hauteurs de flamme calculées avec FDS 4 sont peu nombreuses. Le document de validation [NUREG-1824 2007] conclue qu'il n'y a pas assez d'informations disponibles pour pouvoir apporter une conclusion définitive sur la capacité de FDS à prédire une hauteur de flamme.
C'est une des raisons pour lesquelles des calculs supplémentaires ont été effectués sur un autre cas expérimental en mettant l'accent sur la sensibilité des résultats à la taille de maille.

3.3.3.3 Cas d'application de la hauteur de flamme

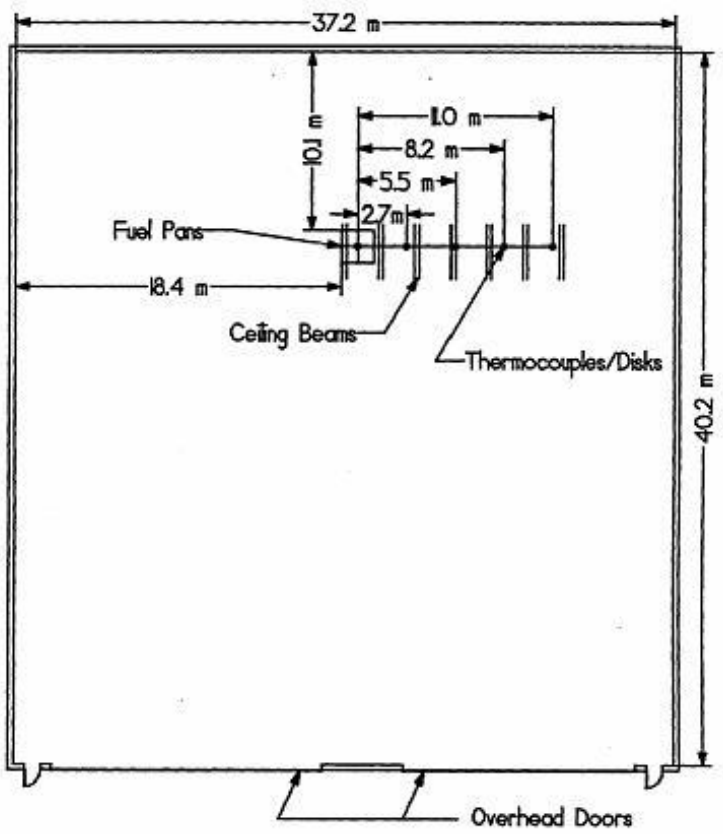
Un cas expérimental issu de la référence [WALTON 1993] est utilisé pour comparer, avec la corrélation d'Heskestad, les hauteurs de flamme théoriques obtenues avec FDS. Il est considéré que la corrélation d'Heskestad est utilisable car le domaine d'essai est bien ventilé et la hauteur de flamme est environ trois fois inférieure à la hauteur sous plafond : la zone du foyer se situe dans des conditions de flamme libre

Lors de cette expérience, les hauteurs de flamme n'ont pas été évaluées, ni par visualisation directe, ni par enregistrement photo ou vidéo. Les températures ont été mesurées sur l'axe du foyer, mais le nombre de points de mesure au-dessus du foyer ne suffit pas pour déterminer précisément une hauteur de flamme. Les résultats théoriques de FDS ne peuvent donc pas être comparés à des valeurs expérimentales pour le cas étudié. Ils ne le sont qu'à celles obtenues par la corrélation d'Heskestad.

3.3.3.3.1 Présentation du cas expérimental et de la stratégie de simulation

Le local mesure 37,2 m par 40,2 m pour une hauteur sous plafond de 14 m. Il est entièrement clos durant l'essai. Le brûleur est un récipient carré de 1,8 m de côté contenant de l'alcool ; il est surélevé de 12,5 cm par rapport au sol. Grâce à des mesures effectuées sous une hotte calorimétrique, le débit calorifique du foyer des deux expériences est estimé à 3 650 kW. Deux séries de thermocouples ont été placées. Les premiers sont des thermocouples classiques et les seconds ont été fixés à des masses métalliques pour reproduire l'inertie des moyens de détection ou d'extinction automatique. Ils ont été disposés à 38 cm au-dessous du plafond à des distances radiales du centre de la source de 0 m, 2,7 m, 5,5 m, 8,2 m et 11 m. (voir le schéma 64). Sur l'axe de la source, trois autres thermocouples sont disposés à 5,2 m, 8,2 m et 11,3 m du sol. À 5,5 m du centre de la source, deux thermocouples supplémentaires sont à des hauteurs de 13,39 m et 13,85 m. Et enfin à une distance radiale de 11 m, les autres points de mesures sont placés à des hauteurs de 13,1, 12,2, 10,6, 9,1, 7,6, 6,1 et 4,6 m.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



64. *Vue de dessus du dispositif expérimental [WALTON 1993]*

Le tableau 65 récapitule les températures mesurées expérimentalement sur l'axe du foyer.

La température au sommet d'une flamme de diffusion turbulente est estimée être comprise entre environ 320 et 400°C [BABRAUSKAS 2006]. Pour les flammes dont le diamètre mesure moins de 1 m environ, la température de la flamme dans la région persistante est de l'ordre de 900°C. Pour des flammes plus grandes, cette température peut atteindre 1 100 à 1 200°C. Heskestad [HESKESTAD 1997] propose un écart de température de 500°C pour définir le sommet de la flamme, ce qui correspond avec nos conditions expérimentales à une température locale de 520°C. Ces valeurs ne sont valables que pour des flammes libres. Cependant, au regard de la puissance du foyer et de la hauteur sous plafond, il est considéré que l'expérience modélisée est proche d'une configuration libre. C'est cette dernière valeur de température qui est utilisée pour définir le sommet d'une flamme par la suite.

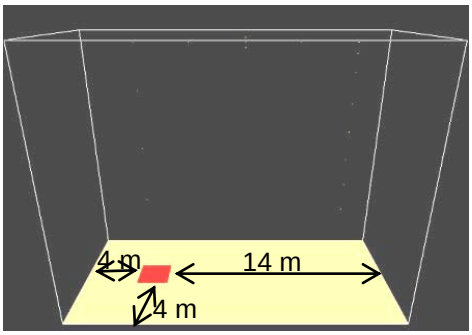
Bien que la comparaison directe entre théorie et expérience ne soit pas possible pour le cas étudié, il est possible de noter, à partir des valeurs reportées dans le tableau 65, que la flamme s'élève au maximum à 5,2 m si la température au sommet de la flamme est de 520 °C.

Hauteur au-dessus du foyer – *Z* (m)	Température enregistrée lors du premier essai (°C)	Température enregistrée lors du second essai (°C)
5,2	420	320
8,2	165	150
11,3	105	100
14	86	82

65. *Températures mesurées expérimentalement sur l'axe du foyer [WALTON 1993]*

Pour la simulation, une surface carrée de 1,8 m de côté est définie. Sur celle-ci, un débit calorifique par unité de surface de 1 126 $kW.m^{-2}$ est imposé. Les points de mesure en température sont positionnés à l'identique de l'expérience.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



66. *Vue d'ensemble du cas simulé avec FDS4*

Cinq tailles de cellules ont été utilisées pour simuler l'expérience et évaluer l'effet du maillage sur les hauteurs de flamme. Les caractéristiques des maillages sont résumées dans le tableau 67.

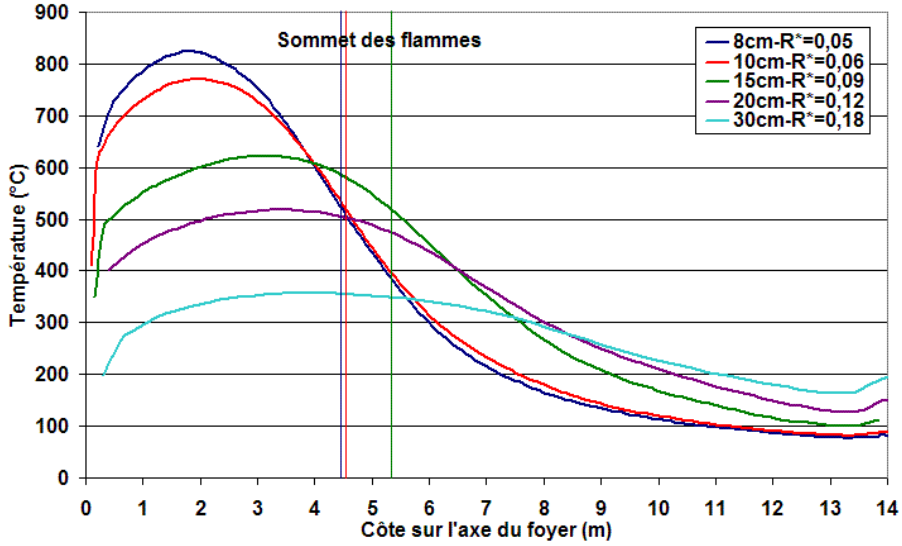
Nom du cas	Taille des cellules (cm)	R^*
CJ5	30	0,18
CJ4	20	0,12
CJ6	15	0,09
CJ7	10	0,06
CJ11	8	0,05

67. *Caractéristiques des maillages utilisés dans les simulations FDS4*

3.3.3.3.2 Sensibilité à la taille de maille des températures de flamme

Au paragraphe précédent, un critère de température est utilisé pour définir le sommet d'une flamme. Il parait donc judicieux d'étudier la sensibilité des températures de flamme à la taille de maille avant de s'intéresser aux hauteurs de flamme.

Pour étudier la température sur l'axe du foyer, les valeurs ont été moyennées sur 60 s (entre 40 et 100 s de simulation) pour les cinq configurations (cf. graphique 68). En ne s'intéressant dans un premier temps qu'aux températures en dessous des hauteurs de flammes maximales moyennes calculées avec le critère de 520 °C, une très forte dépendance de la température de flamme à la taille de maille est visible. Plus le maillage est grossier, plus la température dans la flamme est faible (820°C avec le maillage le plus fin pour 365°C avec le plus grossier) et plus les différences de température entre la flamme et le panache inerte sont minimes. Même pour le cas maillé le plus finement, les températures de flammes sont sous-estimées par rapport aux valeurs d'environ 900 °C avancées par Babrauskas. Pour les deux maillages les plus fins, il est intéressant de noter qu'avant le sommet des flammes, une différence maximale de 50 °C est obtenue alors qu'elle devient inférieure à 10 °C pour toutes les hauteurs supérieures au sommet moyenné des flammes.



68. *Température moyennée sur 60 s sur l'axe du foyer pour tous les cas simulés*

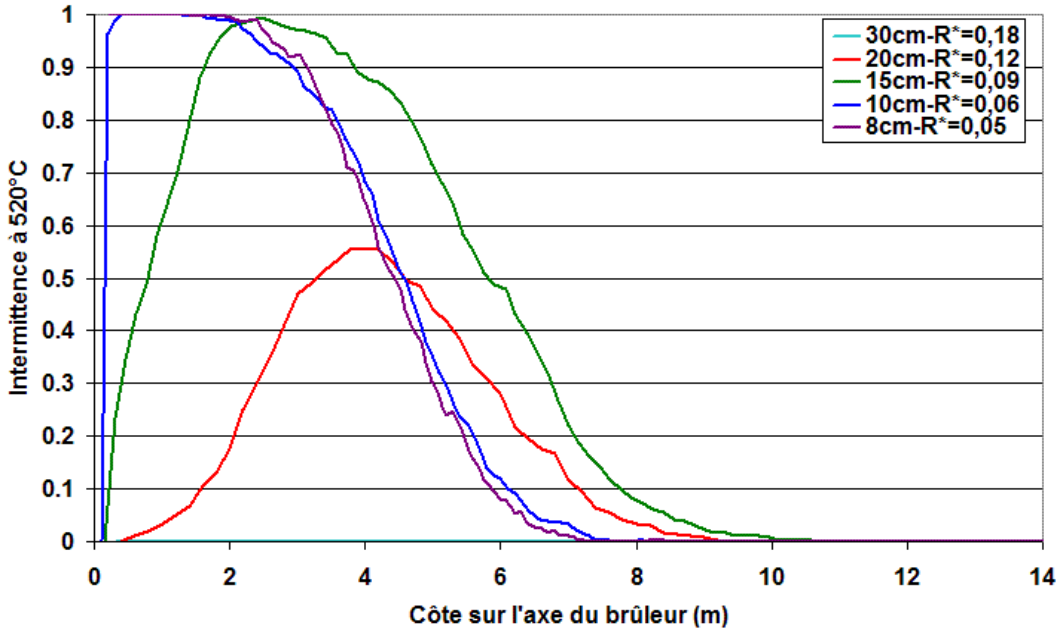
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Dans ces simulations, une source prescrite est utilisée ; son débit massique ne varie pas. L'augmentation de la température à proximité du foyer lorsque le maillage devient plus fin n'a pas d'impact sur le débit calorifique. Cela n'est plus le cas lorsque le débit massique de la source calorifique est calculé grâce au modèle de pyrolyse et qu'une propagation des flammes à la surface du matériau est attendue. En effet, le flux incident vers le matériau et donc sa température varient alors selon le maillage qui est utilisé. Or, le débit massique de pyrolyse dépendant directement de la température du matériau, une forte variation avec la taille de maille en résulte.

3.3.3.3.3 Sensibilité à la taille de maille des hauteurs de flamme

La hauteur de flamme est évaluée à partir des résultats FDS en utilisant l'intermittence à 50% comme définie par Heskestad [HESKESTAD 2002]. La présence ou non de flamme a été déterminée à partir d'un critère de température également donné par Heskestad (cf. § 3.3.3.3.1). Si la température mesurée en un point est supérieure à 520°C, il se situe à cet instant dans la flamme et un coefficient égal à 1 lui est affecté. Si, un instant plus tard, la température en ce point devient inférieure à 520°C, le coefficient qui lui est affecté passe alors à 0 : il n'est plus considéré comme étant dans la flamme. En moyennant ces coefficients sur 60 secondes, l'intermittence en ce point de mesure sur un intervalle de temps de 1 min est obtenue. En multipliant les points de mesure sur l'axe du foyer, il est alors facile de donner une hauteur à laquelle l'intermittence vaut 50% et cette valeur est ensuite comparable à une hauteur de flamme déterminée avec les corrélations d'Heskestad.

Sur le graphique 69 sont tracées, en fonction de la distance au-dessus du foyer, les intermittences calculées avec une température de sommet de flamme de 520 °C pour les cinq maillages utilisés. Pour les deux cas les plus fins (R^* valant 0,05 et 0,06), les courbes d'intermittence sont très proches. Il en est donc de même pour les hauteurs de flamme égales respectivement à 4,45 et 4,55 m (cf. tableau 70). Si dans la démarche d'investigation il est important de connaître la hauteur de flamme, l'écart relatif maximum de 8 % entre ces deux cas et la corrélation d'Heskestad est acceptable compte tenu des approximations faites pour le choix du critère de sommet de flamme à 520 °C. Lorsqu'un R^* de 0,09 est utilisé, un écart relatif de plus de 30 % par rapport à la corrélation d'Heskestad est obtenu avec une hauteur moyenne de flamme de 5,80 m ; un tel maillage ne sera en général donc pas acceptable pour l'application en investigation incendie. Pour les deux cas ayant les maillages les plus grossiers (R^* égaux à 0,12 et 0,18), l'intermittence n'atteint jamais 1. Cela signifie que lorsqu'un critère de température à 520°C est utilisé pour caractériser le sommet de la flamme, cette dernière n'a jamais de partie persistante, elle est continuellement intermittente sur toute sa hauteur. La température de 520°C n'est même jamais atteinte sur l'axe du brûleur pour le maillage le plus grossier.



69. *Intermittence à 520°C sur l'axe du foyer pour tous les cas simulés*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Nom du cas	Corrélation d'Heskestad	R^*=0,05 8 cm	R^*=0,06 10 cm	R^*=0,09 15 cm	R^*=0,12 20 cm	R^*=0,15 30 cm
Hauteur moyenne de flamme (m)	4,2	4,45	4,55	5,80	Indéterminable	Indéterminable
Écart relatif (%)		6	8	30	∞	∞

70. *Hauteurs moyennes de flamme pour les simulations FDS de l'expérience*

3.3.3.3.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille

Les deux cas ayant les maillages les plus fins (R^* de 0,05 et 0,06) ont des temps de calcul largement supérieurs puisqu'ils se comptent en nombre de jours plutôt qu'en dizaines de minutes pour le maillage le plus grossier (voir le tableau 71). Ce sont cependant les seuls calculs donnant des hauteurs de flamme correctes pour l'application en investigation incendie. Pour les deux calculs les plus fins, l'écart relatif diminue de 8 à 6 % (voir le tableau 70). Cela n'est pas suffisant pour accepter une multiplication du temps de calcul par 1,6 (voir le tableau 71). L'utilisation d'un R^* égal à 0,06 est donc, pour l'évaluation de la hauteur moyenne de flamme, le meilleur compromis entre temps de calcul et précision du résultat.

Taille de maille (cm)	R^*	Temps de calcul
30	0,18	40 min
20	0,12	4 h 40 min
15	0,09	14 h
10	0,06	2 j 14 h
8	0,05	4 j 4 h

71. *Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^**

3.3.3.4 Valeur optimale du R^* pour la modélisation de la hauteur de flamme

Dans ce paragraphe, il a été tenté d'évaluer si les hauteurs de flamme qui peuvent être déduites d'un calcul FDS sont correctes. Une étude de vérification et de validation [NUREG-1824 2007] annonce que pour des feux bien ventilés, FDS prédit relativement bien la hauteur de flamme. Dans cette même étude, des R^* de l'ordre de 0,08 ont été utilisés dans le voisinage du foyer. Cette valeur est très proche de celle de 0,067 qui a été déterminée au paragraphe 3.3.2.2.10. Les auteurs ne jugent cependant pas disposer d'assez d'informations pour se prononcer définitivement sur la capacité de FDS à prédire une hauteur de flamme. C'est une des raisons pour laquelle, il semblait intéressant de travailler sur la simulation d'un nouveau cas expérimental tout en essayant d'éprouver la sensibilité au maillage des hauteurs de flamme.
L'expérience qui a été choisie utilise un brûleur de 3 650 kW débitant dans un volume ouvert sur les quatre faces verticales sous un plafond de 14 m. Parmi les simulations, seuls les cas utilisant des tailles de cellules correspondant à un R^* de 0,05 et 0,06 donnent des résultats en accord avec la corrélation d'Heskestad (voir le tableau 70). Une tendance générale à la surestimation des hauteurs de flamme par FDS a été observée et cela malgré la correction sur la fraction de mélange dans la région de combustion pour les maillages grossiers (cf. § 3.3.3.2.2). Même le cas ayant le maillage le plus fin (R^* valant 0,05) résout le calcul en ayant recourt, à très peu de reprises, à l'usage du $Z_{f,eff}$.

Une étude [MA 2003] présentée précédemment (cf. § 3.3.3.2.2) avance qu'avec un R^* égal à 0,05, les hauteurs maximales de flamme, comparées à la corrélation de Zukoski, sont correctement reproduites. Pour un R^* inférieur à 0,05, les hauteurs de flamme sont surestimées alors qu'elles sont sous-estimées si R^* est supérieur à cette valeur. Une seconde étude plus récente [LIN 2009] arrive à des conclusions assez proches de celles de Ma [MA 2003]. Elle affirme que pour un R^* supérieur à 0,077, la hauteur de flamme est sous-estimée par rapport aux mesures et qu'une convergence de la hauteur de flamme en fonction taille de maille est atteinte pour des R^* inférieurs ou égaux à 0,077.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les valeurs des R^* seuils avancées par Lin (0,077) et Ma (0,05) sont du même ordre de grandeur que celles trouvées avec les simulations dont les résultats sont présentées dans ce paragraphe (0,06). Cependant, alors que la hauteur de flamme est sous-estimée pour des R^* supérieurs à la valeur seuil dans les études de Ma et Lin, elle est surestimée pour les calculs qui ont été menés ici. Il est difficile de savoir pourquoi ces résultats vont à l'opposée l'un de l'autre. Aucun raisonnement sur la réponse du modèle, et notamment de la viscosité dynamique, à une variation de la taille de cellule n'est possible. En effet, les corrections effectuées par FDS sur la fraction de mélange dans la région de combustion et la redistribution de l'énergie à cause de la valeur limite maximale imposée au débit calorifique local par unité de surface de flamme biaisent l'interprétation des résultats.
Les différences entre les trois études dans les variations de hauteur de flamme en fonction du maillage peuvent tout de même s'expliquer par la méthode utilisée pour les estimer à partir des résultats de FDS. En effet, Lin et Ma utilisent la fraction de mélange à la place d'une température de 520 °C comme critère pour situer le sommet de la flamme. La hauteur de flamme déterminée avec la fraction de mélange est influencée par la correction effectuée sur le $Z_{f,eff}$. Avec le second paramètre, comme il y a redistribution du débit calorifique pour les maillages grossiers, la température est homogénéisée à la verticale du foyer.

Il faut donc considérer avec prudence les hauteurs de flamme déduites des simulations. Il est important de retenir que, quelque soit le critère retenu pour déterminer les hauteurs de flamme, les études effectuées sur FDS 4 aboutissent à une valeur proche de R^* pour obtenir une convergence en fonction de la taille de maille.

3.3.4 Modélisation de l'écoulement dans le panache

Ces travaux s'intéressent à la simulation des premiers instants d'un incendie. Au cours de cette phase, la formation d'un panache est un phénomène important concernant les échanges thermiques et la dynamique des fluides dans le domaine de calcul. En effet, c'est dans le panache que la majorité du mélange entre les gaz de combustion dégagés et l'air environnant a lieu. Simuler correctement ce mélange et les transferts thermiques qui en résultent est un bon point de départ pour une reconstitution plus réaliste des sinistres.

3.3.4.1 Étude bibliographique de l'écoulement dans le panache

3.3.4.1.1 Corrélations d'Heskestad

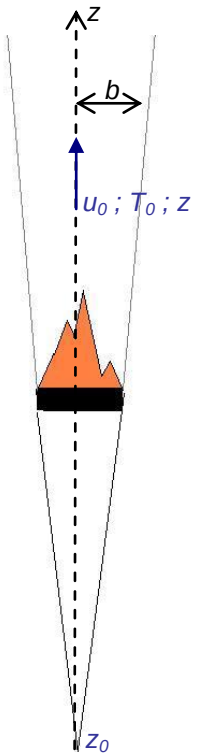
Heskestad [HESKESTAD 2002] donne différentes relations permettant de connaître les principales caractéristiques physiques régissant un panache thermique. Pour cela, il pause les hypothèses suivantes :

- Le foyer est considéré comme ponctuel
- Les variations de masse volumique dans la zone en mouvement sont petites par rapport à la masse volumique ambiante
- La vitesse d'entraînement de l'air sur la surface extérieure du panache est proportionnelle à la vitesse verticale locale du panache
- Les profils de vitesse verticale et de force d'Archimède sur toute section horizontale sont de forme similaire à toutes les hauteurs

Pour prendre en compte la surface de la source dans les relations, une origine virtuelle z_0 est introduite. C'est la hauteur d'une source ponctuelle équivalente à un foyer de surface finie.

Les relations (43) à (45) ont été déterminées pour calculer le rayon du panache, la température et la vitesse au centre du panache.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



72. *Représentation schématique d'un foyer et de son panache*

$$b_{\Delta T} = 0.12\left(\frac{T_0}{T_\infty}\right)^{1/2}(z - z_0) \quad (43).$$

$$\Delta T_0 = 9.1\left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2}\right)^{1/3} \dot{Q}_C^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \quad (44).$$

$$u_0 = 3.4\left(\frac{g}{c_p \rho_\infty T_\infty}\right)^{1/3} \dot{Q}_C^{1/3}(z - z_0)^{-1/3} \quad (45).$$

$b_{\Delta T}$ est le rayon du panache au point où la variation de température a diminué jusqu'à $0{,}5\Delta T_0$, T_0 la température sur l'axe, $\dot{Q}_c$ la part du débit calorifique total transporté par convection, *z* la hauteur au-dessus du foyer, z_0 la hauteur de l'origine virtuelle du foyer. Pour des conditions atmosphériques normales, ($T_\infty = 293K$, $g = 9{,}81 m.s^{-2}$, $c_p = 1{,}00 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ et $\rho_\infty = 1{,}2 kg.m^{-3}$), les relations (43) à (45) deviennent (46) à (48). Ces relations ne sont plus valables en dessous de la hauteur moyenne.

$$b_{\Delta T} = 0.12\left(\frac{T_0}{T_\infty}\right)^{1/2}(z - z_0) \quad (46).$$

$$\Delta T_0 = 25\dot{Q}_C^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \quad (47).$$

$$u_0 = 1.03\dot{Q}_C^{1/3}(z - z_0)^{-1/3} \quad (48).$$

La vitesse maximale juste en dessous de la hauteur moyenne de flamme peut-être approchée [HESKESTAD 2002] dans des conditions atmosphériques normales par la relation (49).

$$u_{0m} = 1.97\dot{Q}_c^{1/5} \quad (49).$$

Dans cette relation, l'approximation $\Delta T_0 = 650K$ est faite.

L'origine virtuelle du foyer est un paramètre difficile à connaître. La relation la plus simple proposée par Heskestad pour la calculer est donnée par l'égalité (50).

$$\frac{z_0}{D} = -1.02 + 0.083\frac{\dot{Q}^{2/5}}{D} \quad (50).$$

$\dot{Q}$ est exprimé en kW et *D* en m.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.4.1.2 Corrélation de McCaffrey

En se basant sur des données expérimentales et une analyse dimensionnelle, McCaffrey [McCAFFREY 1979] a également proposé des relations pour calculer les températures et les vitesses dans le panache thermique. Les relations (51) et (52) sont divisées en trois selon la zone du panache considérée : la région de flamme persistante, la région intermittente et le panache inerte.

$$\Delta T_0 = \left(\frac{\xi}{0{,}9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_\infty \qquad (51).$$

$$u_0 = \xi \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{\eta} \dot{Q}^{1/5} \qquad (52).$$

Les constantes ξ et η varient selon la région ; les valeurs sont données dans le tableau 73.

Région	$\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}$ en m/kW$^{2/5}$	η	ξ
Continue	Inférieur à 0,08	1/2	6,8 [m$^{1/2}$/s]
Intermittente	0,08 – 0,2	0	1,9 [m/(kW$^{1/5}$s)]
Panache	Supérieur à 0,2	-1/3	1,1 [m$^{4/4}$/(kW$^{1/3}$s)]

73. *Valeur des constantes des équations du panache de McCaffrey*

Les corrélations de McCaffrey pour la vitesse et la température dans le panache donnent des valeurs supérieures d'environ 10 % par rapport aux équations d'Heskestad [KARLSSON 2000].

3.3.4.1.3 Modélisation de l'écoulement dans le panache

Les expériences sur lesquelles McCaffrey s'est basé pour établir les équations présentées au paragraphe 3.3.4.1.2 ont été modélisées avec la version 3 de FDS [IERARDI 2003]. Ces expériences ont été réalisées avec un brûleur carré de méthane de 0,3 m de côté ayant des débits calorifiques variant de 14,4 kW à 57,5 kW. Deux simulations effectuées avec FDS ont été réalisées pour les débits extrêmes, c'est-à-dire 14,4 kW et 57,5 kW. Six maillages uniformes utilisant des cellules de 1,5, 3, 5, 7,5, 10 et 15 cm ont été mis en œuvre. Pour le foyer de 14,4 kW, c'est le cas maillé avec les plus petites cellules de 1,5 cm qui donne les résultats les plus proches de ceux obtenus grâce à la corrélation. Pour le débit de 57,5 kW, les conclusions sont moins évidentes car les résultats les plus proches de la corrélation sont obtenus avec les cellules de 1,5, 3 ou 15 cm selon le paramètre étudié à savoir la vitesse ou la température.
Le R^* pour la puissance de 14,4 kW vaut 0,085 pour des cellules de 1,5 cm. Pour avoir un R^* de 0,067 dans cette simulation, il faudrait utiliser des mailles de 1,2 cm environ. Le R^* pour la puissance de 57,7 kW vaut 0,098 pour des cellules de 3 cm. Pour avoir un R^* de 0,067, il faudrait avoir des tailles de mailles de 2,0 cm environ. Il faut noter que la convergence en maillage n'est pas toujours clairement observable dans les résultats présentés. En effet, en diminuant la taille de cellule, les vitesses et les températures ne tendent pas toujours vers une valeur qui pourrait être ensuite considérée comme non dépendante au maillage. En résumé, utiliser un maillage plus raffiné pourrait donner des valeurs de température et de vitesse assez différentes de la configuration la plus fine de l'étude.

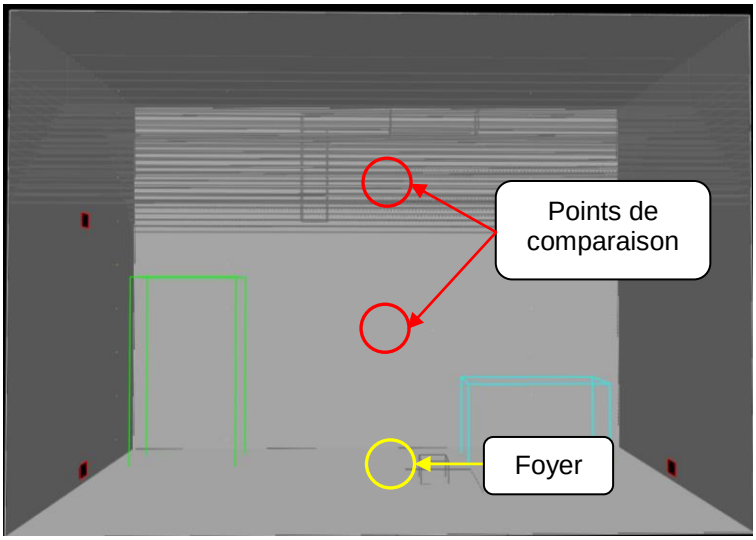
Dans une étude présentée au paragraphe 3.3.3.2.2 [NUREG-1824 2007], deux autres séries de tests, ICFMP BE #2 et FM/SNL, ont été confrontées à des calculs réalisés avec la version 4 de FDS.

- ICFMP BE #2

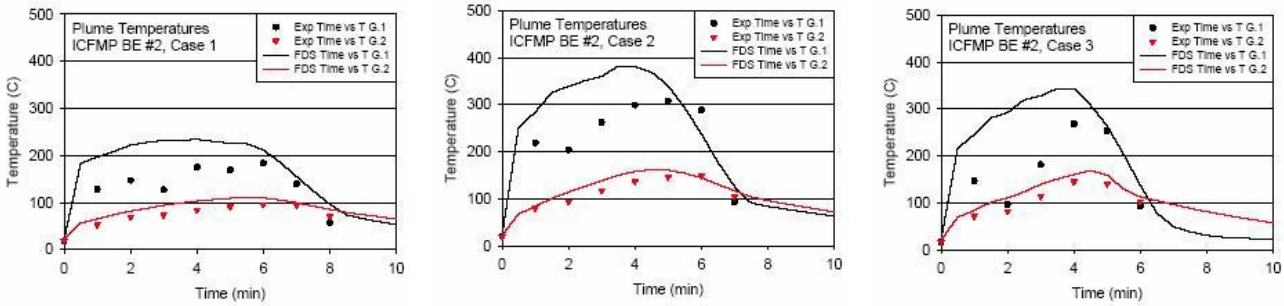
Le cadre expérimental de ces essais a été présenté précédemment. Lors de cette expérience, les flammes ont une hauteur qui oscille entre 4 m et 5 m lorsque le débit calorifique est maximal. Le premier point pour mesurer les températures dans le panache se situe à 6 m au-dessus du brûleur c'est-à-dire à environ 1 ou 2 m au-dessus des flammes (voir l'image 74). En ce point, FDS surestime largement la température de 25 à 30% (Voir les graphiques 75 et 77). Dans le rapport NUREG [NUREG-1824 2007], il est annoncé que sur les premiers mètres à la verticale des flammes, la

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

température diminue rapidement et que FDS ne reproduit pas fidèlement cette diminution. D'autant plus que FDS donne une hauteur de flamme entre 5 et 6 m, estimé par les auteurs de l'étude en traitant la fraction de mélange en iso-surface (cf. § 3.3.3.2.2). Pour l'autre point de mesure placé à 12 m de hauteur (cf. image 74), soit 7 ou 8 m au-dessus du sommet des flammes, l'erreur de FDS est plus faible et se situe dans la limite supérieure des erreurs de mesures (Voir les graphiques 75 et 77). Pour ces séries d'essais, le R^* est de l'ordre de 0,08 dans la zone du panache. Des études de sensibilité au maillage ont aussi été réalisées sur ce cas ICFMP BE#2 et les résultats présentés dans l'étude [NUREG-1824 2007] sont ceux qui ont été obtenu avec le meilleur compromis temps de calcul / convergence des calculs.



74. *Emplacement des points de mesure de température dans le panache thermique [NUREG-1824 2007]*



75. *Températures mesurées expérimentalement et modélisées avec FDS dans le panache pour trois des essais de l'expérimentation ICFMP BE #2 [NUREG-1824 2007]*

- FM/SNL[10]

Voici les principales caractéristiques de l'essai :

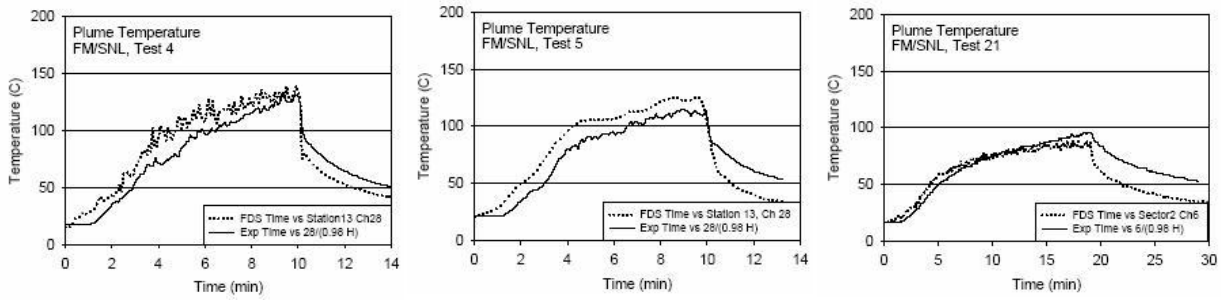
- Brûleur au propylène de 0,9 m de diamètre à 0,1 m du sol
- Pic de débit thermique à 516 kW après 4 minutes d'une croissance en αt^2 puis un maintient à cette valeur pendant 6 à 16 min selon l'essai.
- Compartiment à base rectangulaire de 18,3 par 12,2 m pour une hauteur sous plafond de 6,1 m.
- Une ouverture de 1 m² sur le plafond et une ventilation mécanique de 0,66 m² à 4,9 m du sol soufflant entre 0,38 $m^3.s^{-1}$ et 3,78 $m^3.s^{-1}$.

[10] Les mesures expérimentales de cette étude avaient déjà été comparées avec des résultats obtenus à l'aide d'une des premières versions de FDS [FRIDAY 2001].

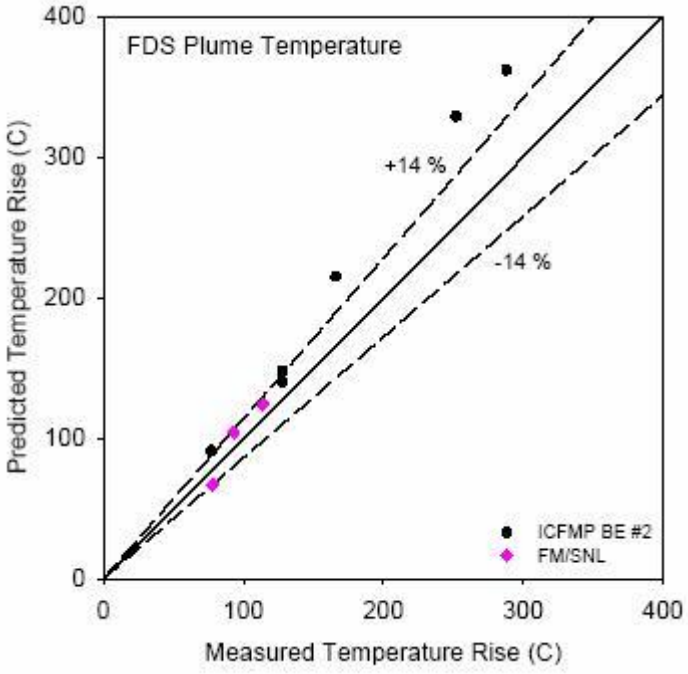
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

La comparaison entre l'expérience et la simulation des températures dans le panache s'est effectuée pour ce cas en un unique point situé à la verticale du foyer à 2 cm sous le plafond. Il est possible de se demander si le point de mesure situé directement sous le plafond est le point le plus représentatif d'un écoulement dans le panache thermique. Sa position est peut-être plus caractéristique du début d'un écoulement dans un jet sous plafond. Cependant, il a été décidé de procéder comme les auteurs de l'étude [NUREG-1824 2007] en considérant ce point comme étant représentatif d'un écoulement dans le panache car il se situe à la fois à la fin de l'écoulement dans le panache et au début de celui dans le jet sous plafond. Considérer le point de mesure uniquement dans le panache aurait été plus gênant si des températures et des vitesses avaient été calculées en ce point d'après les corrélations d'Heskestad et de McCaffrey. Mais comme les simulations sont comparées directement aux mesures, la question de validité des corrélations ne se pose pas.

Sur les deux premiers essais de cet expérience FM/SNL, FDS surestime légèrement les températures, mais tout en restant dans le domaine d'incertitude des mesures expérimentales (Voir les graphiques 76 et 77). Pour le dernier cas, FDS sous-estime la température d'environ 20%, mais il faut savoir que pour cet essai, le débit calorifique (un foyer placé dans une armoire électrique) n'est pas parfaitement caractérisé et n'est donc pas parfaitement simulé (Voir les graphiques 76 et 77). Dans le voisinage du panache, le maillage est constitué de cellules de 5 cm ce qui correspond à un R^* de 0,07.



76. *Températures modélisées avec FDS et mesurées expérimentalement dans le panache pour les 3 essais de l'expérimentation FM/SNL [NUREG-1824 2007]*

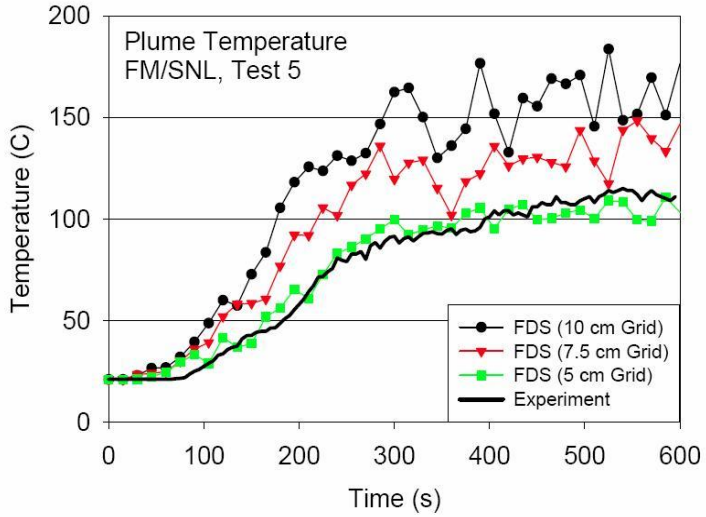


77. *Comparaison des températures mesurées dans le panache avec les températures calculées avec FDS [NUREG-1824 2007]*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les R^* des maillages utilisés dans les simulations varient de 0,07 (pour le cas FM/SNL et un des cas ICFMP BE #2) à 0,11 pour un autre cas ICFMP BE #2. Pour l'unique point de mesure du cas FM/SNL placé sur l'axe du foyer, FDS donne des températures comprises dans les incertitudes de mesure de ± 14 % pour les trois essais de l'expérience. Pour l'expérience ICFMP BE #2, R^* varie de 0,07 pour le plus fin des maillages à 0,11. Mais même pour le maillage le plus fin (R^* de 0,07), FDS surestime les valeurs de températures dans le panache. Selon l'essai, la surestimation est de 26 à 31 % pour le point de mesure à 6 m et 9 à 18 % pour le point de mesure à 12 m. Les valeurs sont en majorité supérieures à la limite supérieure des incertitudes de mesures de 14 %.
Même avec un maillage très fin, il est parfois difficile sur les cas présentés d'obtenir des températures dans le panache comprises dans le domaine d'incertitudes expérimentales. Il a été montré précédemment (cf. § 3.3.3) que FDS surestime les hauteurs de flamme lorsque le maillage n'est pas assez fin dans la zone du foyer. Les températures (ainsi que les vitesses) dans le panache sont fortement liées dans cette zone à la hauteur de flamme. Par conséquent, si la hauteur de flamme est mal résolue, comme les températures et les vitesses diminuent rapidement en s'éloignant du sommet des flammes, plus un point de mesure est situé près de la zone d'intermittence des flammes, plus la surestimation des températures simulées sera grande par rapport aux mesures.

Les résultats présentés précédemment pour les cas ICFMP BE #2 et FM/SNL sont ceux offrant le meilleur compromis entre temps de calcul et précision des résultats. Ainsi, pour chaque cas, les auteurs affirment avoir réalisé des études de sensibilité au maillage. Pour le cas FM/SNL, les températures dans le panache à 2 cm sous le plafond pour des mailles de 5, 7,5 et 10 cm sont tracées dans le graphique 78 et comparées aux valeurs expérimentales. Une bonne adéquation entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus grâce à FDS avec des cellules de 5 cm équivalente à un R^* de 0,07 est observable. La convergence en fonction de la taille de maille n'est pas visible sur le graphique 78, mais les auteurs de l'étude spécifient qu'aucune différence notable dans le résultat n'apparaît en raffinant encore le maillage.



Taille de cellule (cm)	R^* équivalent
10	0,14
7,5	0,1
5	0,07

78. *Températures expérimentales et calculées par FDS dans le panache pour le test 5 du cas FM/SNL [NUREG-1824 2007]*

Les auteurs évoquent que l'ensemble des essais FM/SNL et ICFMP BE#2 ne représentent en totalité que neuf mesures de températures dans le panache thermique (deux points sur trois essais ICFMP BE#2 et un point pour trois essais FM/SNL). D'autres données expérimentales seraient nécessaires pour se prononcer définitivement sur la précision de FDS pour calculer les températures dans cette zone. C'est pourquoi, il a été décidé d'analyser, dans le cadre de ce travail, un nouveau cas expérimental ayant plus d'un ou deux points de mesures situés dans le panache thermique. Une étude de sensibilité au maillage des températures et des vitesses dans le panache est menée par la même occasion afin de déterminer quelles zones du panache sont les plus sensibles aux tailles de mailles.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.4.2 Cas d'application de la modélisation de l'écoulement dans le panache

3.3.4.2.1 Présentation du cas expérimental

L'expérience de Walton [WALTON 1993] utilisée pour étudier les températures et les vitesses dans le panache thermique a été présentée au paragraphe 3.3.3.3.1 traitant de la modélisation de la hauteur de flamme. Dans cette expérience, les mesures des températures dans le panache sur l'axe du foyer aux hauteurs de 13,5, 11,2, 8,1 et 5,1 m sont comparées aux valeurs obtenues avec FDS et à celles calculées par les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad. Les vitesses simulées ne seront comparées qu'aux valeurs des corrélations car aucune mesure expérimentale n'est disponible. Dans l'expérience étudiée, le débit calorifique vaut 3 650 kW. Par défaut, FDS considère que 35% de l'énergie dégagée est rayonnée lorsque le modèle LES est utilisé [McGRATTAN 2006]. Pour évaluer la température et la vitesse dans le panache grâce à la corrélation d'Heskestad, la même part rayonnée est retenue et par conséquent, 65% du débit calorifique total est utilisé pour le calcul. Le diamètre caractéristique équivalent du foyer carré de 1,80 m de côté vaut 2,03 m ; son origine virtuelle est en 0,13 m.

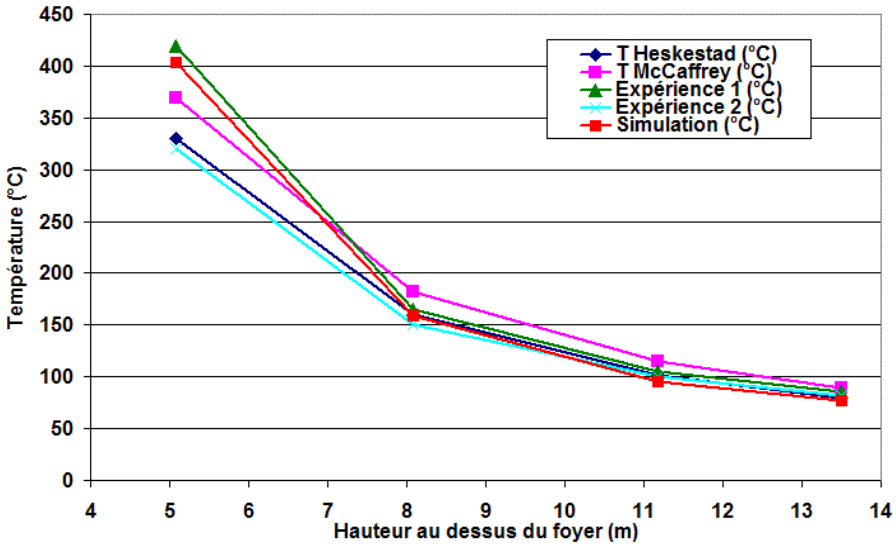
Les données d'entrée pour FDS sont identiques à celles présentées dans le paragraphe 3.3.3.3.1.

3.3.4.2.2 Sensibilité à la taille de maille de la température dans le panache

Dans un premier temps, seul le cas maillé le plus finement avec des cellules de 8 cm équivalant à un R^* de 0,05 est étudié. Les températures dans le panache sur l'axe du foyer sont moyennées lorsque la phase de croissance de la puissance du foyer est achevée, c'est-à-dire après 10 s environ. Elles sont ensuite comparées aux valeurs calculées avec les corrélations d'Heskestad et de McCaffrey (cf. tableau 79 et graphique 80).

Hauteur au-dessus du foyer (m)	Expérience 1 (°C)	Expérience 2 (°C)	Heskestad (°C)	McCaffrey (°C)	Simulation – R^*=0,05 (°C)
13,5	86	82	79	89	77
11,2	105	100	102	115	95
8,1	165	150	160	182	159
5,1	420	320	330	369	404

79. *Températures dans le panache pour la simulation R^* = 0,05, l'expérience et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad*



80. *Températures dans le panache pour la simulation R^* = 0,05, l'expérience et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad, une fois le régime établi*

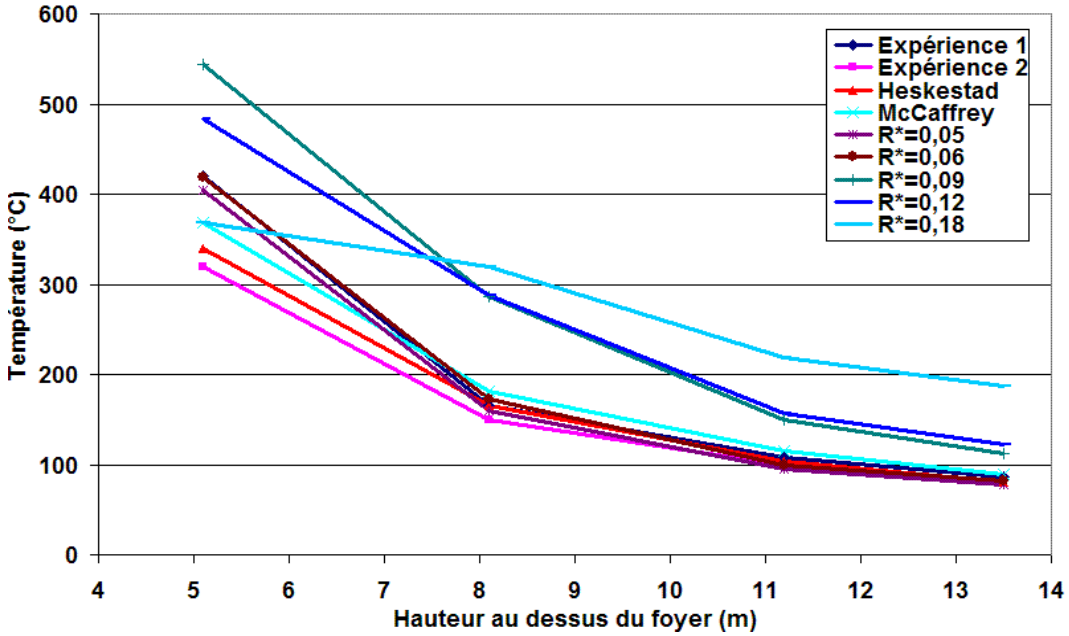
Pour les trois points de mesure situés les plus hauts par rapport au foyer (13,5, 11,2 et 8,1 m), les températures obtenues par simulations, celles par les corrélations d'Heskestad et de McCaffrey et celles mesurées lors des tests sont du même ordre. Pour le point de mesure situé à 5,1 m de hauteur,

l'accord est moins bon mais reste raisonnable, surtout lorsqu'il est remarqué qu'il existe un écart non négligeable entre les deux mesures expérimentales. Ces dernières encadrent les valeurs simulées et calculées par les corrélations.

Par contre, le tableau 81 et le graphique 82 montrent qu'il existe une forte dépendance des résultats à la taille de maille. La convergence en fonction de la taille de maille est atteinte dès que des cellules inférieures à 10 cm sont utilisées. Cela équivaut à un R^* égal à 0,06. Pour des mailles de taille supérieure (15 cm et 20 cm), une nette surestimation de la température d'environ 35 % est observée. Le calcul utilisant un maillage de 30 cm surestime également les températures mais le profil de la courbe de température n'a plus la même forme que celui des autres courbes.

Hauteur au-dessus du foyer (m)	Expérience 1 (en °C)	Expérience 2 (en °C)	Heskestad (en °C)	McCaffrey (en °C)	R^*=0,05 (en °C)	R^*=0,06 (en °C)	R^*=0,09 (en °C)	R^*=0,12 (en °C)	R^*=0,18 (en °C)
13,5	86	82	81	89	77	82	112	129	187
11,2	105	100	104	115	95	100	149	157	218
8,1	165	150	165	182	159	173	286	288	319
5,1	420	320	339	369	404	418	544	483	369

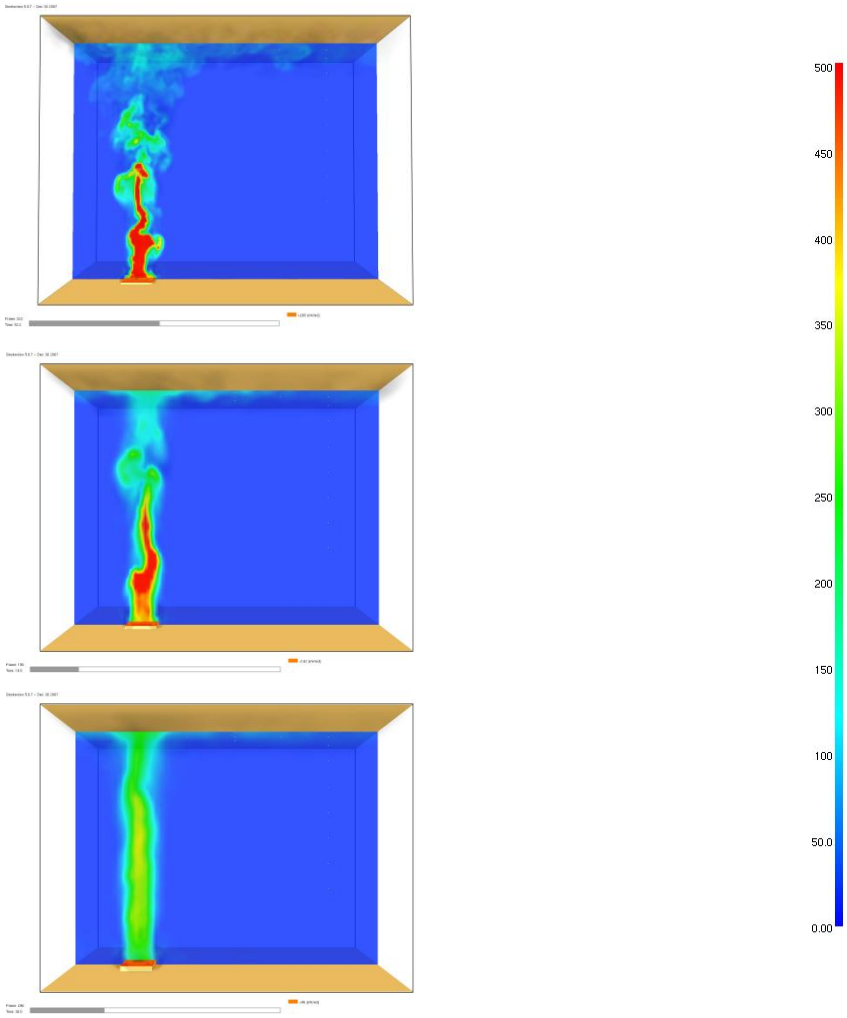
81. *Influence de la taille de maille sur les températures dans le panache sur l'axe du foyer en régime établi*



82. *Températures dans le panache sur l'axe du foyer en régime établi*

En regardant les profils de température (voir les coupes 83), la différence d'aspect dans le panache est très remarquable entre les cas ayant un R^* de 0,06 et 0,12 par rapport au cas 0,18. Ce dernier n'a plus du tout l'aspect d'une flamme turbulente mais plutôt celui d'une colonne ascendante d'air chaud dans laquelle les températures sont homogènes et nettement inférieure aux valeurs d'une température de flamme de cette taille. Comme cela a été évoqué précédemment (cf. § 3.3.2.2.3), il existe une limite supérieure au-dessus de laquelle la simulation de l'écoulement n'est plus physique. Pour l'écoulement dans le panache, cette limite est un R^* de 0,18.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

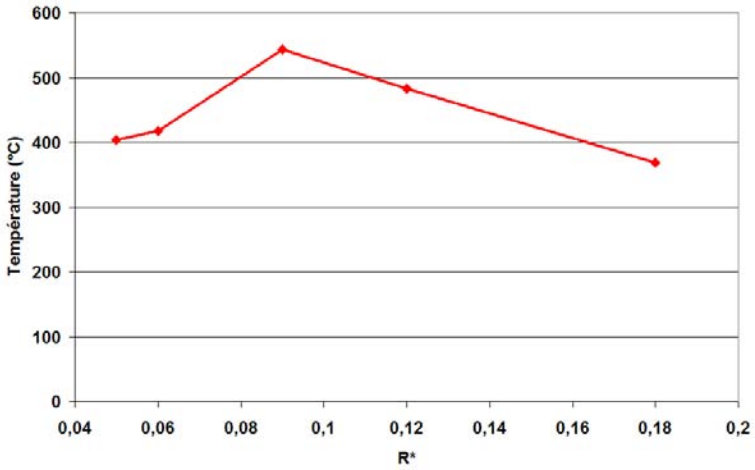


83. *Température sur l'axe du foyer pour les cas utilisant des mailles de 10 cm (R^*=0,06), 20 cm (R^*=0,12) et 30 cm (R^*=0,18)*

Il est difficile d'expliquer les différences apparaissant entre chacun des cas lorsque seule la taille de maille change d'un calcul à l'autre. La diffusion de sous-maille est proportionnelle à la taille des mailles. Ainsi, à un maillage grossier est associée une forte diffusion. Par conséquent, un maillage grossier aurait tendance à surévaluer le mélange entre l'air frais et les gaz de combustion et ainsi, sous-évaluer les températures dans le panache. Le phénomène inverse est observé : plus le maillage est grossier, plus la température est surestimée. Comme lors de l'étude des hauteurs de flamme dans les paragraphes précédents, les corrections faites sur la flamme, et en particulier la redistribution du débit calorifique, biaiseraient l'analyse des variations de température en fonction de la taille de maille.

En observant le tableau 81, une augmentation nette de la température avec la taille de maille pour les points de mesure situés à 8,1, 11,2 et 13,5 m est visible. Ce n'est pas le cas pour le point à 5,1 m où la température augmente en passant d'un calcul utilisant des mailles de 8 à 10 cm ainsi que de 10 à 15 cm, mais la température diminue ensuite lorsque les tailles de maille continuent encore à augmenter en passant de 15 à 20 cm et de 20 à 30 cm (voir le graphique 84). Cela s'explique par la variation de la hauteur de flamme en fonction du maillage. En effet, il a été vu au paragraphe 3.3.3 que cette hauteur augmente avec la taille des cellules. Ainsi, pour les trois maillages les plus grossiers (R^* valant 0,09, 0,012 et 0,018), le point de mesure placé à 5,1 m est plongé dans les flammes. La température de flamme étant en théorie supérieure à celle du panache, la température à 5,1 m devrait donc augmenter avec la taille de maille. Mais ce n'est pas le cas car une erreur sur la température de flamme est faite lorsque le maillage est trop grossier (voir le paragraphe 3.3.3).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



84. *Température à 5,1 m en fonction du R* en régime établi*

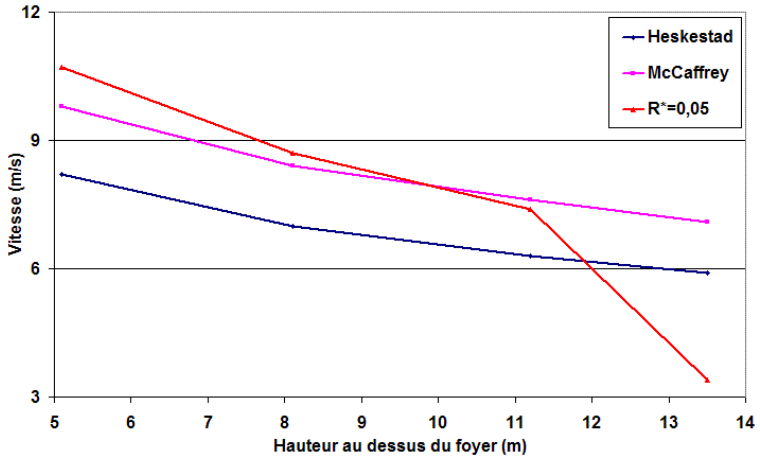
3.3.4.2.3 Sensibilité à la taille de maille de la vitesse dans le panache

Aux quatre hauteurs, les vitesses sont moyennées sur l'intervalle de temps compris entre la fin de la phase de croissance du débit calorifique et la fin de l'essai. Ces valeurs sont ensuite comparées aux corrélations d'Heskestad et de McCaffrey (cf. tableau 85 et graphique 86).

Sur la figure 86, il est possible de remarquer que pour le point le plus proche du plafond la vitesse donnée par FDS est plus faible que les valeurs calculées par les corrélations. Ceci s'explique par la proximité de la paroi ; à la verticale du panache, immédiatement sous le plafond, l'écoulement est dévié de sa trajectoire puisqu'il passe d'un mouvement majoritairement ascendant à un autre plus horizontal. Les corrélations utilisées ne sont tout simplement plus valables en ce point. Pour les trois autres points de mesure situés dans le panache, FDS surévalue toujours la vitesse par rapport à la corrélation d'Heskestad. L'écart relatif augmente en s'approchant du foyer en passant de 18 à 30 % de 11,2 à 5,1 m. Par rapport à la corrélation de McCaffrey, l'écart relatif augmente également en s'approchant du foyer en passant de 3 à 10 % de 11,2 à 5,1 m. Il est cependant beaucoup plus acceptable pour l'application en investigation.

Hauteur au-dessus du foyer (m)	Heskestad (m/s)	McCaffrey (m/s)	Simulation (m/s) – *R**=0,05
13,5	5,9	7,1	3,4
11,2	6,3	7,6	7,4
8,1	7	8,4	8,7
5,1	8,2	9,8	10,7

85. *Vitesses moyennées dans le panache pour la simulation R* = 0,05 et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad en régime établi*



86. *Vitesses moyennées dans le panache pour la simulation R* = 0,05 et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad en régime établi*

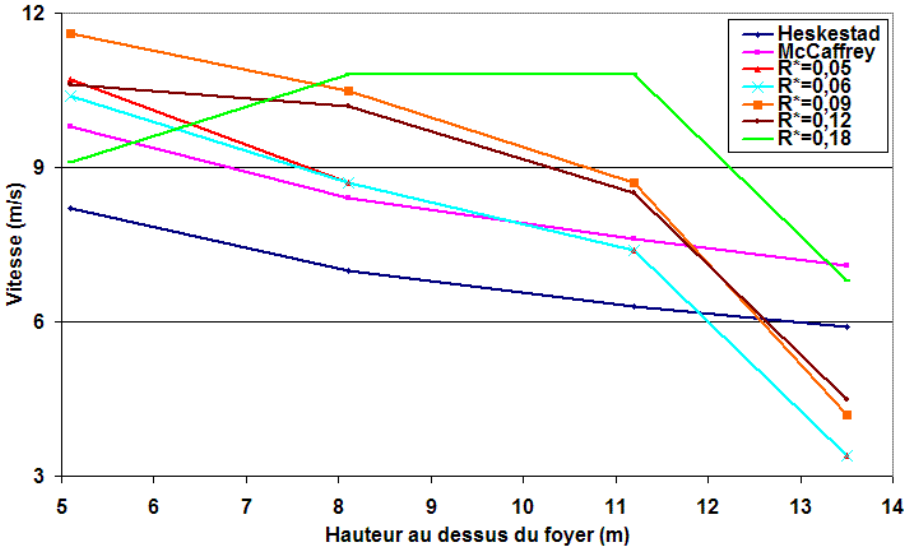
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Il est évident qu'une forte dépendance des résultats à la taille de maille utilisée est obtenue (voir la figure 88). Au contraire de la température, il n'est pas facile de mettre en avant une tendance des variations de la vitesse en fonction de la taille de maille. Une convergence en fonction de ce paramètre est pourtant atteinte dès que le R^* vaut 0,06. Les cas où le R^* est inférieur à cette valeur sont les cas où les écarts relatifs sont les plus faibles par rapport aux deux corrélations.

Comme pour la température, le profil de vitesse du maillage le plus grossier (R^*=0,18) n'est pas physique et cela défini ainsi une limite supérieure extrême.

Hauteur au-dessus du foyer (m)	Heskestad (m/s)	McCaffrey (m/s)	Simulation (m/s) – R^*=0,05	Simulation (m/s) – R^*=0,06	Simulation (m/s) – R^*=0,09	Simulation (m/s) – R^*=0,12	Simulation (m/s) – R^*=0,18
13,5	5,9	7,1	3,4	3,1	4,2	4,5	6,8
11,2	6,3	7,6	7,4	7,1	8,7	8,5	10,8
8,1	7	8,4	8,7	8,7	10,5	10,2	10,8
5,1	8,2	9,8	10,7	10,4	11,6	10,6	9,1

87. *Vitesses moyennées dans le panache à la verticale du foyer en régime établi*



88. *Vitesses moyennées dans le panache à la verticale du foyer en régime établi*

3.3.4.2.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille

Le constat est identique à celui effectué pour la température au paragraphe 3.3.3.3.4. Le meilleur compromis entre le temps de calcul et la qualité du résultat est obtenu pour le R^* égal à 0,06.

Taille de maille (cm)	R^*	Temps de calcul
30	0,18	40 min
20	0,12	4 h 40 min
15	0,09	14 h
10	0,06	2 j 14 h
8	0,05	4 j 4 h

89. *Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^**

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.4.3 Valeur optimale du R^* pour la modélisation de l'écoulement dans le panache

Les résultats en température et en vitesse des simulations dans le panache présentent une forte dépendance à la taille de maille. Cela renforce l'idée que, pour que FDS reproduise bien les phénomènes dans cette zone, il est essentiel d'utiliser un maillage suffisamment fin. Pour nos calculs, une convergence des résultats et une bonne adéquation avec les valeurs expérimentales sont observées lorsque R^* est de l'ordre de 0,06. Cette valeur est légèrement inférieure à celles proposées dans un processus de validation et de vérification de la version 4 de FDS [NUREG-1824 2007], où des maillages ayant des R^* compris entre 0,07 et 0,11 sont utilisés. Un maillage correspondant à un R^* de 0,07 n'a pas été testé sur notre cas expérimental, mais le cas de 0,09 donne des résultats dont l'écart relatif est trop élevé par rapport aux objectifs d'utilisation de la modélisation en investigation post incendie.

3.3.5 Modélisation de l'écoulement dans le jet sous plafond

Dans les premiers instants de l'incendie, une fois que, tout d'abord, la hauteur de flamme est correctement modélisée puis que, à son tour, l'écoulement dans le panache l'est aussi, le jet sous plafond formé par les gaz de combustion impactant le plafond doit également être simulé précisément car il est représentatif des écoulements dominant le début d'incendie. Ce paragraphe s'intéresse seulement au jet sous plafond dans un environnement non confiné représentatif des conditions rencontrées en début d'incendie pour des volumes relativement grands.

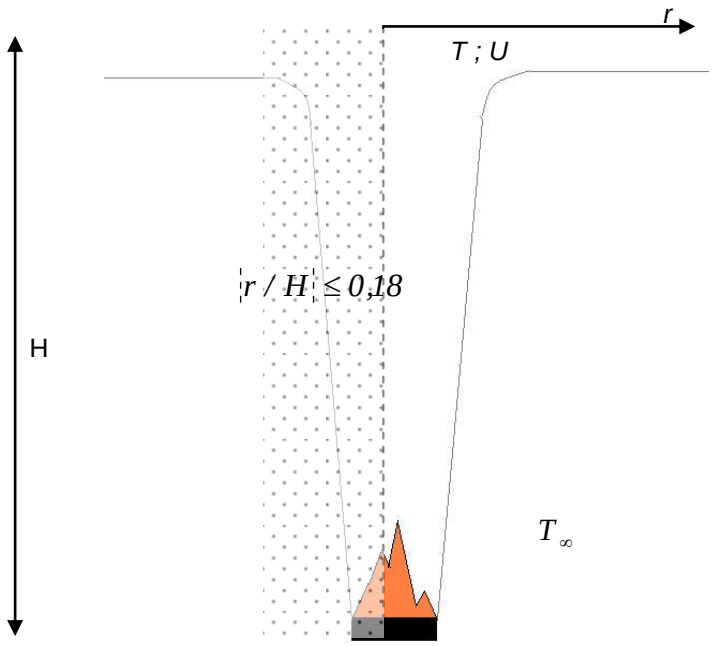
3.3.5.1 Étude bibliographique de l'écoulement dans le jet sous plafond

3.3.5.1.1 Corrélation d'Alpert

Alpert a travaillé sur des corrélations utilisées pour estimer pour un foyer stationnaire la vitesse et la température maximales des gaz dans la couche d'un jet sous plafond ainsi que l'épaisseur de cette couche [EVANS 1995]. Les résultats sont susceptibles de fournir des estimations pertinentes jusqu'à une distance radiale d'une ou deux fois la hauteur du plafond. Ses travaux sont basés sur des feux de à base de combustible assez variés avec des débits thermiques allant de 668 kW à 98 MW sous un plafond de 4,6 à 15,5 m. Les corrélations sont données par les relations (53) à (56). Dans celles-ci, la température T, la vitesse u, la hauteur sous plafond H et la position radiale r sont en unités SI. Le débit thermique total $\dot{Q}$ est, quant à lui, donné en kW. Les deux relations (53) et (55) sont indépendantes de r ; elles correspondent à la zone d'impact des gaz sur le plafond c'est-à-dire l'emplacement où un écoulement majoritairement vertical devient un écoulement majoritairement horizontal.

Ces corrélations utilisent le débit calorifique total du foyer. Cependant, c'est la part de ce débit imputable à la convection qui est responsable des forces d'Archimède entrant en jeu dans le phénomène de jet sous plafond. L'approximation que cette part de convection du débit thermique est proportionnelle au débit calorifique total est faite. Ces corrélations ne sont valables que dans les premiers instants après l'allumage du feu, c'est-à-dire tant que l'écoulement sous le plafond peut être considéré comme non confiné ; il n'y a pas alors de couche chaude établie en partie haute.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



90. *Représentation schématique du foyer débitant sous un plafond*

(53). pour r/H ≤ 0,18 :

$$T - T_\infty = \frac{16{,}9\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}$$

(54). pour r/H > 0,18 :

$$T - T_\infty = \frac{5{,}38(\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}$$

(55). pour r/H ≤ 0,15 :

$$u = 0{,}96\left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{1/3}$$

(56). pour r/H > 0,15 :

$$u = \frac{0{,}195\dot{Q}^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}}$$

Des parois placées à proximité du feu affectent les températures et les vitesses du jet sous plafond. Ces corrélations ne sont valables que si la paroi la plus proche de la source est à une distance d'au moins 1,8 fois la hauteur du plafond. Si le foyer est placé près d'une paroi, un facteur correctif est applicable pour tenir compte du blocage de l'entraînement de l'air dans le panache par le mur. Ainsi si la source est placée contre un mur, il est possible de remplacer $\dot{Q}$ par $2\dot{Q}$ dans les égalités précédentes, et si la source est placée en coin, $4\dot{Q}$ est utilisé pour $\dot{Q}$. Cela repose sur un raisonnement simplifié s'appuyant sur des aspects de symétrie. L'approximation très grossière ne semble pas toujours justifiée, par exemple lorsque les échanges thermiques aux parois sont non négligeables.

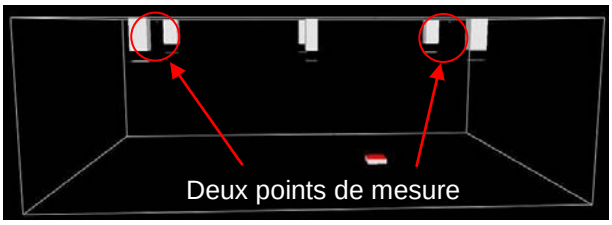
3.3.5.1.2 Modélisation de l'écoulement dans le jet sous plafond

Une étude [IERARDI 2003] a été menée avec la version 3 de FDS. Elle donne des résultats corrects lorsque les simulations sont comparées aux corrélations d'Alpert. Le premier cas étudié est un foyer d'éthanol de 1 m de côté qui débite une puissance de 670 kW sous un plafond de 7 m de haut ; le second est une source d'heptane de 0,6 m de côté débitant 1 000 kW sous 7,2 m de plafond. Cependant, les tailles de cellules utilisées pour les simulations correspondent à des R^* très élevés variant de 0,24 à 0,63. C'est pourquoi il est légitime de se demander si la convergence des calculs en fonction de la taille de maille a été atteinte. Dans le rapport final de validation et de vérification de la version 4 de FDS [NUREG-1824 2007], les auteurs s'intéressent également aux températures dans le jet sous plafond. Ils comparent des données expérimentales à des calculs FDS pour deux séries de tests : le FM/SNL et l'ICFMP BE #3.

- FM/SNL

Le cadre expérimental de cette étude a déjà été présenté dans le paragraphe 3.3.4.1.3. La température des gaz dans le jet sous plafond est mesurée en deux points comme illustré sur l'image 91. Pour deux des trois essais, FDS donne des températures dans le jet sous plafond comprises dans le domaine d'incertitude des mesures (Voir le graphique 93 sur lequel l'incertitude de mesure est majorée à 16 %). Pour le troisième essai, FDS sous-évalue la température d'environ 20% mais cela est certainement dû, selon les auteurs, à une source de chaleur qui est moins bien caractérisée et qui est différente de celle des deux premiers essais.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

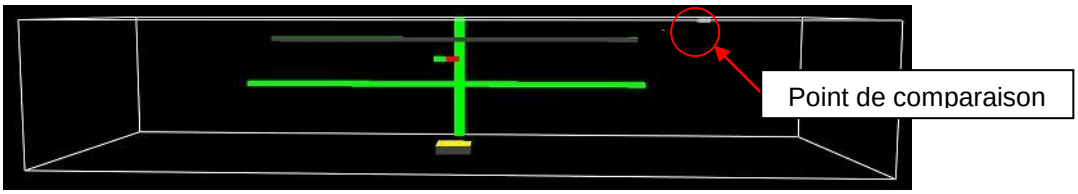


91. *Essai FM/SNL : position des points de mesure utilisés pour la confrontation avec l'expérience des valeurs calculées par FDS [NUREG-1824 2007]*

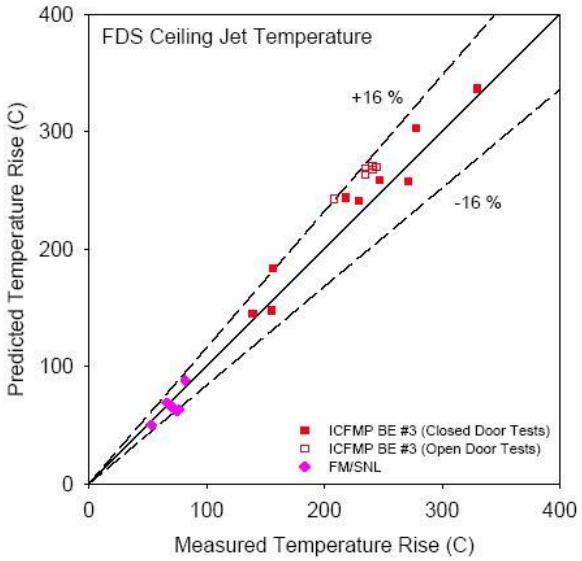
- ICFMP BE #3

Le cadre expérimental de cette étude a déjà été présenté précédemment 3.3.3.2.2. Pour ces tests, qu'ils soient en condition porte ouverte ou fermée[11], FDS donne au point de comparaison (emplacement indiqué sur l'image 92) des températures dans le jet sous plafond comprises dans le domaine d'incertitude des mesures sauf pour deux cas. Pour le premier, les conditions de ventilation lors de l'essai ne sont pas parfaitement caractérisées, c'est pourquoi les auteurs de l'étude ont eu des difficultés pour les simuler correctement. Pour le second cas, le test n'a été réalisé qu'une seule fois, il est donc difficile de tirer des conclusions sur la cause des erreurs.

Les explications avancées dans l'étude [NUREG-1824 2007] sont que cela peut également être causé par un manque de résolution du maillage qui, à proximité du foyer, est de l'ordre de 10 cm selon toutes les directions et qui se relâchent horizontalement en s'éloignant de la source. Il n'y a donc que quelques cellules de 10 cm qui couvrent sur sa hauteur, l'écoulement du type jet sous plafond. Ces maillages ont des R^* variant de 0,08 à 0,16 selon la puissance du foyer. Par conséquent, le mélange entre les gaz chauds et froids dans le jet est légèrement sous-évalué et la température est ainsi surévaluée.



92. *Position du point de mesure utilisé pour la confrontation avec l'expérience dans le calcul FDS du cas ICFMP BE#3 [NUREG-1824 2007]*



93. *Températures calculées avec FDS dans le jet sous plafond en fonction des températures mesurées [NUREG-1824 2007]*

[11] 9 cas sur 15

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les feux sous-ventilés (ventilation mécanique à l'arrêt et porte fermée mais avec une surface de fuite) sont reproduits correctement en ce qui concerne les températures dans le jet sous plafond (carré rouge plein sur la figure 93). Le compartiment n'est pas considéré comme totalement hermétique puisqu'une surface de fuite est utilisée. Par contre, en aucun cas, la fonction LEAKAGE n'est mise en œuvre dans ce cas test ICFMP BE #3.

Il semble important de compléter ces quelques recherches bibliographiques par une autre étude afin de déterminer plus précisément un critère indiquant la qualité du maillage. De plus, les températures n'ont été comparées que sur trois points, ce qui semble insuffisant.

3.3.5.2 Cas d'application de l'écoulement dans le jet sous plafond

3.3.5.2.1 Présentation du cas expérimental et des choix de calcul

L'expérience décrite au paragraphe 3.3.3.3.1 a été utilisée pour étudier, en fonction de la taille de maille, les vitesses et les températures dans un jet sous plafond avec FDS. Bien que cet essai ait déjà été utilisé pour étudier la hauteur d'une flamme libre (objet du paragraphe 3.3.3), il peut également servir pour étudier un jet sous plafond non confiné. L'écoulement en jet sous plafond ne perturbe pas l'écoulement en amont où une étude sur les hauteurs de flamme et sur les vitesses et les températures dans le panache a déjà été menée.
Alpert a établi ses corrélations pour des hauteurs de plafond comprises entre 4,6 et 15 m et pour des foyers de puissances comprises entre 668 kW et 98 MW. Les corrélations d'Alpert peuvent être utilisées dans leur domaine de validité en utilisant les données de l'expérience de Walton [WALTON 1993] car la hauteur sous plafond est de 14 m et le foyer a une puissance de 3 680 kW.

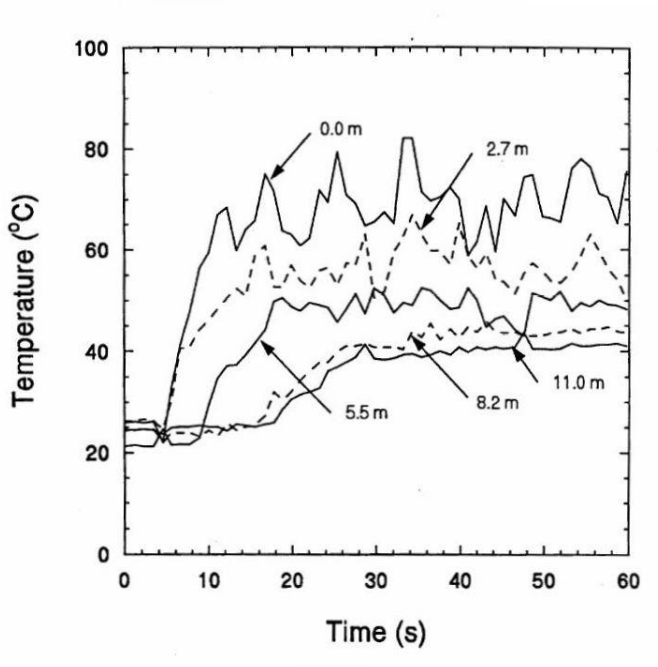
Dans l'expérience [WALTON 1993], il y a entre les distances radiales de 0 et 11 m des poutres de 254 mm de hauteur qui sont disposées sous le plafond, perpendiculairement à l'écoulement. Ces poutres ne représentant que 1,8 % de la hauteur totale, leur influence sur les températures et la dynamique de l'écoulement est supposée négligeable : elles ne seront pas introduites dans les simulations. Les corrélations d'Alpert peuvent ainsi être utilisées dans leur domaine de validité. Les vitesses mesurées auraient pu être plus perturbées que les températures par la présence de ces poutres. Le temps de remplissage des cantons aurait du être étudié pour supposer l'impact des poutres négligeable. Cependant, cela n'est pas effectué dans cette étude car la mesure des vitesses n'est pas disponible.

Les choix de simulation et les maillages utilisés sont identiques à ceux présentés dans le paragraphe 3.3.3.3.1.

3.3.5.2.2 Sensibilité à la taille de maille de la température dans le jet sous plafond

Lors de l'essai, les températures mesurées fluctuent beaucoup entre 20 et 60 s (voir le graphique 94). Pour les comparer avec la simulation et la corrélation d'Alpert, elles ont été moyennées sur cet intervalle de temps. Il est fait de même avec les températures simulées qui fluctuent également beaucoup (Voir les graphiques 96 à 100).

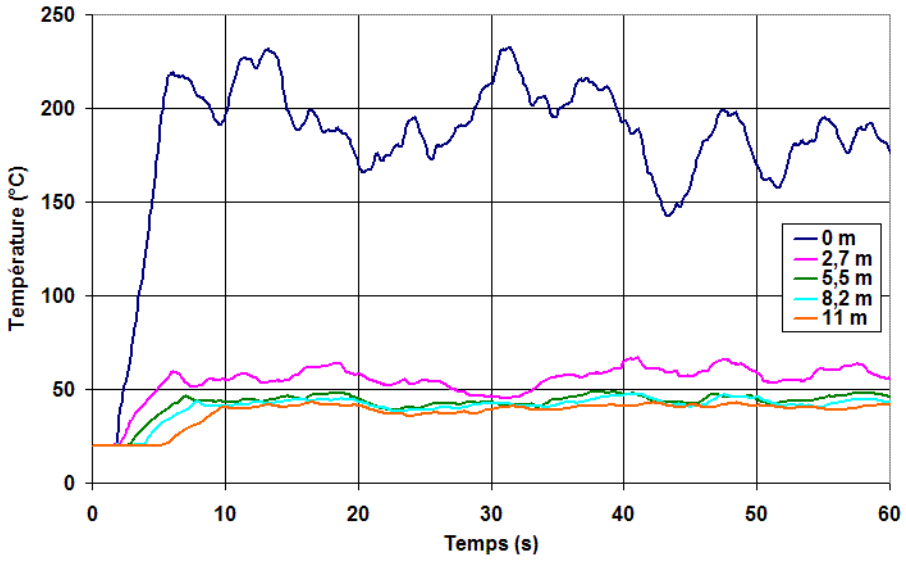
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



94. *Températures mesurées lors de l'essai en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m [WALTON 1993]*

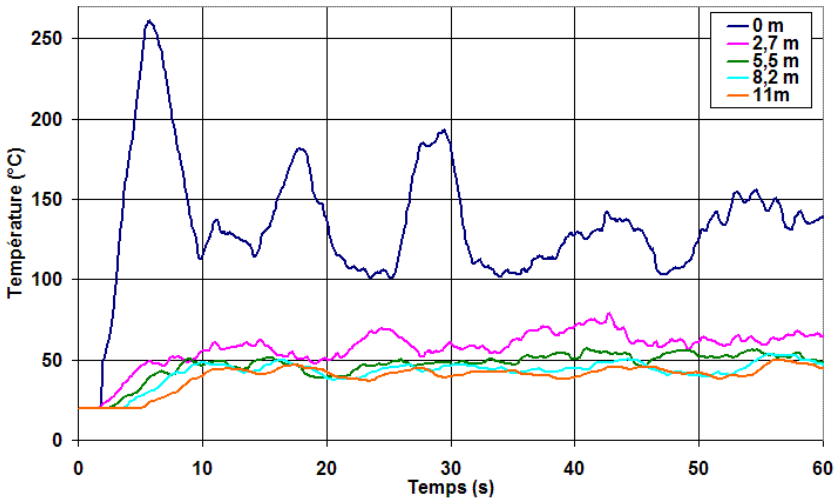
Distance radiale (m)	Température (°C)						
	R^*=0,05	R^*=0,06	R^*=0,09	R^*=0,12	R^*=0,18	Alpert	Expérience
0	77	82	112	129	187	69,3	69
2,7	58	60	61	63	56	67	57
5,5	46	47	50	51	44	49,2	49
8,2	40	42	44	45	43	42,4	42
11	37	38	41	42	40	38,4	39

95. *Moyenne des températures entre 20 et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour l'expérience, la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm*

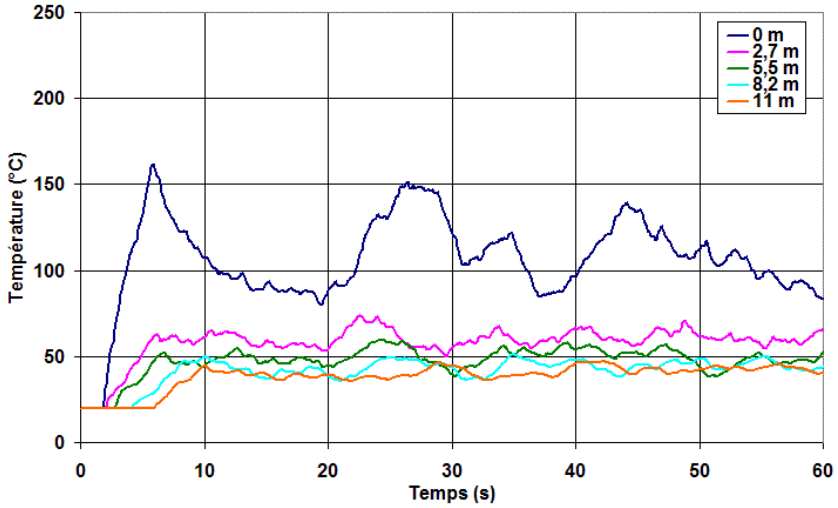


96. *Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 30 cm (R^*=0,18)*

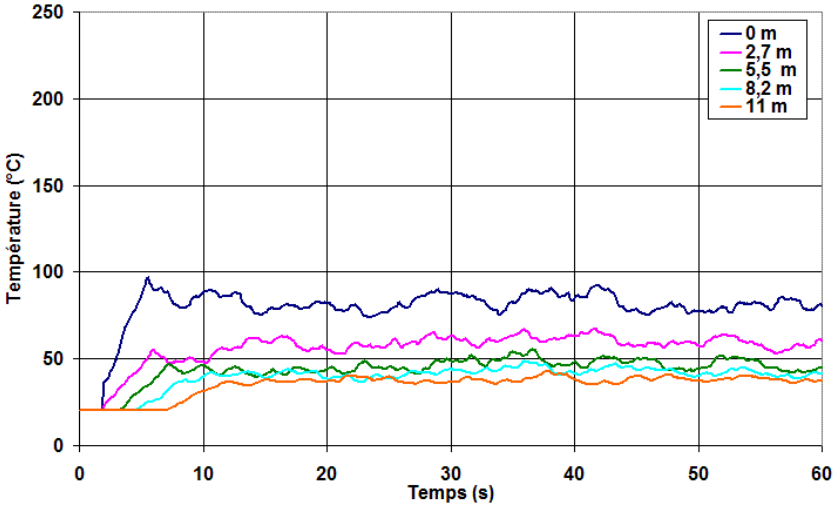
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



97. *Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 20 cm (R^*=0,12)*

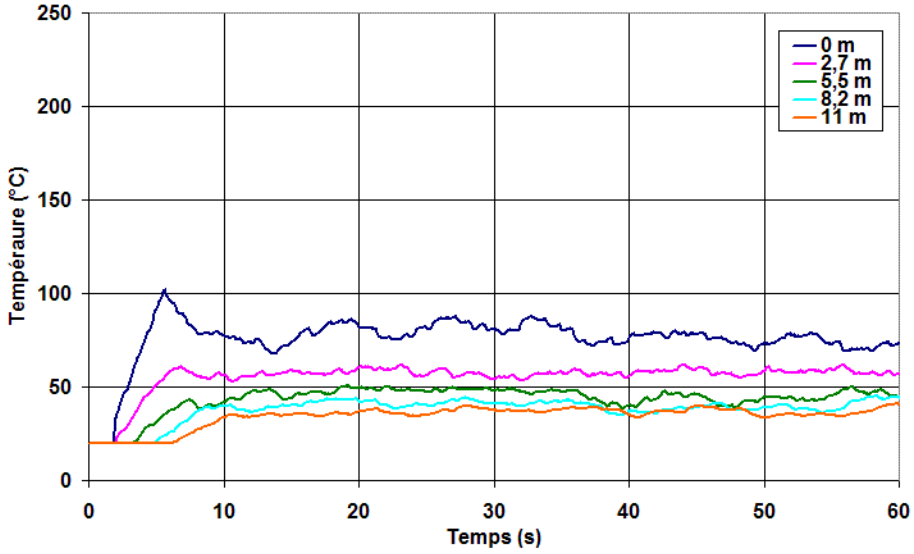


98. *Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 15 cm (R^*=0,09)*

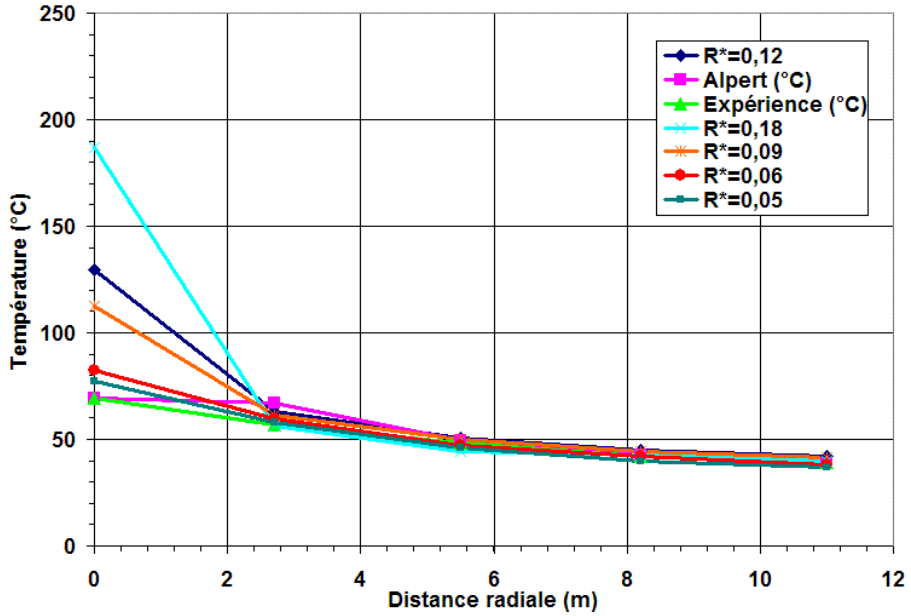


99. *Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 10 cm (R^*=0,06)*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



100. *Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 8 cm (R^*=0,05)*



101. *Moyenne des températures simulée entre 20 et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour l'expérience, la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm*

Pour la température, il y a convergence du calcul en fonction de la taille de maille dès que R^* vaut 0,06.

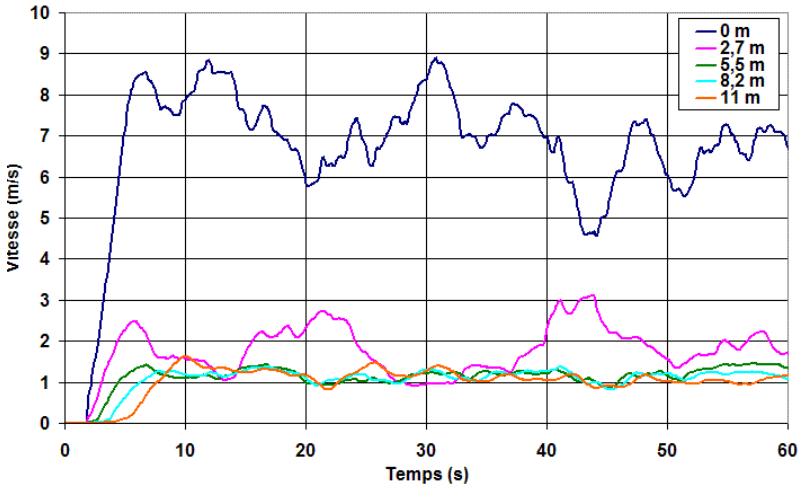
La corrélation d'Alpert est séparée en deux domaines suivant la valeur du rapport *r/H*. Lorsque ce rapport est inférieur à 0,18, l'expression de la température est indépendante de *r*. Cela correspond à la zone dans laquelle l'écoulement passe d'un mouvement majoritairement vertical à un autre principalement horizontal. Dans l'expérience, il n'y a qu'un seul point de mesure situé dans cette zone, celui-ci est à la verticale du brûleur c'est-à-dire à une distance radiale de 0 m. Le second point de mesure est à 2,7 m, soit 20 cm après la distance radiale à partir de laquelle, selon Alpert, les valeurs des températures deviennent dépendantes de *r*.
C'est sur le point de mesure sur l'axe du brûleur que les écarts relatifs sont les plus élevés pour les températures. En effet, seules les simulations ayant un R^* égal à 0,05 et 0,06 ont un écart relatif acceptable inférieur à 15 %. Pour les autres simulations, les écarts augmentent avec la taille de maille avec 38 % pour un R^* de 0,09, 47 % pour un R^* de 0,12 et 63 % pour un R^* de 0,18. Pour les autres points radiaux (2,7, 5,5, 8,2 et 11 m), les écarts sont tous inférieurs à 10 %, quelles que soient les

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

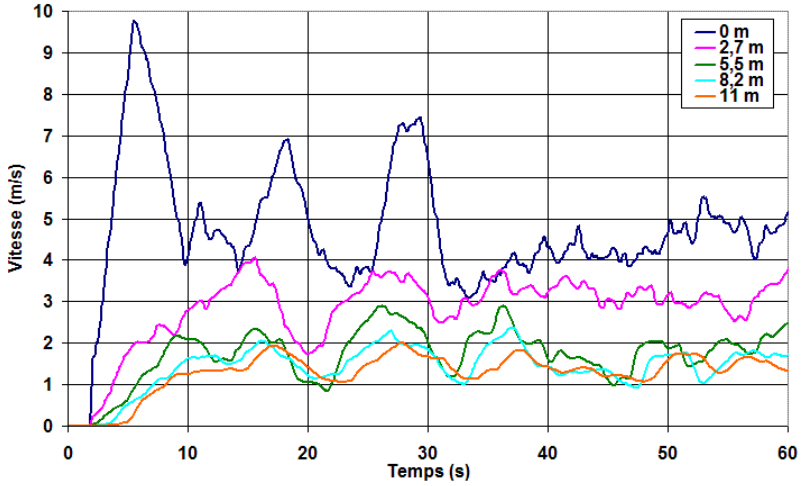
tailles de cellules utilisées pour les calculs. Cela est intéressant car, même si les températures dans le panache ainsi que les hauteurs de flamme sont surévaluées avec les maillages les plus grossiers, les températures dans le jet sous plafond sont proches des valeurs expérimentales. L'épaisseur de l'écoulement sous plafond se situe dans la limite inférieure des valeurs acceptables pour être caractéristique d'un jet sous plafond c'est-à-dire 5 % de la distance du foyer au plafond. Il est fort probable que des différences plus marquées auraient été visibles entre les températures de chaque simulation si l'écoulement en jet sous plafond avait été d'une taille plus importante ou si le plafond avait été plus bas.
En conclusion pour la température, le maillage à la verticale du foyer doit être très fin pour pouvoir reproduire les phénomènes dynamiques et les échanges thermiques qui apparaissent dans la zone d'impact entre les gaz du panache et le plafond. Seules les simulations ayant un R^* inférieur à 0,06 semblent adaptées dans cette zone pour cette puissance de foyer. Plus généralement, seules les simulations utilisant un R^* de cet ordre pour un H/D^* égal à 11 sont adaptées pour obtenir des températures avec un écart relatif inférieur à 15 %.

3.3.5.2.3 Sensibilité à la taille de maille de la vitesse dans le jet sous plafond

Les données expérimentales en vitesse ne sont encore ici malheureusement pas disponibles car elles sont généralement plus difficilement mesurables que les températures. L'évaluation des résultats obtenus avec les simulations ne se fera donc qu'en les comparant avec la corrélation d'Alpert.

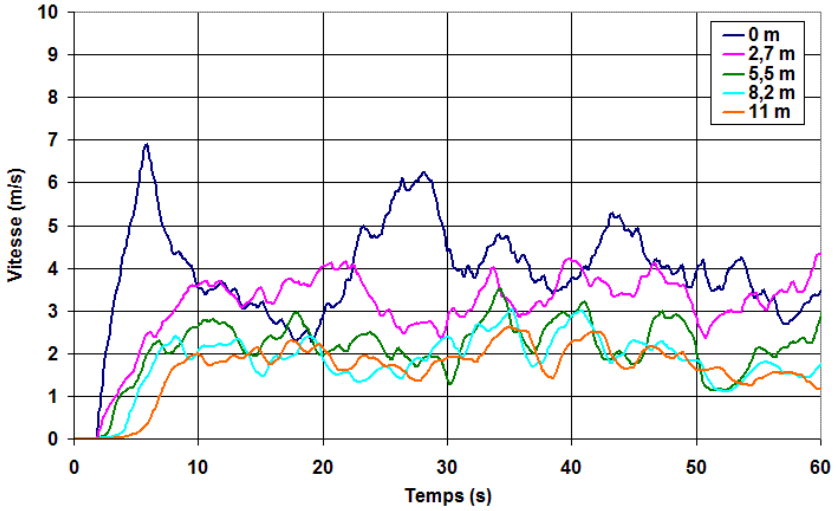


102. *Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 30 cm (R^*=0,18)*

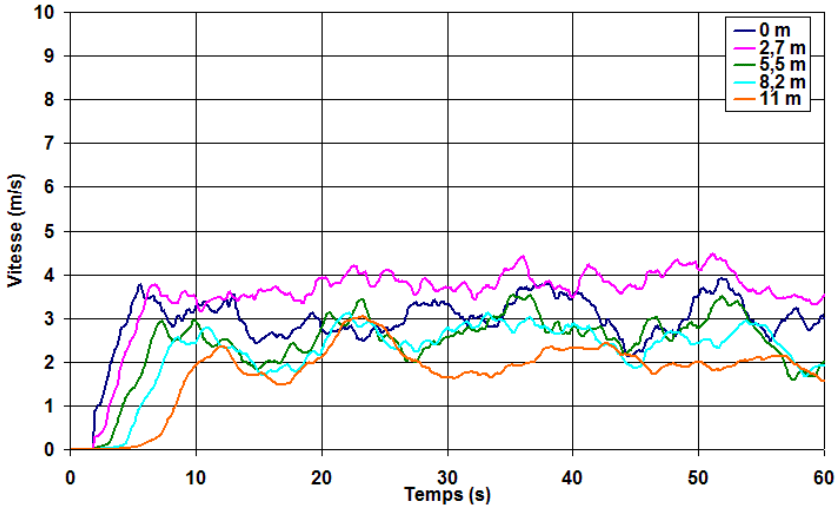


103. *Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 20 cm (R^*=0,12)*

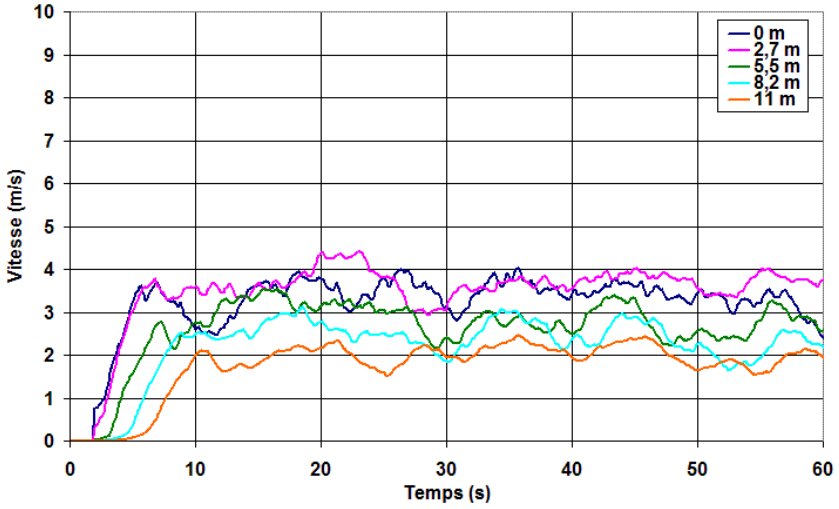
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



104. *Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 15 cm (R^*=0,09)*

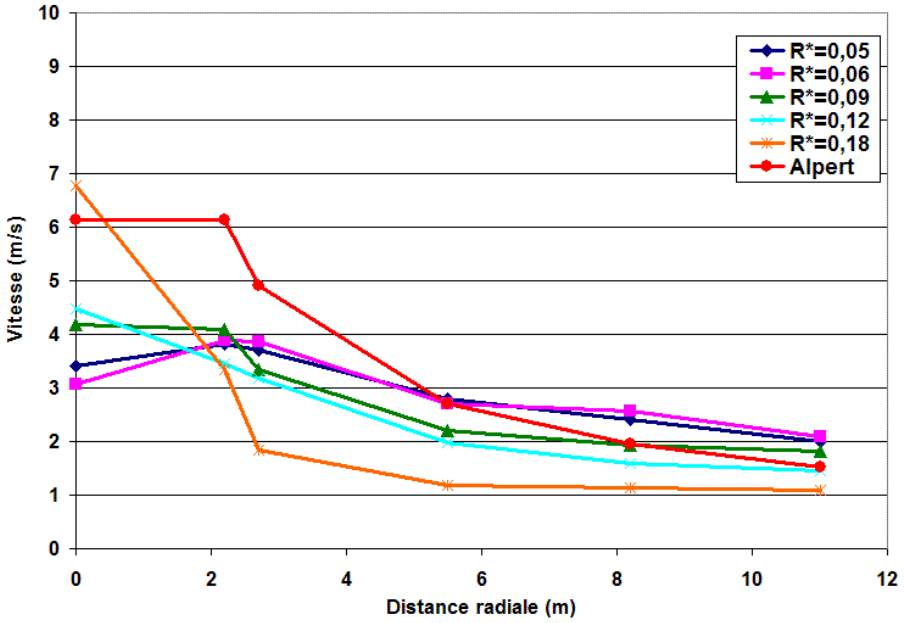


105. *Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 10 cm (R^*=0,06)*



106. *Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 8 cm (R^*=0,05)*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



107. *Moyenne des vitesses entre 20 s et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm*

Comme pour la température, il y a convergence de la vitesse en fonction de la taille de maille dès que R^* est inférieur ou égal à 0,06. Pour analyser les résultats il est intéressant, comme pour la température, de séparer le domaine en deux : lorsque la vitesse dans la corrélation d'Alpert ne dépend pas de la distance radiale, c'est-à-dire lorsque le rapport *r/H* est inférieur ou égal 0,15, et lorsqu'elle en dépend quand *r/H* est supérieur à 0,15. Dans ce second domaine, les résultats sont hiérarchisés par tailles de cellule, les plus petites donnant les vitesses les plus élevées. Alors que dans l'équivalent de cette zone pour les températures, les valeurs sont extrêmement proches les unes des autres quelle que soit la taille de cellule utilisée, les écarts entre les valeurs des vitesses sont beaucoup plus marqués. Cela peut éventuellement être expliqué par les températures assez faibles, inférieures à 80 °C, pour lesquelles il y a peu d'échanges thermiques entre les gaz du jet et le plafond.
Dans la première partie du domaine, le phénomène inverse est observé ; les cellules les plus petites donnent les vitesses les plus faibles. Cela est cohérent avec les observations faites sur les températures dans le panache (cf. § 3.3.4.2.3).
Cependant, de très fortes disparités apparaissent lorsque les valeurs des vitesses simulées sont comparées à celles calculées grâce à la corrélation d'Alpert. Au point de mesure à la verticale du brûleur, il y a par exemple un facteur 2 entre la vitesse d'Alpert et celles calculées avec des R^* de 0,05 et 0,06. Le point de mesure est situé dans une zone très turbulente et même si les vitesses sont moyennées sur des temps assez longs, cela n'explique pas une telle erreur. L'écart relatif par rapport à la corrélation d'Alpert tend alors à diminuer lorsque la distance radiale au centre du foyer augmente.

3.3.5.2.4 Sensibilité du temps de calcul à la taille de maille

Le constat est identique à ceux effectués aux paragraphes 3.3.3.3.4 et 3.3.4.2.4. Une convergence en fonction de la taille de maille est atteinte pour des R^* inférieurs à 0,06. Le meilleur compromis temps de calcul par rapport à la qualité du résultat est obtenu avec R^* égal à 0,06. Cependant, la qualité dans les résultats obtenus n'est pas aussi bonne pour la vitesse que pour la température surtout lorsque la distance radiale tend vers 0.

Taille de maille (cm)	R^*	Temps de calcul
30	0,18	40 min
20	0,12	4 h 40 min
15	0,09	14 h
10	0,06	2 j 14 h
8	0,05	4 j 4 h

108. *Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^**

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.5.3 Valeur optimale du R^* pour l'écoulement dans le jet sous plafond

À la verticale du panache et plus généralement dans la zone où $r/H \leq 0{,}18$, un maillage très fin est encore ici nécessaire pour reproduire correctement les phénomènes. Cela correspond, pour le cas présenté, à des maillages avec R^* inférieur ou égal à 0,06. Si ces conditions sont réalisées, les valeurs de température sont fournies par FDS avec un écart relatif maximum de l'ordre de 15% par rapport à l'expérience. Cet écart relatif maximum est obtenu à la verticale du brûleur. Dans le reste de l'écoulement de jet sous plafond, l'écart relatif est toujours inférieur à 10 %. Pour les puissances de feu étudiées et les hauteurs sous plafond choisies, les températures sont moins sensibles au maillage utilisé en s'éloignant du foyer et plus généralement lorsque $r/H > 0.18$. Le R^* peut même être poussé jusqu'à 0,18 si l'écoulement étudié est uniquement de type jet sous plafond. Cela est parfois envisageable dans de longues circulations horizontales par exemple.

Aucune référence bibliographique étudiée ne traite de la question des vitesses obtenues avec FDS dans le jet sous plafond. Dans notre cas d'étude, les vitesses simulées n'ont pu être comparées qu'avec celles calculées par la corrélation d'Alpert. Les résultats obtenus montrent une forte disparité, surtout lorsque la distance radiale tend vers 0. Ayant atteint une convergence en maillage lorsque R^* est inférieur à 0,06, réduire encore la taille de maille ne diminuera pas l'écart relatif de la vitesse simulée par rapport à la corrélation d'Alpert.

La valeur optimale du R^* pour l'étude de la température dans le jet sous plafond est donc de 0,06 dans le voisinage de la zone d'impact des gaz du panache sur le plafond. Mais cette valeur peut vite augmenter jusqu'à des valeurs de 0,12 voire 0,18 en s'éloignant du foyer. Il est important de remarquer que les vitesses ont tendance à être sous-évaluées à la verticale du foyer, avec un écart relatif des valeurs simulées par rapport à la corrélation d'Alpert pouvant atteindre 50%. En s'éloignant du foyer, aucune tendance à la sous ou la surévaluation n'est constatée. L'écart relatif maximum étant d'environ 30 % pour le maillage le plus fin à 11 m de l'axe du foyer.

Le tableau 109 récapitule la puissance des foyers et les caractéristiques des géométries utilisées lors des expérimentations pour évaluer les écoulements de jet sous plafond mais également l'écoulement dans le panache et les hauteurs de flamme. Pour l'étude de l'écoulement dans le jet sous plafond, les cas ICFMP BE #3, FM/SNL et Aircraft Hanger ont été utilisés. Pour que les conclusions de cette étude soient transposables à une autre configuration, il faut que les grandeurs caractéristiques telles que *H/D** Longueur/Hauteur ou largeur/Hauteur soient conservées. Ainsi, en transposant le cas ICFMP BE #3 ayant un H/D^* de l'ordre de 3 à une géométrie dont la hauteur sous plafond est de 2,7 m et le diamètre du foyer de 1,5 m, un foyer de 1 MW est obtenu. Cela correspondrait à la combustion d'un matelas dans une pièce d'habitation. Pour les foyers ayant des débits calorifiques supérieurs à 1 MW, les écarts relatifs des températures et des vitesses simulées par rapport aux mesures seraient certainement légèrement plus élevés. Cependant, les conclusions de cette étude seront supposées applicables à un local de taille plus modeste que ceux testés, tant que seuls les premiers instants de l'incendie sont étudiés.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Cas	Phénomène étudié	Hauteur sous plafond (m)	Surface au sol (m x m)	Débit calorifique du foyer (kW)	H/D^*	Largeur / Hauteur	Longueur / Hauteur
ICFMP BE #2	Hauteur de flamme	19	27 x 14	2 000 à 4 000	12-16	1,4	0,7
ICFMP BE #3	Hauteur de flamme	3,8	21,7 x 7,1	350 à 2 200	3-5	5,7	1,9
Aircraft Hanger	Hauteur de flamme	14	37,2 x 40,2	3 650	11	2,7	2,9
FM/SNL	Ecoulement dans le panache	6,1	18,3 x 12,2	516	9	3	2
ICFMP BE #2	Ecoulement dans le panache	19	27 x 14	2 000 à 4 000	12-16	1,4	0,7
Aircraft Hanger	Ecoulement dans le panache	14	37,2 x 40,2	3 650	11	2,7	2,9
FM/SNL	Jet sous plafond	6,1	18,3 x 12,2	516	9	3	2
ICFMP BE #3	Jet sous plafond	3,8	21,7 x 7,1	350 à 2 200	3-5	5,7	1,9
Aircraft Hanger	Jet sous plafond	14	37,2 x 40,2	3 650	11	2,7	2,9

109. *Récapitulatif des caractéristiques géométriques et physiques des essais étudiés issus de la bibliographie*

3.3.6 Raffinement du maillage

Le début de ce chapitre a eu pour but de déterminer, pour les besoins en investigations, la taille des cellules la plus appropriée pour simuler correctement les premiers instants d'un incendie. Pour cela, le nombre sans dimension R^* est de nouveau utilisé pour permettre de relier une taille de maille aux caractéristiques physiques d'un foyer telles que son diamètre effectif ou son débit calorifique. De manière générale, il a été déterminé précédemment qu'un R^* de l'ordre de 0,06 est nécessaire. Pour des puissances typiques de celles rencontrées en début d'incendie, cela correspond à des tailles de maille de l'ordre de 10 cm. Pour un feu de matelas d'une puissance de 1,5 MW, cela donne par exemple une taille de 7 cm. Appliquer cette taille de cellules à l'ensemble du domaine de calcul entraîne des temps de calcul extrêmement élevés si les lieux simulés sont volumineux. À titre d'exemple, sur cas fictif de la chambre d'hôtel (voir le paragraphe 3.3.2.2), quadrupler la densité du maillage entre un calcul comportant 135 000 mailles et un autre de 576 000 multiplie le temps de calcul par 7,3 en le faisant passer de 1 580 à 11 480 minutes. Il est donc important d'optimiser le maillage en ne cherchant à avoir un R^* de l'ordre de 0,06 que dans les zones où cela est nécessaire, c'est-à-dire, grossièrement, là où il y a de la combustion et là où il est important de simuler correctement les phénomènes aérauliques (amenées d'air, recirculations, …). Par conséquent, ce paragraphe teste deux méthodes susceptibles d'être utilisées pour raffiner un maillage : le raffinement horizontal et le raffinement par blocs.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

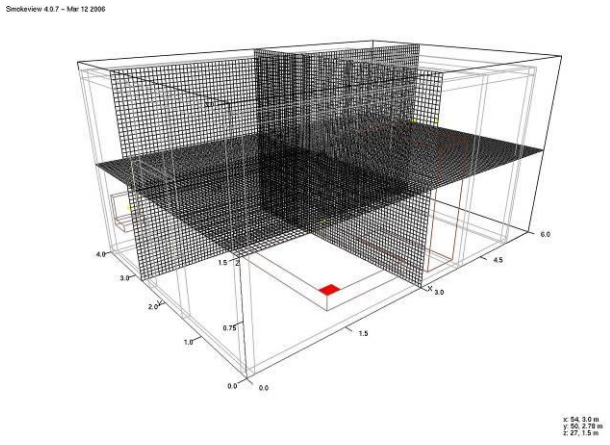
Quelques règles sont à respecter pour les maillages multiblocs [McGRATTAN 2006]. Les plus importantes sont les suivantes :

- Lorsqu'il y a plusieurs blocs, l'ordre dans lequel ils sont définis est important. En général, leurs caractéristiques doivent être données dans le script d'entrée de la simulation de celui qui a le maillage le plus fin à celui qui a le maillage le plus grossier. Ainsi, si deux blocs se chevauchent, celui qui est défini en premier a priorité sur le second.
- Il faut éviter de mettre la frontière d'un bloc là où une action critique est attendue, spécialement le feu. C'est pourquoi il faut essayer de positionner l'interface entre deux blocs relativement éloignée de tout phénomène complexe car les échanges d'information à travers la frontière d'un maillage ne sont pas aussi précis que les échanges à l'intérieur d'un même maillage.
- L'information provenant d'autres maillages est reçue seulement par la frontière extérieure d'un maillage donné. Cela signifie qu'un maillage qui est complètement incorporé à l'intérieur d'un autre reçoit l'information par sa frontière extérieure, mais le bloc plus grand ne reçoit aucune information de celui qui lui est incorporé. Le plus grand bloc réalise sa propre simulation et n'est pas affecté par le plus petit. Les détails de la grille la plus fine, en particulier ceux ayant un rapport avec la croissance et la propagation du feu ne seront pas échangés vers la grille la plus grossière.
- Lorsqu'une frontière entre blocs existe, il est important de regarder deux points pour s'assurer que le transfert d'information est effectué correctement. La première question à se poser est de savoir si la présence de cette frontière affecte sérieusement l'écoulement. Si c'est le cas, il faut essayer de l'éloigner de toutes zones d'activité. La seconde est de savoir si le saut de la taille d'une cellule au passage d'une frontière n'est pas trop grand. Si c'est le cas, il faut se demander si la perte d'information au passage d'un maillage fin à un plus grossier est tolérable.

Ces informations sont importantes pour connaître les tests à réaliser pour éprouver les maillages par blocs.

3.3.6.1 Cas de référence

Le cas de référence est basé sur la simulation d'une chambre d'hôtel fictive déjà utilisée au paragraphe 3.3.2.2. Ce cas est choisi car une étude de sensibilité à la taille de cellule a déjà été effectuée sur celui-ci lorsqu'un maillage uniforme est utilisé sur l'ensemble du domaine de calcul. Lors de cette étude de sensibilité, il a été trouvé que le maillage à utiliser dans cette configuration correspond à un R^* égal à 0,067 c'est-à-dire à des mailles de 5,6 cm. Il compte alors 108 cellules dans la direction *X*, 72 selon l'axe *Y* et 54 pour *Z* (voir l'image 110). Tous les résultats des autres configurations de maillages sont, par la suite, comparés à ce cas.

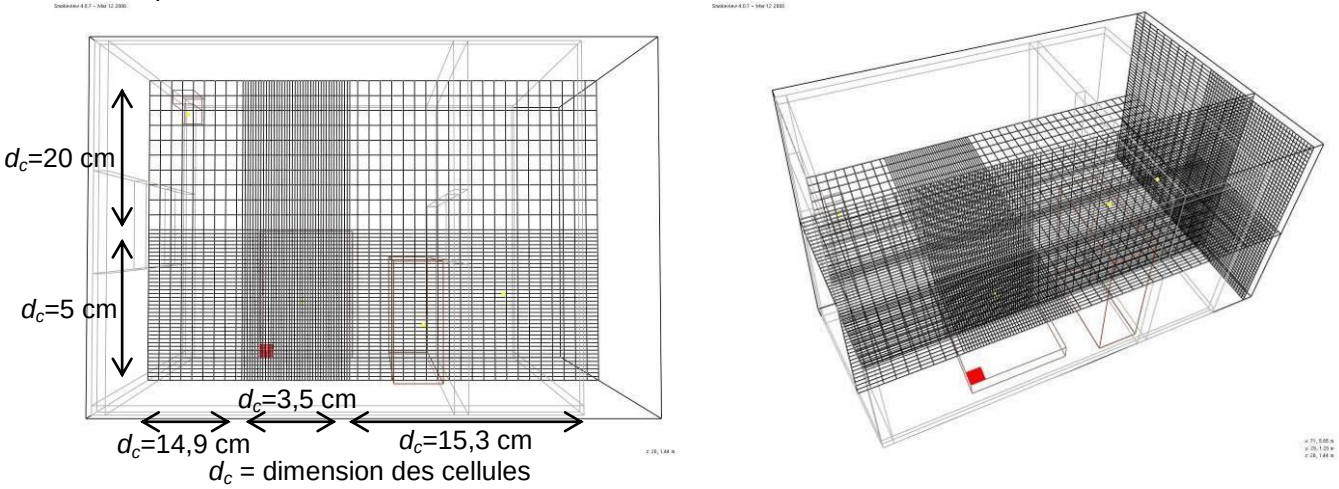


110. *Maillage du cas de référence*

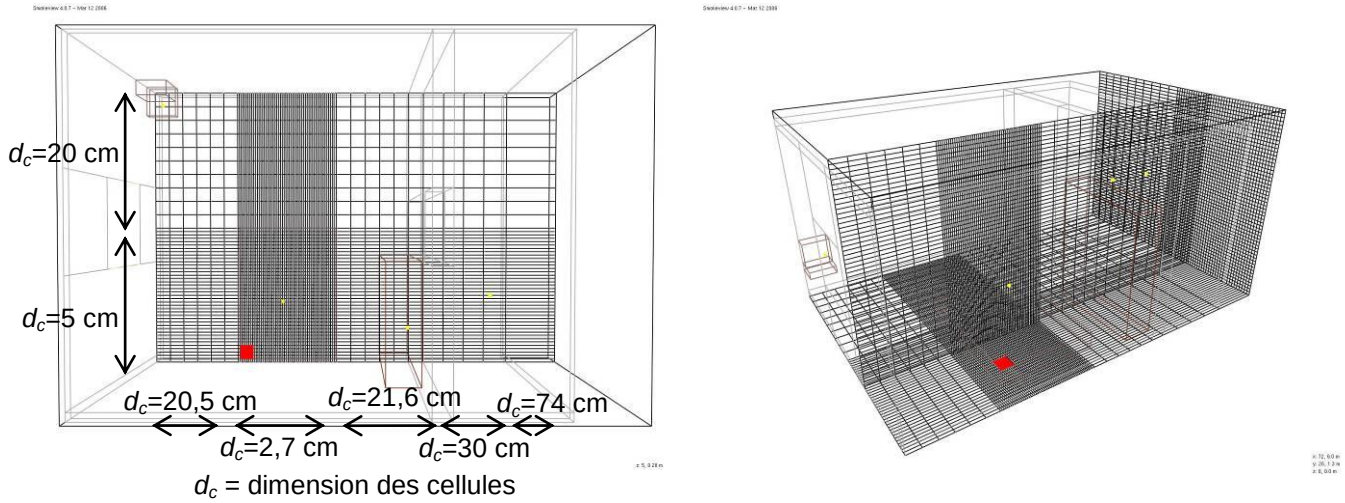
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.6.2 Raffinement horizontal

La stratégie de raffinement horizontal est évaluée avec deux nouveaux cas. Pour les deux, les mailles les plus fines sont situées au niveau du matelas. Les maillages comportent chacun 72 cellules selon l'axe *X*, 50 selon l'axe *Y* et 54 selon l'axe *Z*, mais la répartition spatiale de ces cellules est différente entre les deux cas. Le premier cas, qui est appelé horizontal, est montré sur les figures 111 et le second, horizontal 2, sur les figures 112. Par rapport au cas de référence, les mailles utilisées au niveau du lit ont une taille inférieure afin d'essayer de mieux reproduire la propagation des flammes à la surface du combustible à partir du brûleur représentant la source d'allumage. Cependant, il est important de remarquer que ce raffinement horizontal se fait au détriment du rapport de forme des cellules qui est très élevé dans certaines zones du domaine de calcul.



111. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas horizontal*

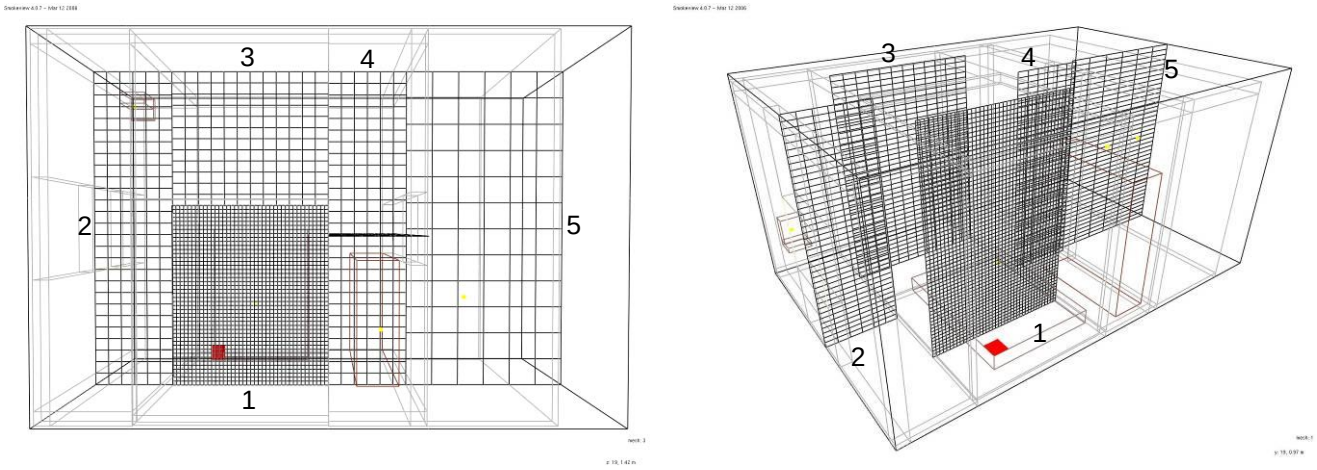


112. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas horizontal 2*

3.3.6.3 Raffinement par bloc

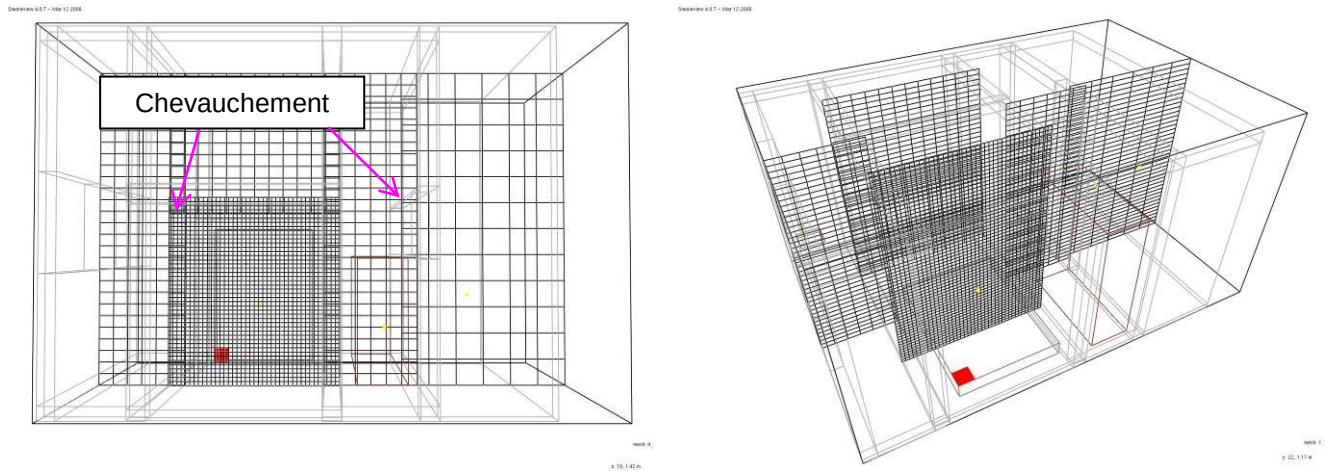
Pour évaluer la stratégie de raffinement par blocs, le domaine de calcul est séparé en cinq blocs maillés indépendamment, chacun ayant un maillage uniforme (cf. figures 113). Le premier (1) entoure le matelas et a 40 cellules selon l'axe des *X*, 45 selon l'axe des *Y* et 60 selon l'axe des *Z*. Cela correspond à des mailles cubiques de 5 cm de côté. Les quatre autres blocs ont le même nombre de mailles selon l'axe des *Z* à savoir 40 cellules ce qui correspond à une taille verticale de 7,5 cm. Les blocs 2 et 4 ont 26 cellules selon *X* et 27 selon *Y* ce qui équivaut à des mailles de 16,7 cm × 14,8 cm. Le bloc 3 a 12 cellules selon *X* et 12 selon *Y* ce qui donne des mailles de 16,7 cm × 14,2 cm. Et enfin, le bloc 5 a 6 cellules selon *X* et 12 selon *Y* et des mailles de 33 cm × 33 cm sont obtenues.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



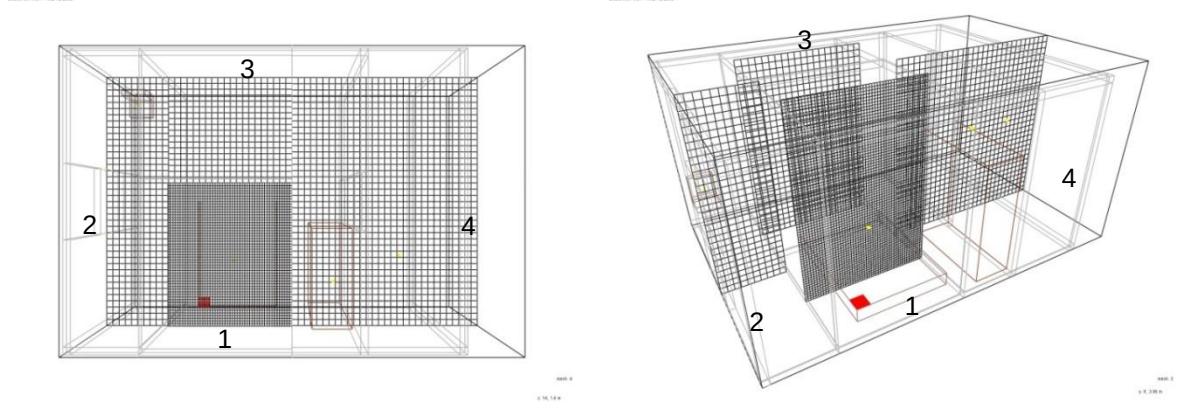
113. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs1*

Une seconde configuration a été envisagée pour évaluer aussi les maillages par blocs. Les seules différences entre le cas multiblocs1 présenté précédemment et le second cas multiblocs2 viennent du chevauchement introduit entre les blocs. Le nombre de cellules dans chaque direction reste identique d'un cas à l'autre et par conséquent, la taille des cellules varie légèrement. Dans le bloc 1, les mailles mesurent 5,5 × 5,3 × 5 cm^3, dans le bloc 2 : 18,3 × 14,8 × 7,5 cm^3, dans le bloc 3 : 18,3 × 14,8 × 7,5 cm, dans le bloc 4 : 20 × 14,8 × 7,5 cm^3 et enfin dans le bloc 5 : 35 × 33,3 × 7,5 cm^3.



114. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs2*

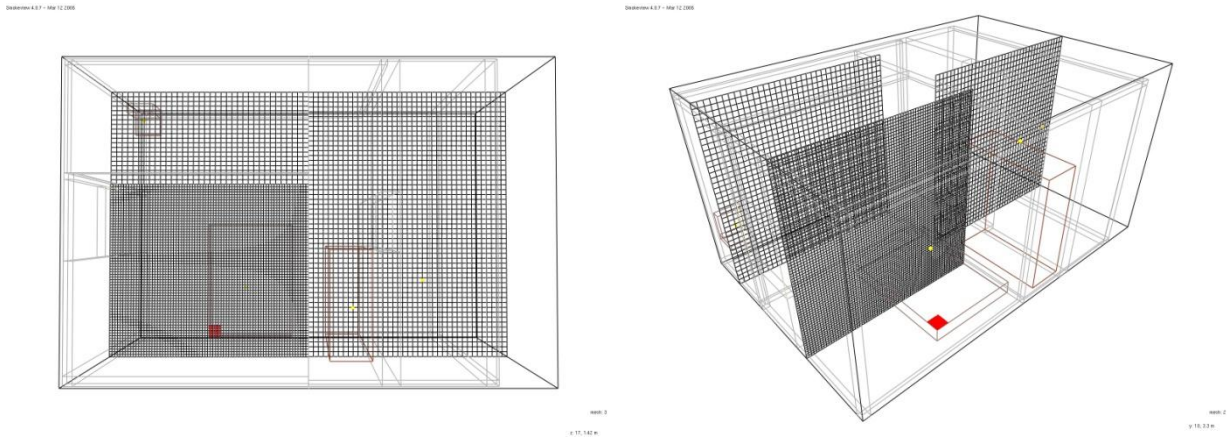
Une troisième configuration avec quatre blocs a été évaluée. Dans le bloc 1, les mailles mesurent 4 × 4,2 × 4 cm^3, dans le bloc 2 : 10 × 10 × 10 cm^3, dans le bloc 3 : 10 × 10,3 × 10 cm^3 et enfin dans le bloc 4 : 10 × 10 × 10 cm^3. Cette configuration a plus de mailles que les précédentes, mais le saut de taille de maille au passage d'une frontière n'est qu'au maximum de 2,5.



115. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs3*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Et enfin, une quatrième configuration a été évaluée, celle-ci sépare en trois blocs le domaine de calcul. Dans le bloc 1, les mailles mesurent $4 \times 4 \times 4$ cm^3, dans le bloc 2 : $9{,}2 \times 7 \times 8{,}3$ cm^3 et dans le bloc 3 : $8{,}3 \times 7{,}3 \times 8{,}3$ cm^3



116. *Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs4*

3.3.6.4 Autres stratégies de raffinement

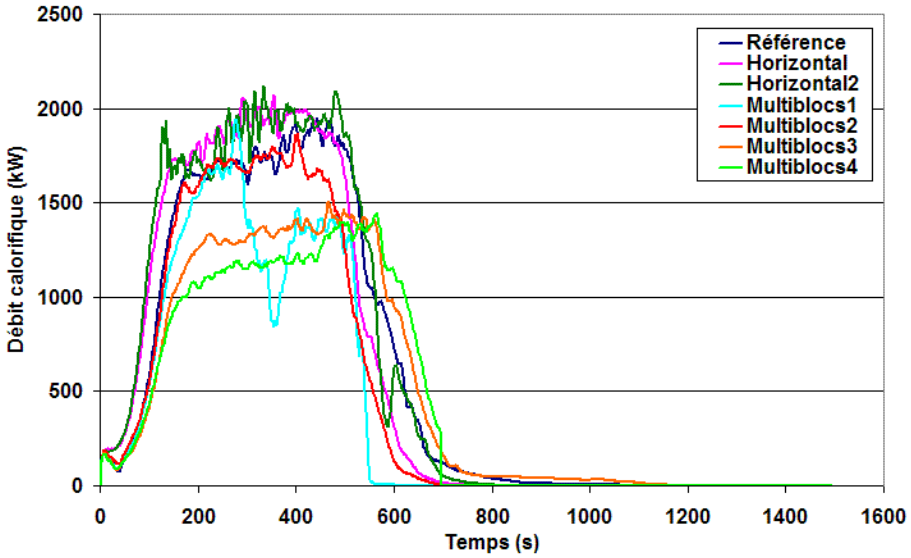
D'autres stratégies de raffinement du maillage ont été testées. Par exemple, un raffinement vertical dans le voisinage du matelas a été envisagé comme cela a été fait avec un raffinement horizontal. Le maillage étant structuré, il n'est pas possible de le raffiner dans les trois directions d'un même bloc, des stratégies de raffinement vertical et horizontal ont été séparées. Le raffinement vertical n'ayant pas donné des résultats intéressants, il ne sera pas présenté. Il en est de même pour la méthode consistant à imbriquer totalement un maillage à l'intérieur d'un autre. Des difficultés très nettes de transferts d'informations d'un bloc à l'autre apparaissent comme indiqué dans la référence [McGRATTAN 2006].

3.3.6.5 Débit calorifique et énergie totale dégagée

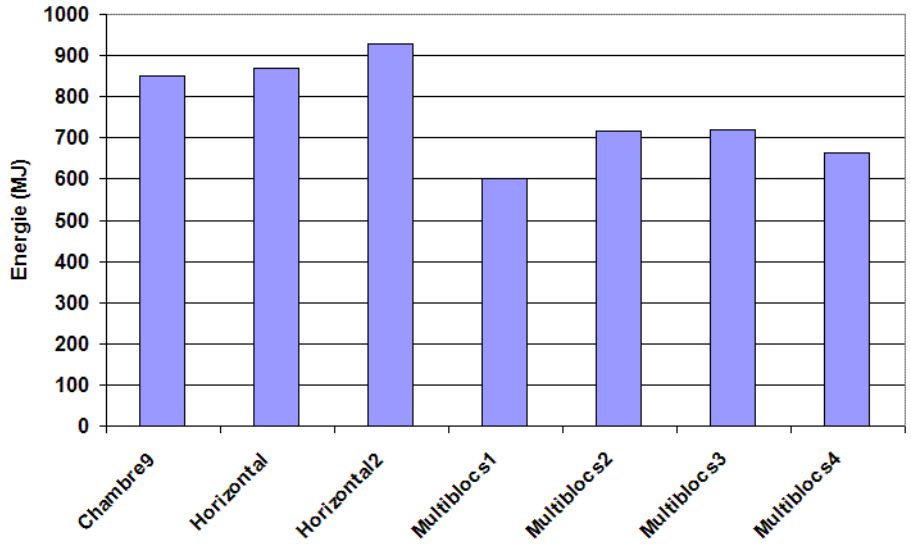
Les débits calorifiques calculés pour chacun des maillages ont une progression identique avec une montée en $\alpha_c t^2$ sur les 150 premières secondes, une stabilisation sur 300 secondes et une décroissance plus ou moins rapide selon le cas (voir le graphique 117). Deux cas se démarquent pourtant : multiblocs 3 et 4 dont les valeurs du débit calorifique atteint lors de la stabilisation sont inférieures d'environ 30 % par rapport au cas de référence. Cependant, comme cela est visible sur la figure 118, ce n'est pas pour ces deux cas que l'écart relatif sur l'énergie totale dégagée par rapport au cas de référence est maximum. En effet, la phase de stabilisation du débit calorifique dure une trentaine de secondes de plus pour les cas multiblocs 3 et 4 par rapport au cas de référence, l'énergie totale dégagée n'est sous-estimée respectivement que d'environ 16 et 22 %. L'écart relatif minimal pour une stratégie de maillage par blocs est obtenu avec les cas multiblocs 2 et 3 avec 16 % alors qu'un écart relatif maximal de près de 30 % est atteint pour le cas multiblocs1. Ainsi, avec cette stratégie de maillage, de nombreuses différences apparaissent par rapport au cas de référence pour tout ce qui concerne le débit calorifique et également ce qui y est directement lié comme la propagation des flammes en particulier. Sur les 200 premières secondes, il n'y a que le matelas qui brûle sur les cinq simulations (Référence + quatre cas multiblocs) ; les courbes de débit calorifique sont alors très proches (cf. graphique 117). Les différences qui apparaissent par la suite sont principalement dues à l'inflammation des foyers secondaires constitués par le fauteuil et l'armoire ; sur les cas multiblocs 3 et 4, pour lesquels l'énergie totale dégagée est largement sous-estimée, l'inflammation de l'armoire se produit plus de 200 s après le cas de référence, voire ne se produit pas. Cela met donc en relief une double difficulté. La première est l'influence néfaste que peut avoir une frontière entre deux blocs sur la propagation des flammes d'un foyer primaire à un foyer secondaire lorsque cette frontière est placée trop près d'un élément qui se consume ; cela a été évoqué précédemment suite à des recherches bibliographiques (cf. § 3.3.6). Il faut donc s'attendre à trouver des discontinuités dans les champs de températures. La seconde difficulté concerne la simulation de la combustion d'un foyer secondaire lorsque celui-ci est placé dans une zone où le maillage est grossier ; c'est le cas ici de l'armoire pour laquelle les calculs grâce au modèle de pyrolyse sont moins valables si la taille de cellules est trop grande.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les maillages en configuration horizontale ont des débits calorifiques plus proches de la courbe de référence, que ce soit au niveau de l'allure de la courbe ou alors de l'énergie totale dégagée qui est légèrement surestimée de 2 et 9 % respectivement pour les cas horizontal et horizontal2.



117. *Débit calorifique calculé pour les différentes stratégies de raffinement*

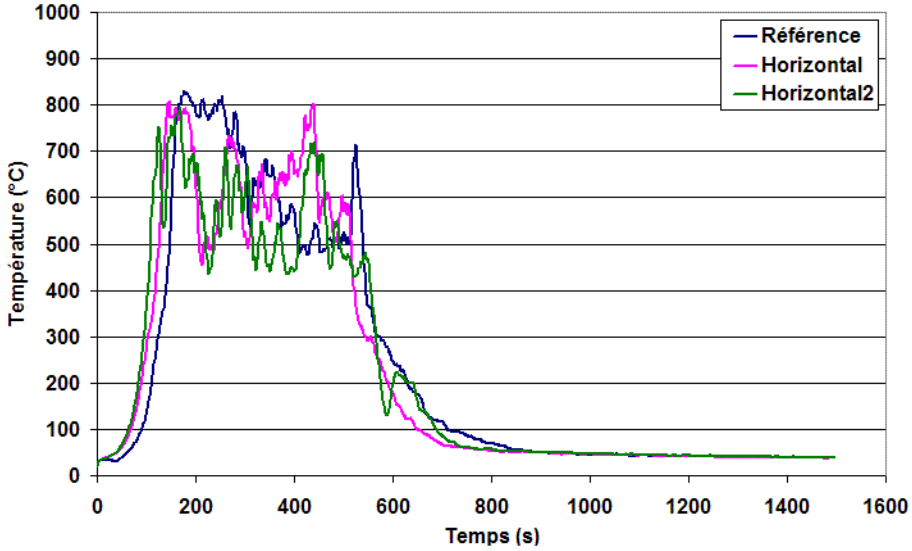


118. *Énergie totale dégagée pour les différentes stratégies de raffinement. Chambre 9 correspond à la référence*

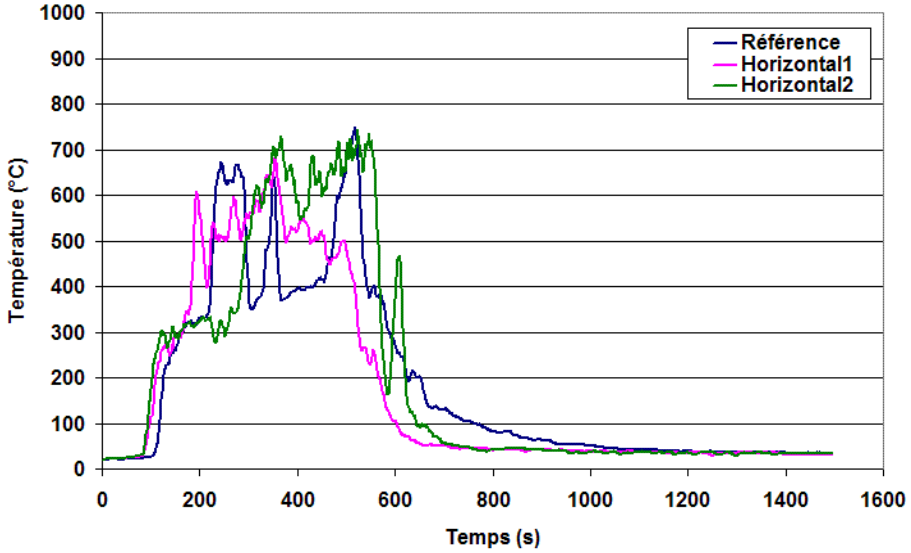
3.3.6.6 Température pour un raffinement horizontal

Pour les points situés au-dessus du lit, du fauteuil et de l'armoire, l'analyse des courbes de température est rendue difficile par les fortes fluctuations qui sont observées. En effet, elles sont obtenues à des emplacements très proches de matériaux combustibles et elles varient beaucoup en fonction du comportement des flammes. Cependant, les allures générales des courbes obtenues pour les cas horizontal et horizontal2 sont assez proches du cas de référence pour chaque point de mesure (voir les graphiques 119 à 122). Dans le couloir, les températures moyennes entre 200 et 500 s ont cependant une tendance à être légèrement surévaluées.

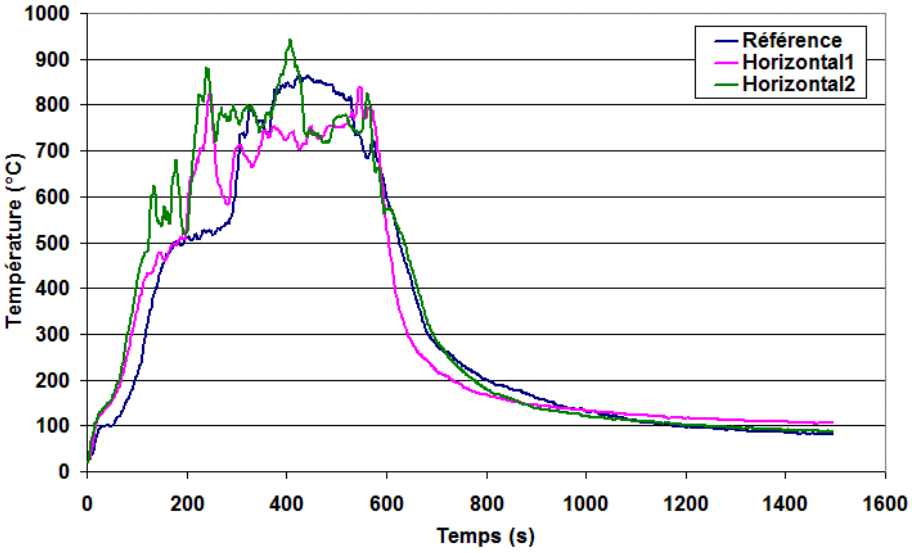
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



119. *Température au-dessus du lit pour la configuration horizontale*

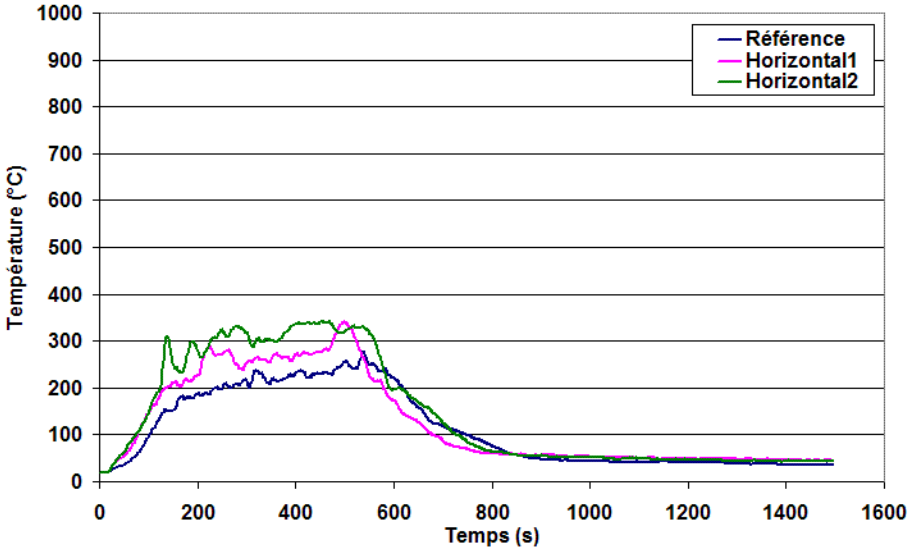


120. *Température au-dessus du fauteuil pour la configuration horizontale*



121. *Température au-dessus de l'armoire pour la configuration horizontale*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



122. *Température dans le couloir pour la configuration horizontale*

Température (°C)	Référence	Horizontal	Horizontal2
Lit	629	611	552
Fauteuil	477	532	537
Armoire	717	706	781
Couloir	218	271	316

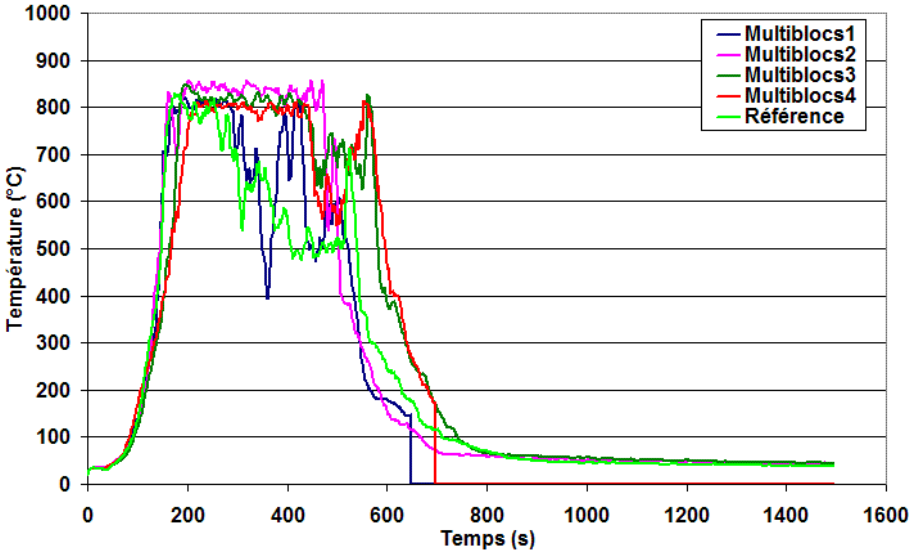
123. *Température moyenne entre 200 et 500 s*

3.3.6.7 Température pour un raffinement par blocs

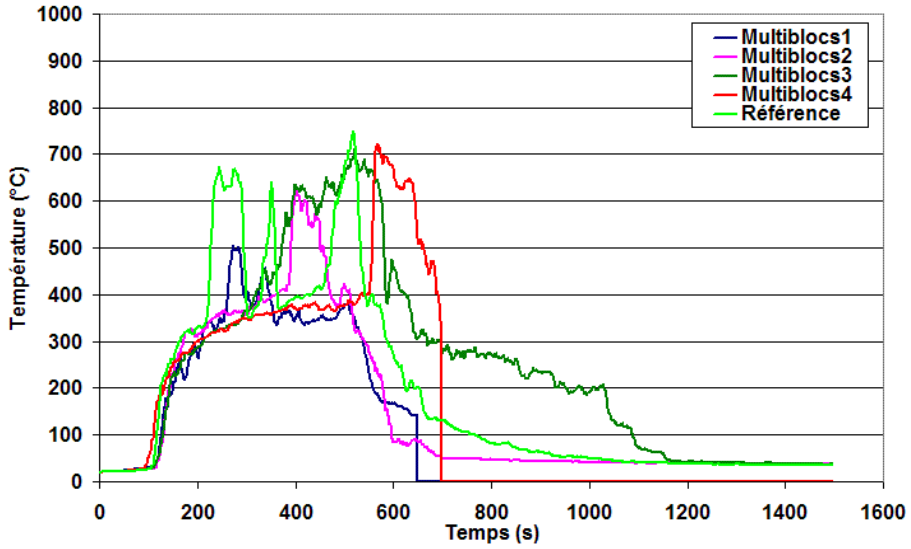
Au-dessus de l'armoire, les températures des cas raffinés par blocs sont sous-estimées de plus de 200 °C par rapport au cas de référence (voir le graphique 126). Cela s'explique par l'influence de la frontière entre blocs située entre le lit et l'armoire. À 300 s environ, lorsque l'armoire s'enflamme pour le cas de référence, une augmentation de 200 °C est observée. Cette augmentation, synonyme d'inflammation de l'armoire sur le cas de référence, n'apparaît pas sur les cas multiblocs où la température moyenne est sous estimée (cf. tableau 128). Sur les cas multibloc, il y a également inflammation de l'armoire, mais la température au point de mesure reste stable grossièrement autour de 500 °C. Il en est de même au point de mesure au-dessus du fauteuil où les différents pics de température pour le cas de référence correspondent à des inflammations ponctuelles du fauteuil (voir le graphique 125). De plus, des différences très nettes pour les temps d'inflammation du fauteuil sont observables notamment avec le cas multiblocs 4 qui s'enflamme près de 400 s après la référence.

Au-dessus du lit, après 280 s environ, la température pour le cas de référence diminue progressivement jusqu'à la fin de la simulation (cf. graphique 124). Seul le cas multiblocs 1 capte approximativement cette décroissance, les autres cas présentant une température constante pendant 400 s avant de débuter une décroissance. En conséquence, la température moyenne au-dessus du lit est largement surestimée pour les cas multiblocs (cf. tableau 128). L'erreur faite sur les valeurs de températures obtenues dans le couloir par rapport au cas de référence est tolérable pour les cas présentés ici. Elle ne l'est pas aux autres points dans la pièce où il est difficile de généraliser une tendance sur une même simulation.

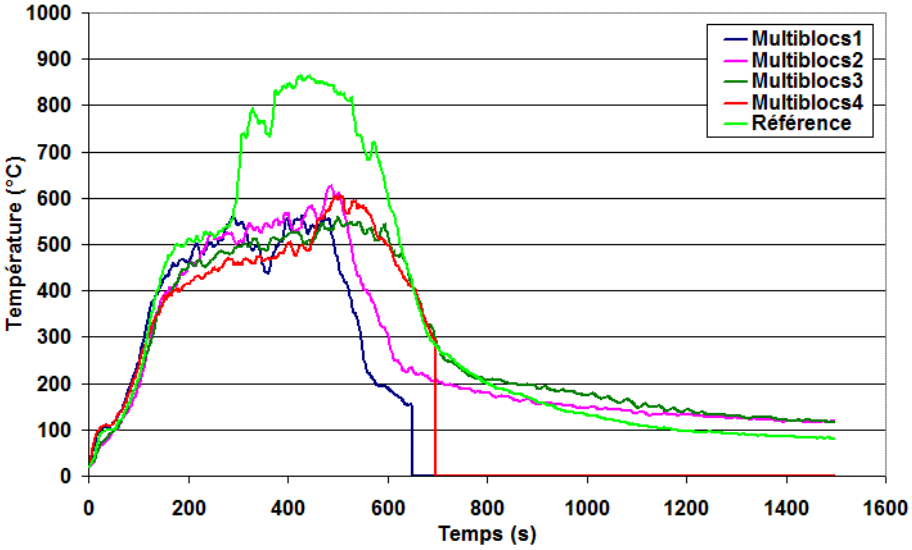
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



124. *Température au-dessus du lit pour la configuration multiblocs*

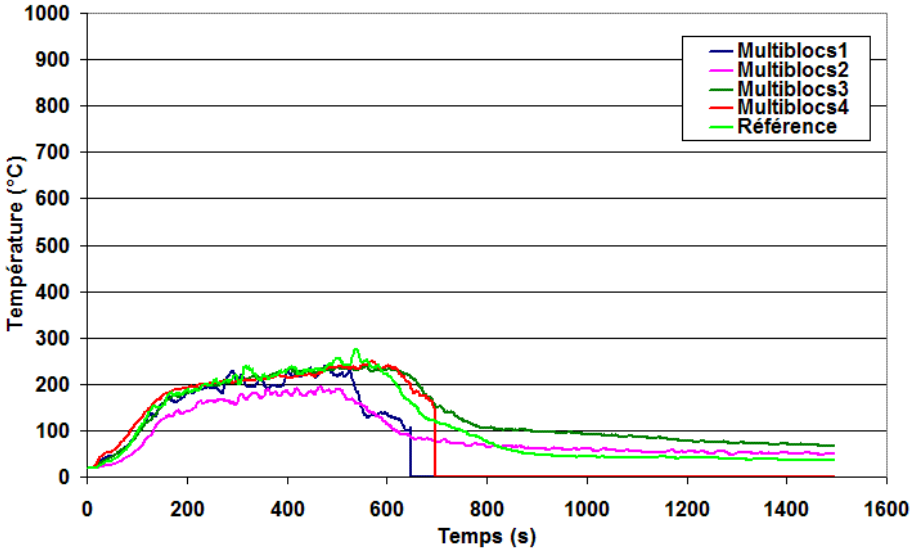


125. *Température au-dessus du fauteuil pour la configuration multiblocs*



126. *Température au -dessus de l'armoire pour la configuration multiblocs*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



127. *Température dans le couloir pour la configuration multiblocs*

Température (°C)	Référence	Multiblocs1	Multiblocs2	Multiblocs3	Multiblocs4
Lit	629	682	820	793	764
Fauteuil	477	370	421	469	353
Armoire	717	515	536	500	481
Couloir	218	207	173	214	212

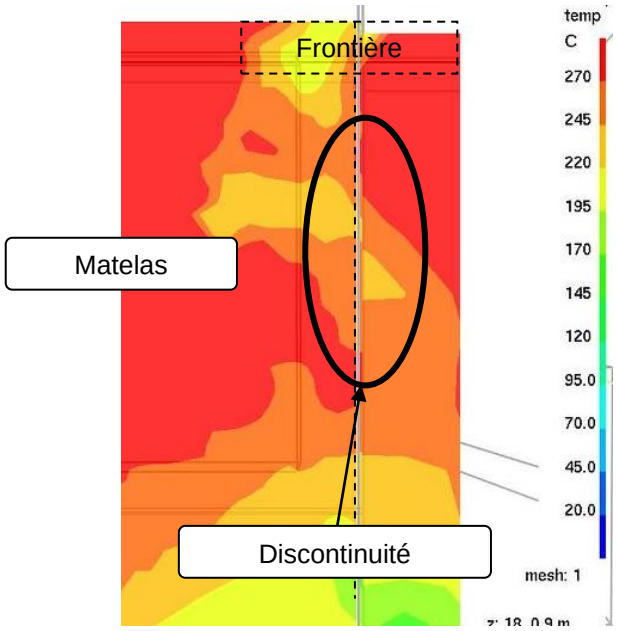
128. *Température moyenne entre 200 et 500 s*

Pour chacun des mobiliers des cas multiblocs, les temps d'inflammation et les températures maximales atteintes auraient été plus proches du cas de référence si un maillage plus raffiné avait été utilisé dans les blocs contenant ces éléments. En plus de l'influence de la position de la frontière et du saut de taille de maille au passage de la frontière, il faut donc également voir, dans les différences entre les stratégies de simulation, un effet de la taille de maille sur la pyrolyse. En effet, les maillages sont peut-être trop grossiers dans les blocs autres que celui contenant le matelas pour que l'inflammation des matériaux et la propagation des flammes soient correctement simulées.

3.3.6.8 Stratégie de raffinement de maillage à adopter

Dans le but de réduire le nombre de cellules du maillage, et par conséquent le temps de calcul, quatre stratégies de raffinement ont été envisagées. Un raffinement vertical au niveau de la zone principale de combustion et l'insertion d'un bloc au sein d'un domaine de calcul maillé uniformément avec des cellules plus grossières ont été rapidement écartés car ils donnent des résultats inconsistants. Les autres stratégies présentées dans ce paragraphe s'appuient sur un raffinement horizontal ou par blocs. Dans les deux cas, les tailles de mailles retenues placent les calculs dans des conditions extrêmes au regard du rapport de forme des cellules ainsi que du saut de taille des mailles au passage d'une frontière. Une conséquence est une différence dans le temps d'inflammation des foyers secondaires ainsi que dans leur débit calorifique. Il faut rappeler que les stratégies de maillage par blocs ont consistés à privilégier un raffinement au niveau de la source primaire (le lit) au détriment des sources secondaires. C'est pourquoi les maillages dans le voisinage de ces foyers sont souvent trop grossiers pour simuler correctement leur combustion. La position des frontières entre les blocs, extrêmement près des matériaux définis comme combustible, tend à placer les calculs multiblocs dans des conditions extrêmes. En effets, des discontinuités dans les champs de température, de vitesse et de pression apparaissent au passage des frontières (cf. image 129). Au niveau de celles-ci, le rapport de forme et le saut de maille ont un impact néfaste sur la propagation des flammes et l'inflammation des foyers secondaires.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



129. *Discontinuité du champ de températures dans une coupe horizontale à 90 cm du sol pour le cas multiblocs1*

Des conclusions peuvent être tirées de ces deux stratégies de maillage. En ce qui concerne les maillages par blocs, il ne faut pas, dans la mesure du possible, disposer une frontière entre deux matériaux combustibles car la propagation des flammes de l'un à l'autre est parfois entravée ou, au mieux, seulement accélérée ou retardée. Il est intéressant d'utiliser les maillages par blocs lorsque la frontière se situe à une distance raisonnable d'un foyer. Cette distance mériterait des études afin de la relier aux dimensions du local, de la source principale de feu et de sa puissance. De même, il serait intéressant de déterminer la taille maximale du saut de maille qu'il est admissible d'utiliser au passage d'une frontière juxtaposant une source de combustion.

Nom du cas	Référence	Horizontal	Horizontal 2	Multiblocs 1	Multiblocs 2	Multiblocs 3	Multiblocs 4
Nombre de cellules	419 904	194 400	194 400	129 600	129 600	261 300	469 305
Temps de calcul (h)	7 710	5 340	7 590	7 740	6 420	8 520	6 660

130. *Nombre de mailles et temps de calcul pour les différentes stratégies de raffinement du maillage*

Pour que le maillage soit pleinement efficace, il faut respecter un rapport de forme maximum compris entre 2 et 3 pour les cellules utilisées [McGRATTAN 2006]. De plus, au regard des temps de calcul obtenus (cf. tableau 130), il est naturel de se demander si le meilleur compromis temps de calcul – qualité des résultats ne reste pas un maillage uniforme pour des domaines de calcul d'une telle taille. Cependant, il est intéressant de noter que le temps de calcul ne dépend pas uniquement du nombre de cellules mais également de la taille de celles-ci. Ainsi, bien que le cas horizontal 2 ait moins de cellules que le cas de référence, comme son maillage est plus raffiné au niveau du lit, les temps de calcul des deux cas sont comparables. Mais, étant un cas multibloc, il y a toujours la possibilité de faire un calcul parallèle ce qui est avantageux au niveau du temps de calcul.

3.3.6.9 Optimisation des maillages par blocs

Les paragraphes précédents ont fait apparaître, pour les applications de ce travail, les limites de l'utilisation d'un maillage par blocs. De nouvelles simulations ont été réalisées sur un cas plus simple que la chambre d'hôtel dans le but de faire ressortir quelques règles permettant d'utiliser cette stratégie de raffinement dans les meilleures conditions. Dans un premier temps, une frontière entre deux blocs est introduite sans changement de tailles de mailles au passage de cette frontière. Cette configuration est testée avec et sans chevauchement entre les maillages. Ensuite, dans le second bloc, la taille des cellules est modifiée dans le sens de la longueur.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

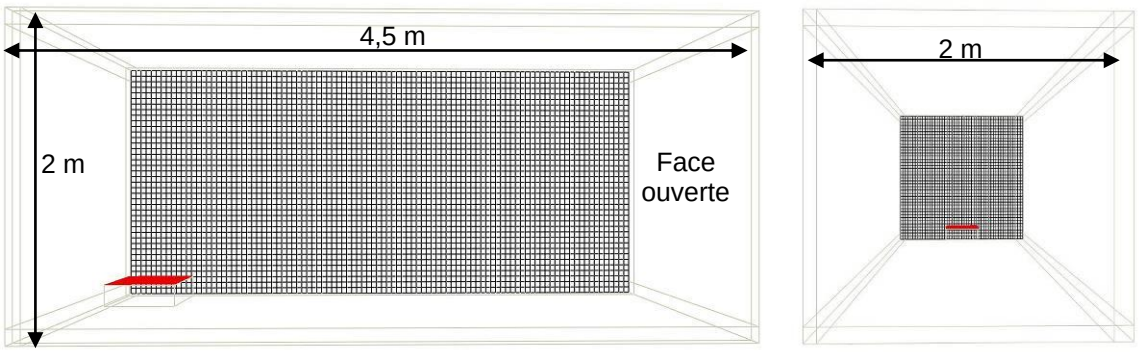
3.3.6.9.1 Présentation du cas de référence et des différents maillages utilisés

Le cas de référence est un parallélépipède contenant un brûleur. Ses dimensions sont indiquées sur l'image 131. Il est fermé sur toutes ses faces sauf une, celle située à l'opposé du brûleur. Les dimensions de ce dernier sont de 0,5 m par 0,5 m et il dégage 2 000 $kW.m^{-2}$. La réaction définie pour la combustion est celle de l'éthanol (57), combustible ayant pour masse molaire 46 g/mol.

$$(57). \quad C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

La fraction d'énergie libérée par le foyer sous forme de rayonnement thermique est fixée à 0,2. La fraction de la massique de combustible convertie en suie est de 0,008. Le facteur de Thornton est fixé à 12 842 $kJ.kg^{-1}$.

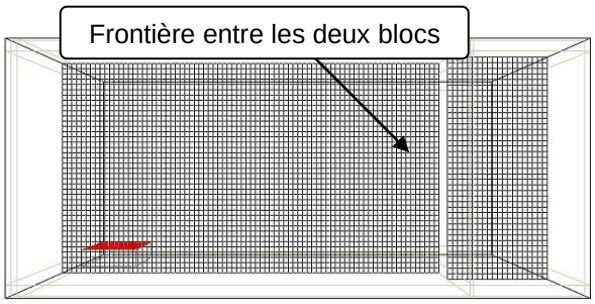
Les dimensions des mailles sont de 0,05 m verticalement, 0,04 m selon la largeur et 0,045 m selon la longueur. Cette taille de maille correspond à un R^* égal à 0,062. Ainsi, la hauteur de flamme, les températures et les vitesses dans le panache et le jet sous plafond sont susceptibles d'être calculées correctement. L'ensemble de ces données constitue le cas de référence pour lequel le maillage est uniforme et réparti sur un seul bloc.



131. *Vues latérale et de face du maillage du cas de référence*

Cas des multiblocs sans chevauchement

Par rapport au cas de référence, la taille des cellules reste identique mais le domaine de calcul est séparé en deux blocs, la frontière étant située aux trois quarts de la longueur (voir l'image 132). Le maillage est conforme à la frontière.

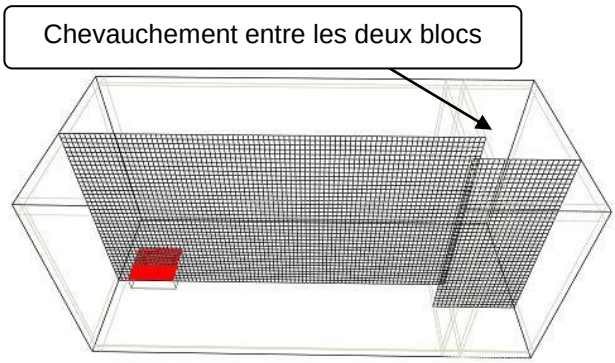


132. *Vue du maillage du cas multiblocs conforme, sans chevauchement*

Cas des multiblocs avec chevauchement

Comme le précédent, ce nouveau cas a deux blocs. Cependant, un chevauchement entre eux est introduit afin d'évaluer l'influence que cela peut avoir sur la résolution de l'écoulement (voir l'image 133). La taille des cellules est une nouvelle fois identique au cas de référence.

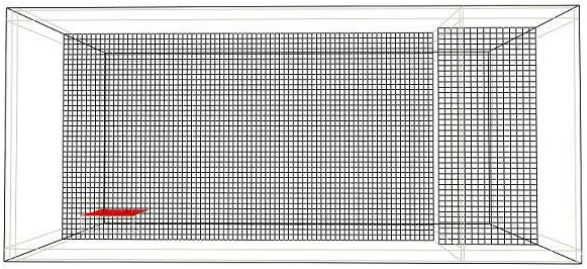
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



133. *Vue du maillage du cas multiblocs avec chevauchement*

Cas des multiblocs sans chevauchement et avec des maillages différents pour les deux blocs

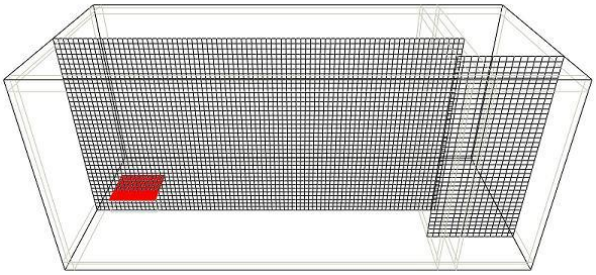
À partir du cas présenté précédemment formé de deux blocs ne se chevauchant pas, le maillage a été modifié en le relâchant dans le second bloc. Au lieu des 20 cellules dans la longueur, le cas n'en compte maintenant plus que 15 (Voir l'image 134). Cela équivaut à un changement de longueur pour la cellule de 0,045 m à 0,06 m.



134. *Vue du cas multiblocs utilisant un maillage conforme sans chevauchement avec une taille de cellule différente dans le sens de l'écoulement pour les deux blocs*

Cas des multiblocs avec chevauchement et avec des maillages différents

La même modification a été effectuée sur le cas multiblocs avec chevauchement présenté précédemment (voir l'image 135). Dans le second bloc, les cellules mesurent alors 0,06 m dans leur longueur au lieu de 0,045 m.



135. *Vue du cas multiblocs utilisant un maillage avec chevauchement avec une taille de cellule différente pour les deux blocs dans le sens de l'écoulement*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3.3.6.9.2 Résultats pour les différents maillages multiblocs

Temps de calcul

Les temps de calcul sont quasiment identiques d'un cas à l'autre car la différence dans le nombre de cellule n'est pas assez conséquente (cf. tableau 136).

Nom du cas	Référence	Maillage identique dans la longueur sans chevauchement	Maillage identique dans la longueur avec chevauchement	Maillage différent dans la longueur sans chevauchement	Maillage différent dans la longueur avec chevauchement
Temps de calcul (h)	33	30	32	31	31
Nombre de cellules	200 000	200 000	206 000	190 000	196 000

136. *Temps de calcul et nombre de cellules*

Débit calorifique et énergie totale dégagée

Sur les 500 secondes de simulation de l'ensemble des cas, il y a extrêmement peu de différences au niveau du débit calorifique dégagé dans l'ensemble du domaine de calcul. La frontière entre les deux blocs n'a donc pas d'influence sur la combustion dans le premier bloc. Cela est également observable en étudiant l'énergie totale dégagée dans l'ensemble du domaine de calcul. En théorie, un brûleur dégageant 2 000 $kW.m^{-2}$ sur 0,25 m^2 pendant 500 s produit 250 000 kJ. Ce sont les valeurs obtenues à 1% près par simulation (cf. tableau 137).

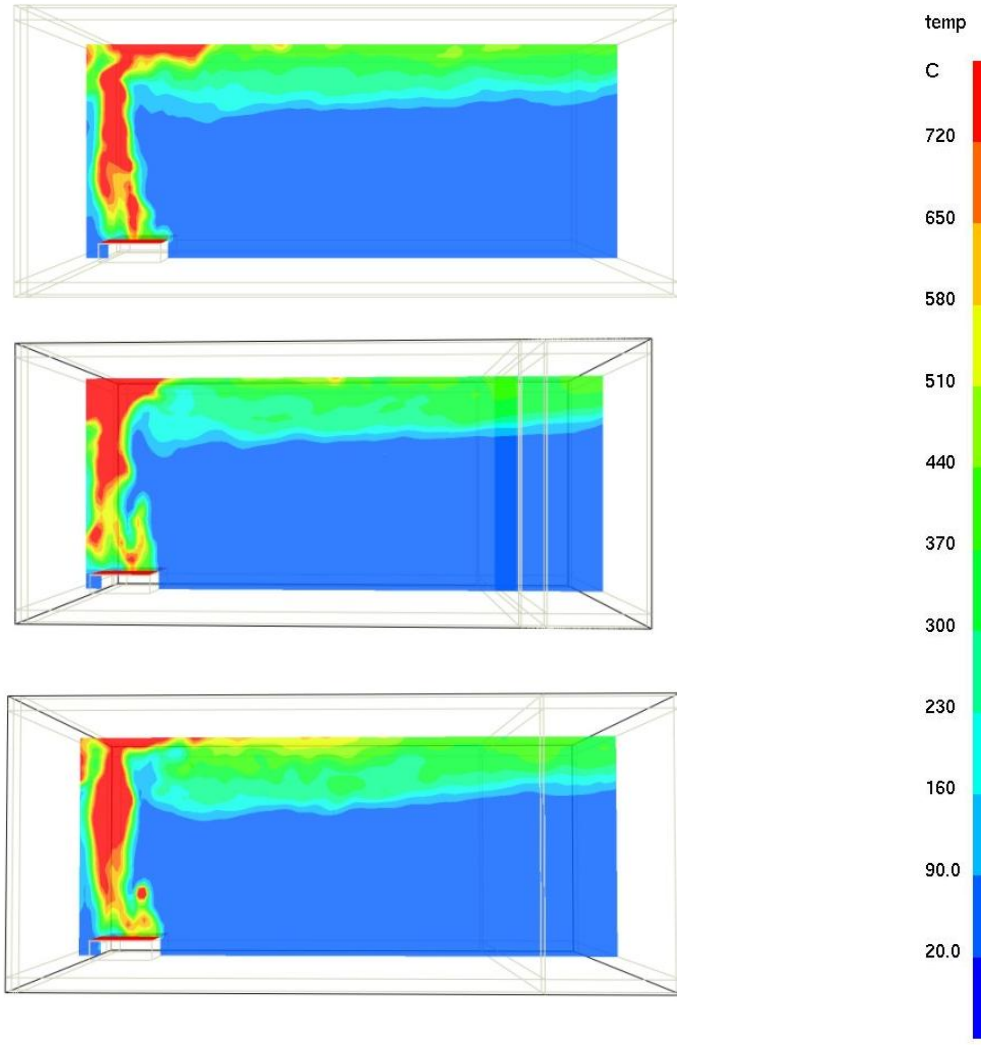
Cas du cube	Référence	Maillage identique dans la longueur sans chevauchement	Maillage identique dans la longueur avec chevauchement	Maillage différent dans la longueur sans chevauchement	Maillage différent dans la longueur avec chevauchement
Energie (kJ)	250 609	252 729	250 384	250 986	250 610

137. *Énergie totale libérée dans les simulations*

Discontinuité au passage de la frontière entre blocs

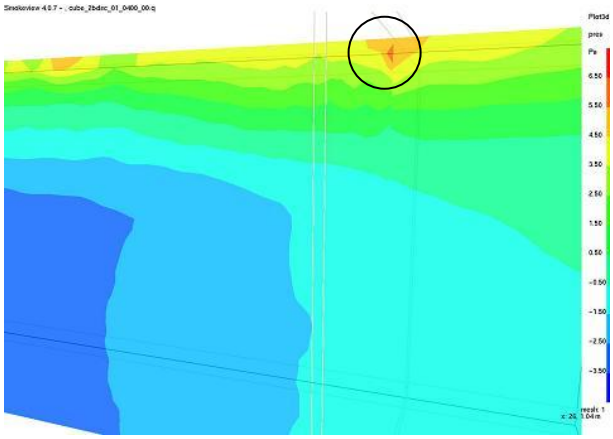
Pour étudier l'impact que peut avoir une frontière entre blocs sur les valeurs calculées dans l'écoulement, les paramètres de l'écoulement sont étudiés dans un plan de coupe transversal au domaine de calcul. Ainsi, par rapport au cas de référence, les valeurs atteintes dans ces plans pour la température, la pression, et la vitesse sont identiques pour les cas avec et sans chevauchement où les mailles sont identiques sur les deux blocs. Aucune discontinuité des champs n'est observée ni même de surévaluation de la pression au passage de la frontière. Par exemple, les figures 138 montrent les champs de températures. Cette configuration de maillage est très favorable car la taille de maille perpendiculairement à l'écoulement est la même avant et après la frontière.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



138. *Température dans un plan de coupe à 400 s pour le cas de référence et multiblocs avec et sans chevauchement*

Lorsque la longueur de la taille de maille change au passage de la frontière, de légères discontinuités dans les champs de pression de l'ordre de 1 Pa apparaissent (voir l'image 139). Celles-ci ne se retrouvent ni dans les champs de température, ni de vitesses. Elles sont donc considérées comme négligeables.



139. *Pression dans un plan de coupe à 400 s pour le cas sans chevauchement avec des maillages différents*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

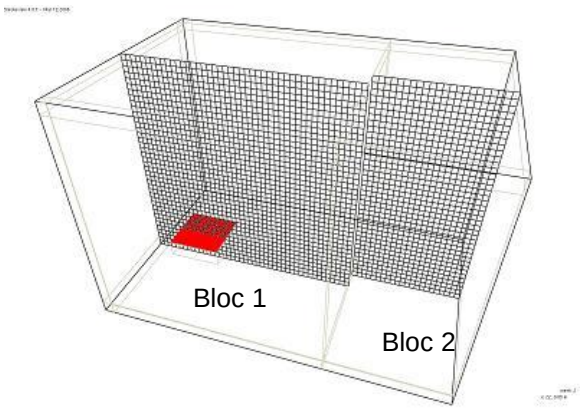
En conclusion, qu'il y ait un chevauchement ou non entre les blocs ou qu'il y ait ou non un saut dans la taille de maille au passage de la frontière dans le sens de l'écoulement, tant que les mailles ont des surfaces identiques sur la frontière, cet exemple montre que l'utilisation de blocs pour réaliser un maillage n'a pas d'impact sur l'écoulement et le débit calorifique. Il faut cependant éviter de positionner la frontière entre deux matériaux définis comme combustibles de peur de ne pas simuler correctement la propagation des flammes.

3.3.6.9.3 Présentation du cas de référence et des différents maillages non-conformes utilisés

Par rapport au cas présenté précédemment, la longueur du domaine de calcul a été réduite pour diminuer les temps de calcul. L'écoulement étant établi assez rapidement, le parallélépipède est amputé du tiers de son volume et ne mesure plus que 3 m sur sa longueur. Par conséquent, la frontière entre les deux blocs est également déplacée et se situe dorénavant à 1 m de l'ouverture et donc à 2 m de la paroi du fond. En plus du cas de référence, quatre autres cas sont créés.

Présentation du cas conforme de référence

Ce nouveau cas conforme comporte deux blocs (voir l'image 140). Le premier, appelé bloc 1, est maillé avec 50 cellules dans la largeur, 45 dans la longueur et 40 sur la hauteur. Cela correspond à des tailles de maille de 4 × 4,45 × 5 cm^3. Le second bloc, désigné par bloc 2, a des tailles de maille identiques au bloc 1. Cela donne 50 mailles dans la largeur, 22 dans la longueur et 40 sur la hauteur.



140. *Vue du maillage du cas de référence*

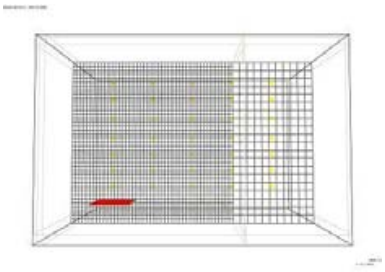
Présentation des cas non-conformes

En partant du cas ayant un maillage identique dans les deux blocs, la taille des cellules selon les trois directions est divisée par deux, trois et quatre dans le bloc 2, le bloc 1 conservant un maillage identique (voir les images 142 à 144). Les caractéristiques des maillages dans le bloc 2 sont listées dans le tableau 141. Le cas appelé rapport 2 n'a plus que 25 cellules dans la largeur, 11 dans la longueur et 20 dans la hauteur, ce qui donne une taille de maille de 8 × 9 × 10 cm^3. Le cas appelé rapport 3 a des mailles de 12,5 cm dans les 3 directions avec 16 cellules dans la largeur, 8 dans la longueur et 16 dans la hauteur. Et enfin, le dernier cas a des cellules de 16,6 cm dans la largeur et la longueur et 18 cm dans la hauteur qui sont obtenues avec un maillage de 12 × 6 × 14 cellules. D'un point de vue volumique, les cellules augmentent d'un rapport 8, 27 et 64.

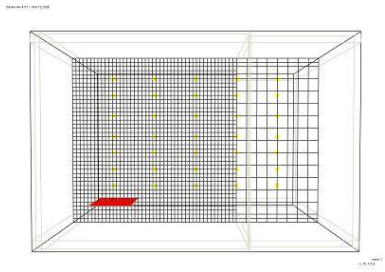
	Rapport 2	Rapport 3	Rapport 4	Référence
Nombre de cellules dans la direction X	25	16	12	50
Taille des cellules dans la direction X (cm)	8	12,5	16,6	4
Nombre de cellules dans la direction Y	11	8	6	22
Taille des cellules dans la direction Y (cm)	9	12,5	16,6	4,5
Nombre de cellules dans la direction Z	20	16	14	40
Taille des cellules dans la direction Z (cm)	10	12,5	18	5

141. *Caractéristiques du maillage du bloc 2 pour les cas non-conformes et le cas de référence*

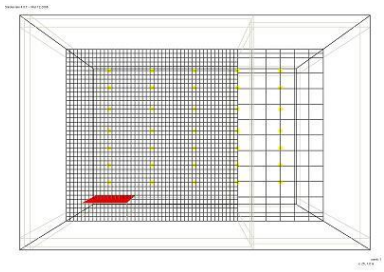
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



142. *Vue du maillage du cas rapport 2*



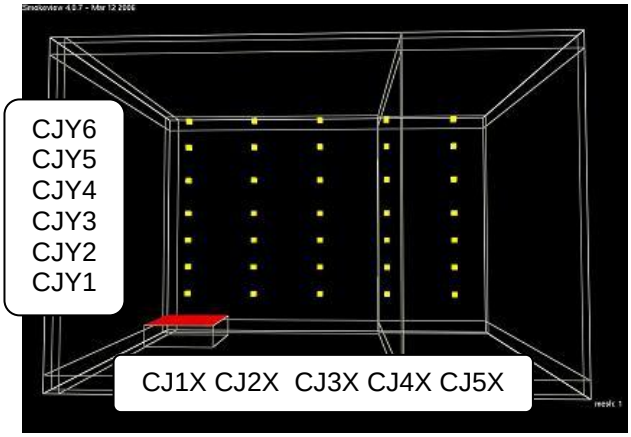
143. *Vue du maillage du cas rapport 3*



144. *Vue du maillage du cas rapport 4*

Position des points de comparaison

Les points de comparaison pour ces simulations sont référencés par CJYX. *Y* correspond au numéro de rangée du point selon l'horizontale et *X* selon la verticale. Le tableau 146 récapitule les coordonnées de ces points dont l'emplacement sur l'axe de symétrie du parallélépipède est indiqué sur l'image 145. En ces points sont fournis la température, la fraction de mélange, la pression et la vitesse.



145. *Emplacement des points de mesure*

Y	1	2	3	4	5	
Distance par rapport à la paroi du fond (m)	0,5	1	1,5	2	2,5	
X	1	2	3	4	5	6
Hauteur au-dessus du sol (m)	0,45	0,65	0,85	1,05	1,55	1,75

146. *Coordonnées des points de mesure*

3.3.6.9.4 Résultats pour les différents maillages non-conformes utilisés

Temps de calcul

Les temps de calcul diminuent ici logiquement avec le nombre de cellules. Ainsi, une réduction de 30% du nombre de cellules se traduit par une baisse de 37,5% du temps de calcul. L'intérêt d'utiliser un raffinement par bloc sur cette configuration est donc nettement visible.

Nom du cas	Référence	Identique	Rapport 2	Rapport 3	Rapport 4
Temps de calcul (h)	16	14	11	10	10
Nombre de cellules	132 000	134 000	95 500	92 048	91 008

147. *Temps de calcul et nombre de cellules*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Débit calorifique et énergie totale libérée

En théorie, un brûleur dégageant 2 000 kW.m^{-2} sur 0,23 m^2 pendant 350 s produit 164 640 kJ. Sur ces simulations, la totalité de l'énergie est libérée par la combustion dans le bloc 1. Dans cette configuration où la combustion est contrôlée par le combustible, le maillage du bloc 2 n'a aucune influence sur la combustion dans le bloc 1. En effet, le débit calorifique sur l'ensemble du domaine de calcul est identique au cas de référence quel que soit le rapport du saut de maille au passage de la frontière. Par conséquent, l'énergie totale dégagée est quasiment identique d'un cas à l'autre (cf. tableau 148).

Cas du cube	Référence	Rapport 2	Rapport 3	Rapport 4	Théorie
Energie totale libérée (kJ)	168 610	168 585	168 555	168 560	164 640

148. *Énergie totale libérée*

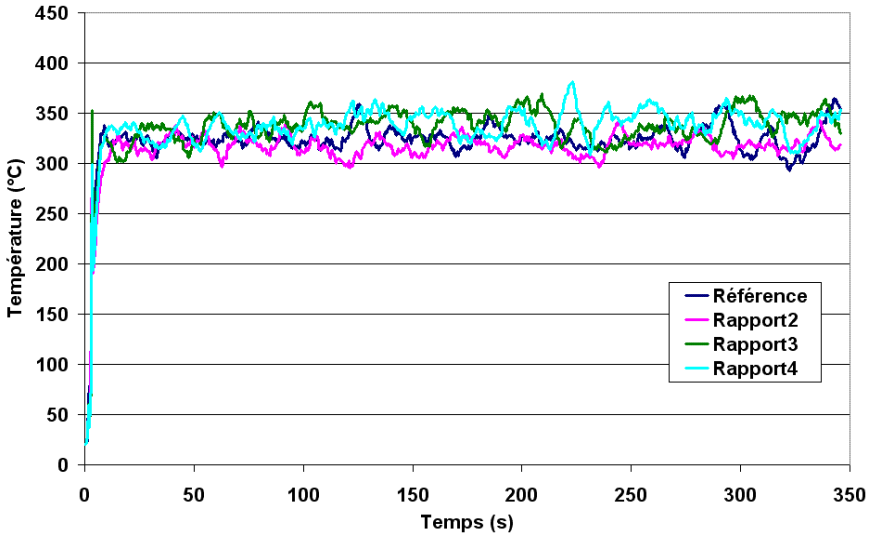
Évolution de la température en fonction du temps

L'étude des températures aux points CJY1, CJY2, CJ1X et CJ2X n'est pas présentée dans ce paragraphe. En effet, les températures sont soit identiques d'un cas à l'autre, soit atteignent des valeurs négligeables par rapport au reste du domaine de calcul et du jet sous plafond en particulier. Il est plus intéressant d'étudier les températures aux points de mesure CJ35, CJ45 et CJ55 car ils sont placés dans le jet sous plafond respectivement avant, sur et après la frontière entre les deux blocs. L'évolution de la température en fonction du temps pour les quatre maillages est tracé sur le graphique 150 pour le point de mesure CJ35, sur le graphique 151 pour le point de mesure CJ45, et sur le graphique 152 pour le point de mesure CJ55. Les courbes ont tendance à se séparer en deux groupes : d'un côté le cas de référence et rapport 2 et de l'autre rapport 3 et 4. Cette tendance de séparation en deux groupes est également observée sur la majorité des courbes de vitesse, de fraction de mélange et de pression tracées aux mêmes points. Sur ces courbes, une fois que l'écoulement est établi, il y a peu de fluctuations dans les valeurs atteintes. Par conséquent, les simulations sont évaluées à partir des valeurs moyennes de température et leurs erreurs relatives par rapport au cas de référence. (Voir le tableau 149). Au point CJ35 situé avant la frontière, l'écart relatif de la température atteinte par rapport au cas de référence est toujours inférieure à 4% quelle que soit la valeur du saut de taille de maille à la frontière. Cette valeur est beaucoup plus élevée aux deux autres points de mesure où l'erreur augmente jusqu'à un maximum de 9,2 %.
En conclusion, lorsque la frontière entre les blocs est située à 1,25 m du foyer, même avec le saut de taille de maille égal à quatre, le maillage grossier du bloc 2 a très peu d'influence sur la combustion et les températures atteintes dans le bloc 1. Dans le bloc 2, l'écart relatif par rapport à la température du cas de référence est inférieur à 5% pour le rapport 2, ce qui est acceptable pour notre application. Elle devient trop élevée pour les maillages plus grossiers.

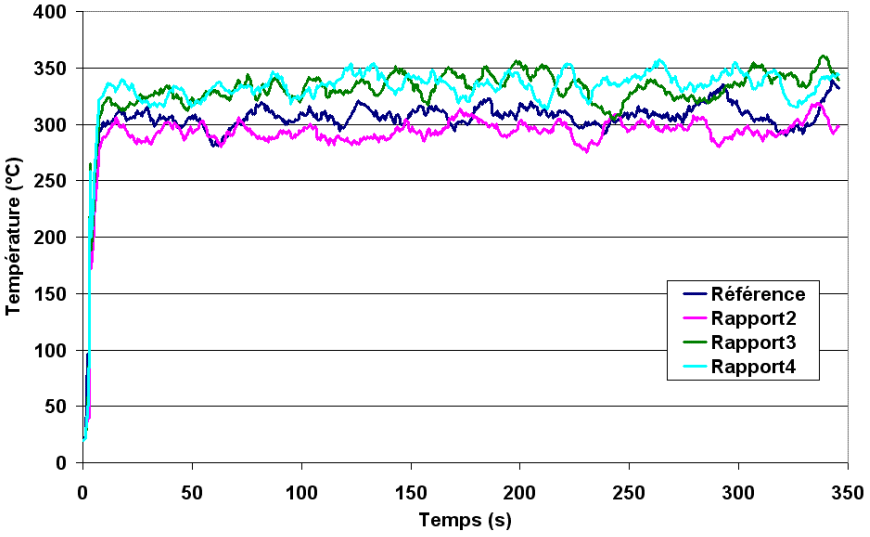
	Référence	Rapport 2	Rapport 3	Rapport 4
Température moyenne CJ35 (°C)	323	315	335	336
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	2,5	3,7	4
Température moyenne CJ45 (°C)	305	291	329	332
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	4,6	7,8	8,8
Température moyenne CJ55 (°C)	292	296	319	318
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	1,4	9,2	8,9

149. *Température moyenne sur 350 s aux points de mesure CJ35, CJ45 et CJ55*

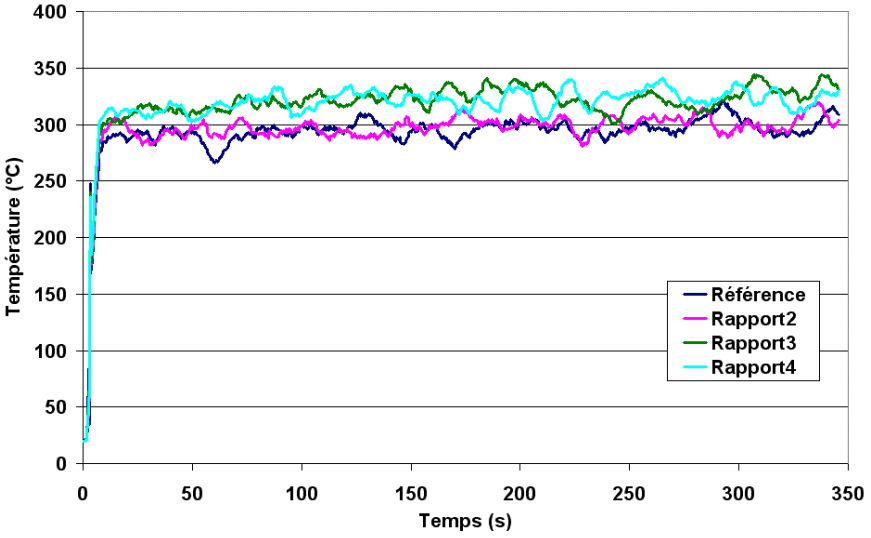
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



150. *Température au point CJ35 pour les maillages non-conformes*



151. *Température au point CJ45 pour les maillages non-conformes*



152. *Température au point CJ55 pour les maillages non-conformes*

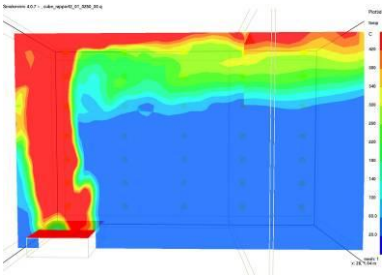
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

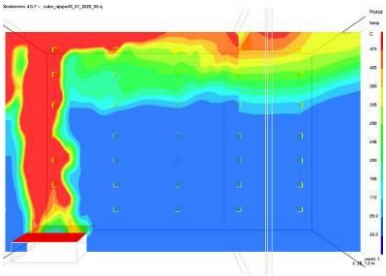
Champs de température, de pression et de vitesse verticale sur l'axe de symétrie du domaine de calcul

Les vues 153 à 161 font apparaître des discontinuités dans les champs de température, de pression et de vitesse verticale au passage de la frontière entre les deux blocs dans la partie supérieure du domaine de calcul. Il est important de noter que cette frontière a très peu d'influence sur l'écoulement en amont et notamment dans la zone autour du brûleur. Il aurait pu être observé, directement en amont de la frontière, des ondes de pression, des chutes de vitesse ou encore des problèmes de recirculation près de la source ; ce n'est pas le cas dans cette configuration.

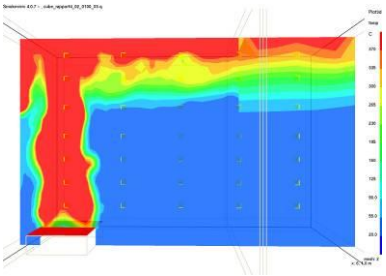
Compte tenu du saut de taille de maille au passage de la frontière, l'apparition de discontinuités dans les champs n'est pas choquante. Ces discontinuités sont admissibles car dans les cas simulés la dynamique de l'écoulement n'est pas modifiée en amont de la frontière et très peu en aval. Les valeurs des quantités scalaires et vectorielles obtenues dans le bloc maillé plus grossièrement sont tout de même parfois assez différentes d'un cas à l'autre : la pression pour les cas rapport 3 et 4 est supérieure de 30% à celle obtenue pour les cas de référence et rapport 2.



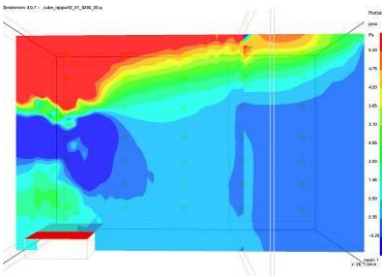
153. *Champ de température à 250s pour le cas rapport2*



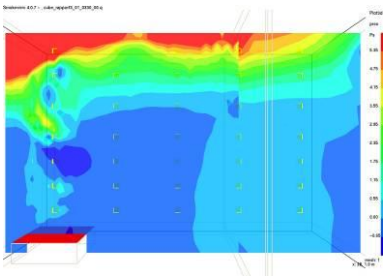
154. *Champ de température à 220s pour le cas rapport3*



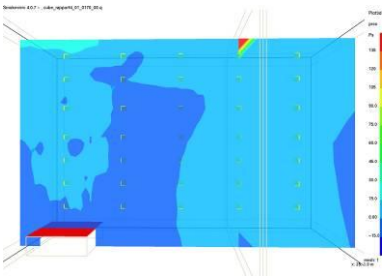
155. *Champ de température à 100s pour le cas rapport4*



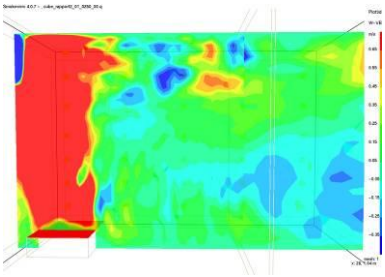
156. *Champ de pression à 200s pour le cas rapport2*



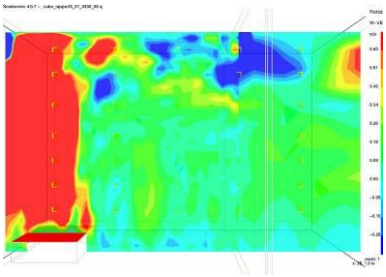
157. *Champ de pression à 300s pour le cas rapport3*



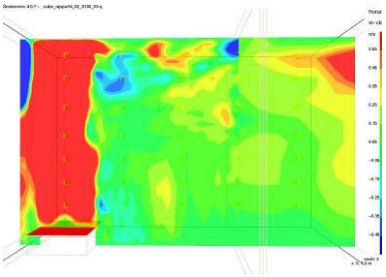
158. *Champ de pression à 170s pour le cas rapport4*



159. *Champ de vitesse verticale à 250s pour le cas rapport2*



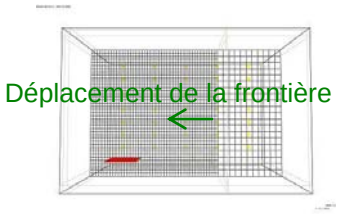
160. *Champ de vitesse verticale à 330s pour le cas rapport3*



161. *Champ de vitesse verticale à 100s pour le cas rapport4*

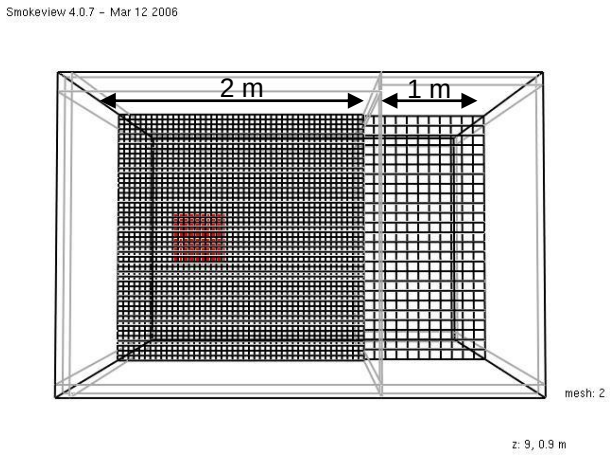
3.3.6.9.5 Influence sur le foyer de la proximité de la frontière entre les deux blocs

Dans les cas présentés précédemment, la frontière entre les blocs est située à 1,5 m du foyer. Afin d'évaluer l'influence de la proximité de cette frontière avec le foyer, elle est progressivement déplacée dans le sens indiqué sur le schéma 162.

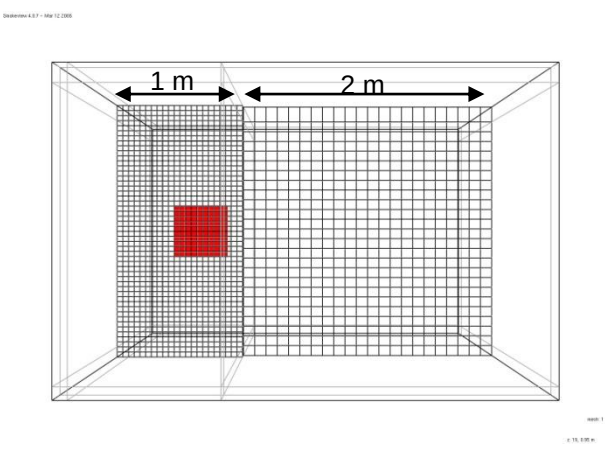


162. *Sens du déplacement de la frontière*

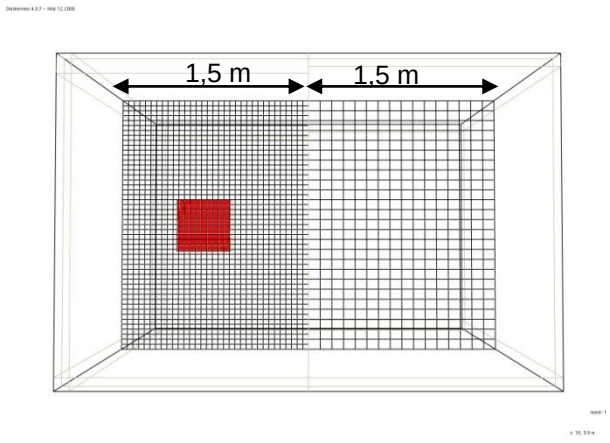
Trois nouveaux cas sont ainsi créés (cf. figures 163 à 166). Dans le cas appelé frontière 2, le bloc 1 ne mesure plus que 1 m de longueur et donc 2 m pour le bloc 2. Le rapport du saut de taille de maille au passage de la frontière entre les deux blocs est toujours fixé à deux selon les trois directions de l'espace. Le domaine de calcul est ensuite séparé en deux blocs de tailles égales pour le cas frontière 3. Ils mesurent alors chacun 1,5 m de longueur. Et enfin, dans le dernier cas appelé frontière 4, le bloc 1 a une longueur de 1,75 m et le bloc 2 de 1,25 m. À ces trois simulations peut se rajouter le cas rapport 2 présenté précédemment dans lequel le bloc 1 mesure 2 m de long et le bloc 2 1 m.



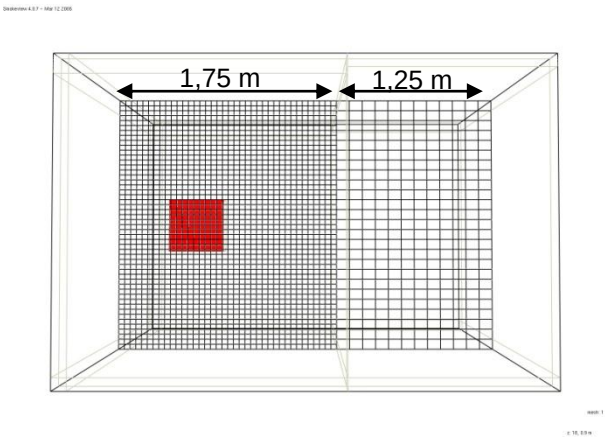
163. *Rapport 2*



164. *Frontière 2*



165. *Frontière 3*

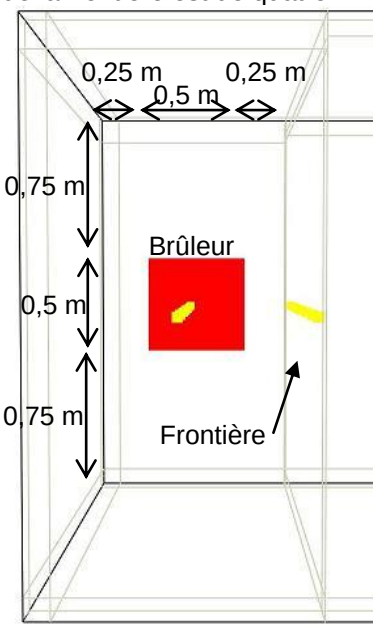


166. *Frontière 4*

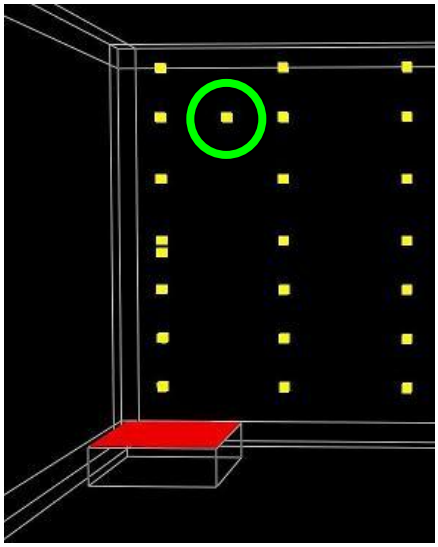
Les conclusions issues de l'analyse des résultats des cas frontière 3 et 4 sont identiques à ceux obtenus précédemment et en particulier ceux du rapport 2. La frontière et le bloc 2 n'ont pas d'influence sur l'écoulement dans le bloc 1. Par la suite, l'étude se focalise sur le cas le plus extrême

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

appelé frontière 2 qui est également décliné en une autre version où le rapport de taille de maille au passage de la frontière est de quatre.

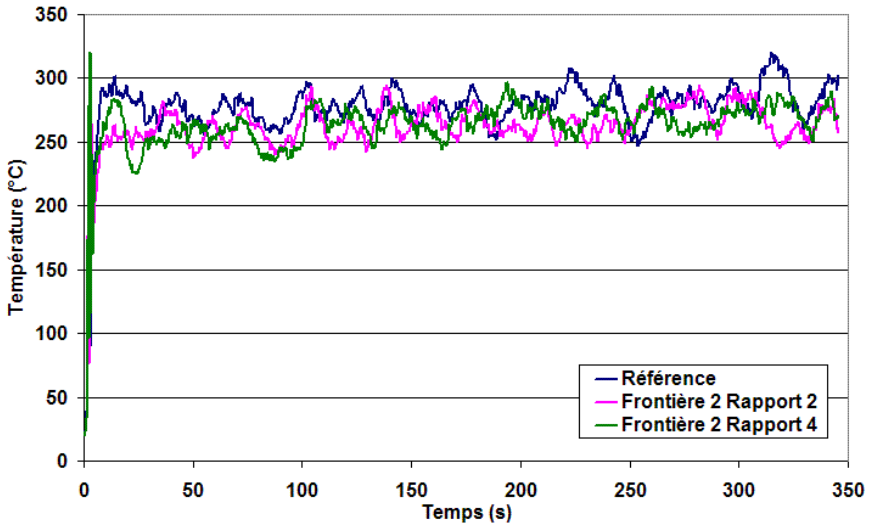


167. *Position du brûleur par rapport à la frontière et aux parois du parallélépipède*



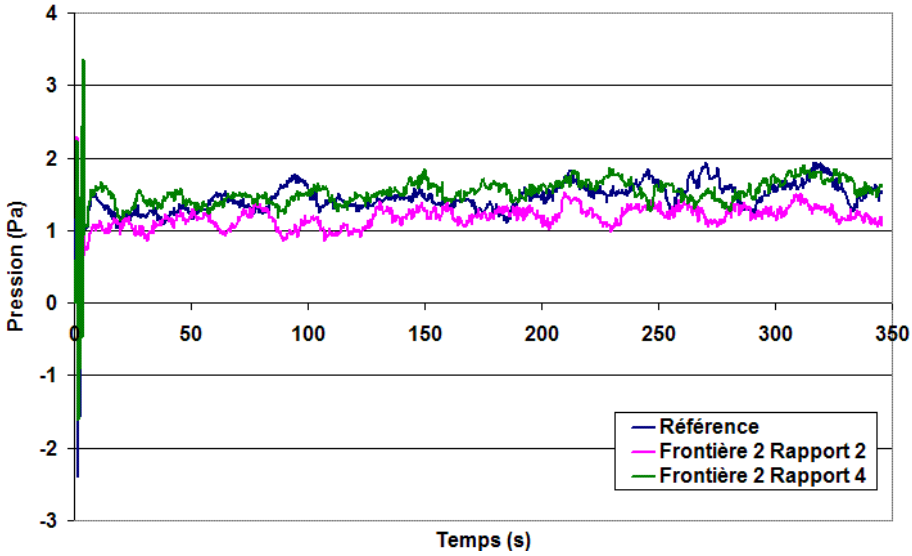
168. *Emplacement du point de mesure supplémentaire (cercle vert sur la figure)*

Lorsque la frontière est placée à 25 cm du brûleur, quel que soit le maillage utilisé dans le bloc 2, celui-ci a une forte influence sur le foyer et en particulier sur la température, la fraction de mélange et la pression atteintes dans le bloc 1 (voir les graphiques 169 à 172). Pour ces scalaires, l'écart relatif maximal par rapport au cas de référence est obtenu sur la pression avec une sous-estimation de 20 % de la valeur simulée du cas rapport 2 (cf. tableau 173).

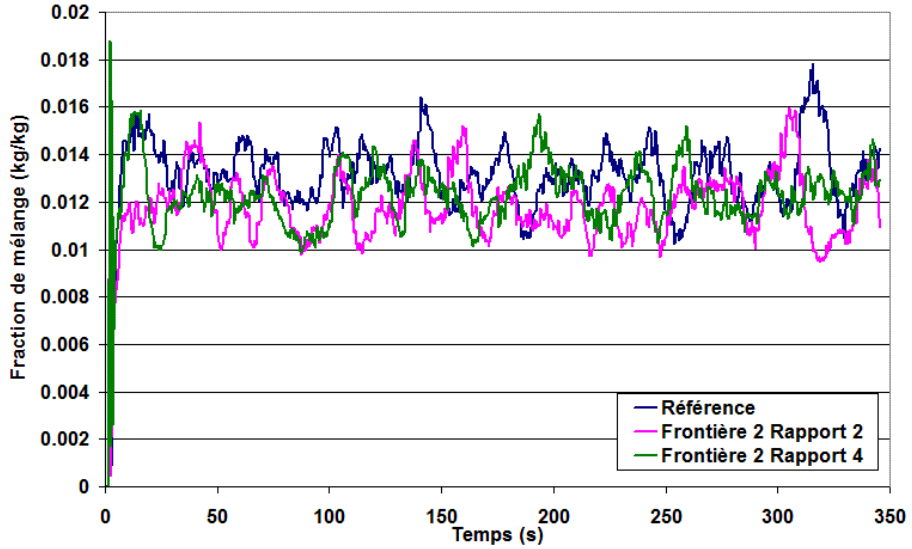


169. *Température au point de mesure supplémentaire*

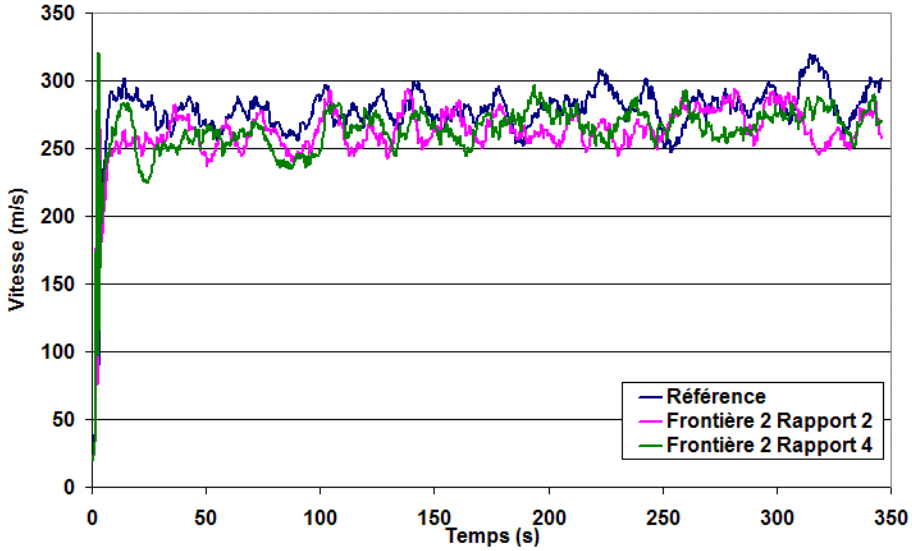
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



170. *Pression au point de mesure supplémentaire*



171. *Fraction de mélange au point de mesure supplémentaire*



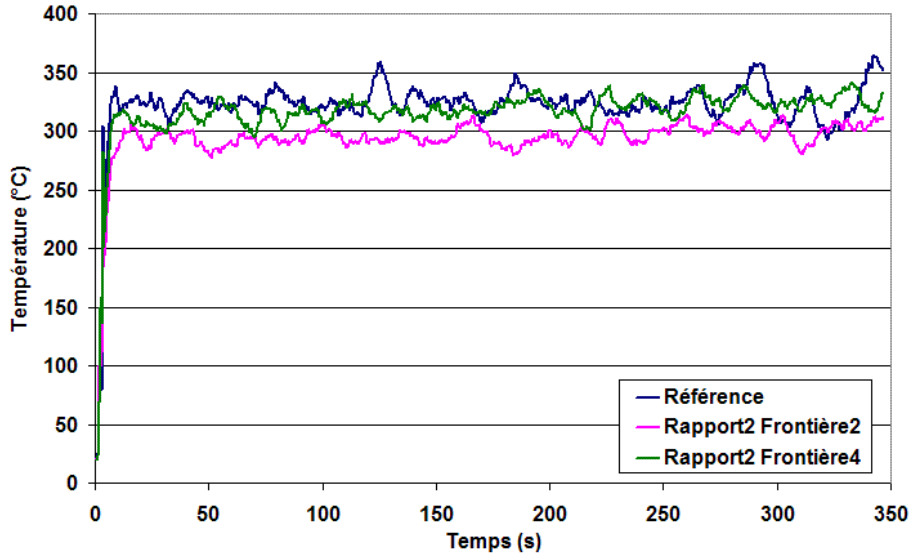
172. *Vitesse au point de mesure supplémentaire*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

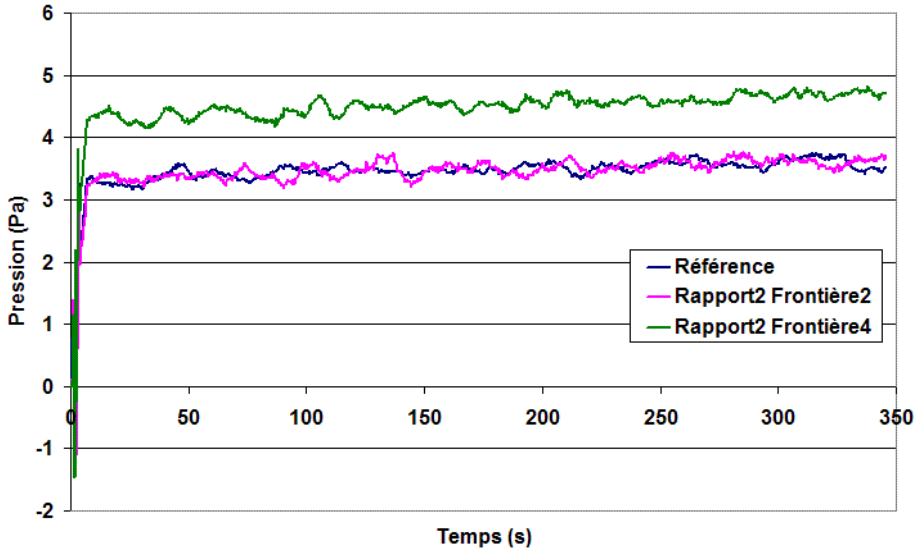
	Référence	Frontière2 Rapport2	Frontière2 Rapport4
Température moyenne (°C)	280	265	267
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	5,4	4,9
Pression moyenne (Pa)	1,5	1,2	1,55
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	20	3,7
Fraction de mélange moyenne (kg/kg)	0,0132	0,0117	0,0123
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	10,8	6,3
Vitesse moyenne (m/s)	1,38	1,40	1,41
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	1	2,4

173. *Température moyenne, pression moyenne, fraction de mélange moyenne et vitesse moyenne au point de mesure supplémentaire*

Par rapport au cas de référence, des différences non négligeables apparaissent pour les cas frontière2 rapport 2 et 4 en aval de la frontière au point de mesure CJ35 aussi bien pour les valeurs de pression que de température (cf. graphiques 174 et 175). L'écart relatif maximal en ce point de mesure est d'environ 9 % sur la température et 30 % sur la pression (cf. tableau 176).



174. *Température au point de mesure CJ35*



175. *Pression au point de mesure CJ35*

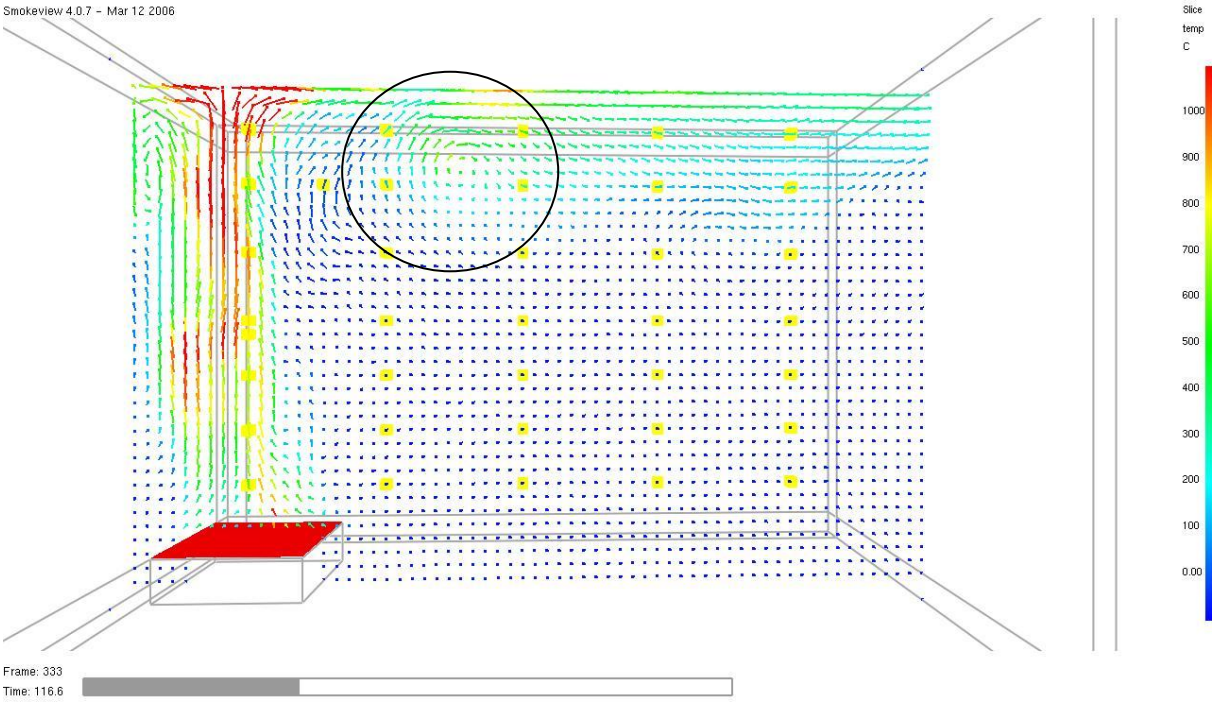
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

	Référence	Frontière2 Rapport2	Frontière2 Rapport4
Température moyenne (°C)	326	297	321
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	8,8	1,5
Pression moyenne (Pa)	3,51	3,52	4,55
Écart relatif par rapport au cas de référence (%)	0	0,1	30

176. *Température moyenne, pression moyenne au point de mesure CJ35*

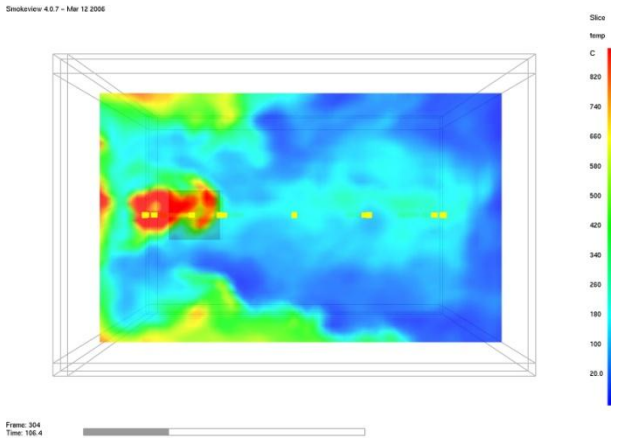
Dans le bloc 1, les mêmes tendances générales de l'écoulement sont observées pour chaque maillage : des recirculations et des tourbillons apparaissent en général à des temps et selon des fréquences assez proches. Un écart relatif non négligeable sur la température et la pression simulées est cependant faite par rapport au cas de référence (cf. tableau 176). Positionner la frontière entre les blocs à un demi-diamètre du foyer a donc une influence importante sur l'écoulement et la combustion dans le bloc maillé le plus finement. Dans le bloc 2 maillé plus grossièrement, des différences plus marquées par rapport au cas de référence apparaissent en étudiant la dynamique de l'écoulement. Des structures tourbillonnaires observées sur le cas de référence (voir l'image 177) n'apparaissent pas avec les maillages plus grossiers du bloc 2.

En étudiant les températures atteintes dans un plan horizontal à 1,5 m du sol (voir les figures 178 et 179), un effet de dilution des températures est observé pour le cas frontière 2 rapport 4. En effet, le maillage étant beaucoup plus grossier dans cette configuration, les champs ont tendances à s'uniformiser dans le bloc 2. Cependant, dans notre cas d'étude, les caractéristiques générales de l'écoulement comme la stratification entre les zones chaude et froide ou encore la hauteur de cette stratification sont toujours équivalentes quel que soit le maillage utilisé.

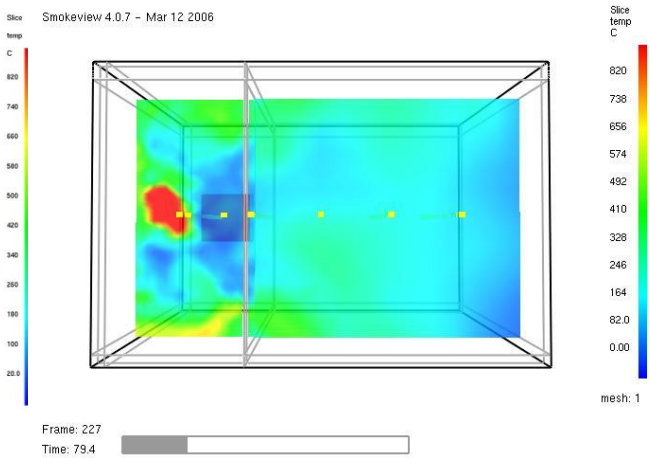


177. *Températures et vecteurs vitesses à 116 s dans le plan X=1 m pour le cas de référence*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



178. *Température pour le cas de référence dans un plan horizontal à 1,5 m du sol*



179. *Température pour le cas de frontière 2 rapport 4 dans un plan horizontal à 1,5 m du sol*

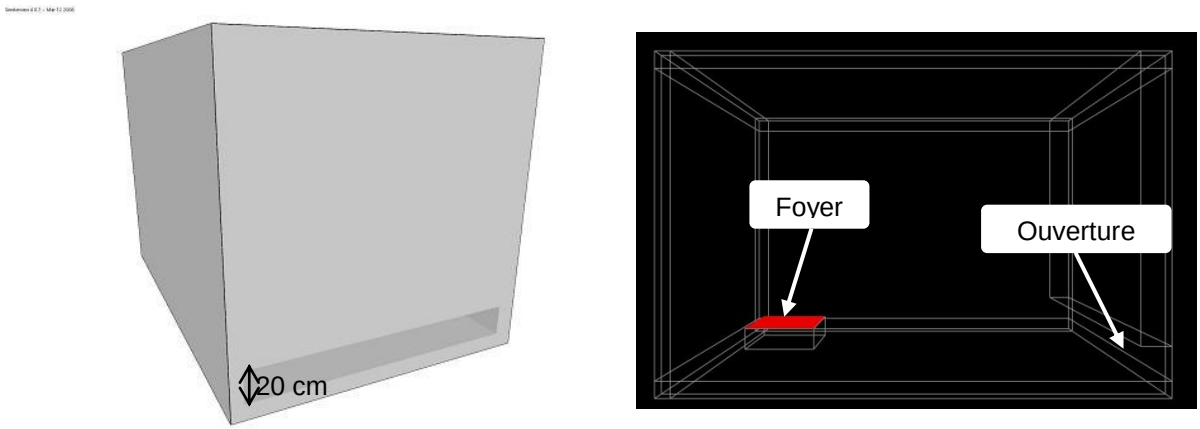
En conclusion, lorsque la frontière entre deux blocs est placée à plus d'un diamètre du foyer :

- Il existe des différences au niveau de la dynamique de l'écoulement dans le bloc maillé plus grossièrement, quel que soit le rapport de taille de maille au passage de la frontière. Certaines structures tourbillonnaires ne sont pas observables mais la tendance générale à la stratification l'est. Il existe souvent des discontinuités dans les champs de température, de vitesse et de pression au passage de la frontière.
- La frontière entre les deux blocs n'a que très peu d'influence sur le bloc maillé plus finement pour tout ce qui concerne la dynamique de l'écoulement ainsi que pour les valeurs de température, de vitesses, de pression, et de débits massique et volumique.
- L'utilisation des résultats obtenus avec un maillage multibloc est envisageable soit sur les premiers instants du feu, soit tant que l'apport d'air vers le foyer n'est pas un facteur limitant. Il faudra toujours se situer dans un régime de combustion contrôlé par le combustible.
- Enfin, d'un point de vue matériel, le coût de calcul pour les cas frontière 2 rapport 2 et cas frontière 2 rapport 4 est nettement inférieur à celui du cas de référence. Les temps de calcul passent respectivement de 7h15 et 6h30 à 16h, soit plus de deux fois moins pour une diminution du nombre de cellules dans le domaine de calcul du même ordre. L'utilisation d'une méthode de raffinement par bloc diminue très sensiblement les temps de calculs tout en conservant dans le domaine maillé le plus finement des résultats de même qualité qu'un maillage uniforme.

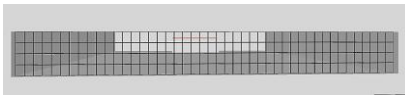
3.3.6.9.6 Cas d'étude ayant une combustion contrôlée par la ventilation

À partir du parallélépipède présenté précédemment, un nouveau cas est créé. Son régime de combustion est contrôlé par la ventilation. Pour cela, l'unique frontière ouverte du domaine de calcul est obstruée sur la quasi totalité de sa hauteur. Seule une ouverture de 1,80 m de large pour 0,20 m de haut est conservée (voir l'image 180). La combustion étant dorénavant contrôlée par la ventilation, le maillage de l'ouverture revêt donc une importance supplémentaire. Trois maillages sont considérés : le cas de référence et les cas frontière 2 rapport 2 et 4 définis précédemment. Ainsi, l'ouverture est respectivement maillée sur sa hauteur avec 4, 2 et 1 cellules (voir les images 181 à 183).

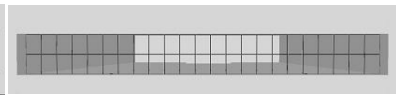
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



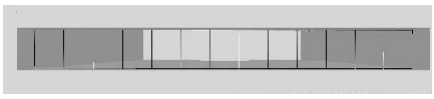
180. *Vue générale et latérale du cube obstrué*



181. *Maillage de l'ouverture pour le cas de référence*

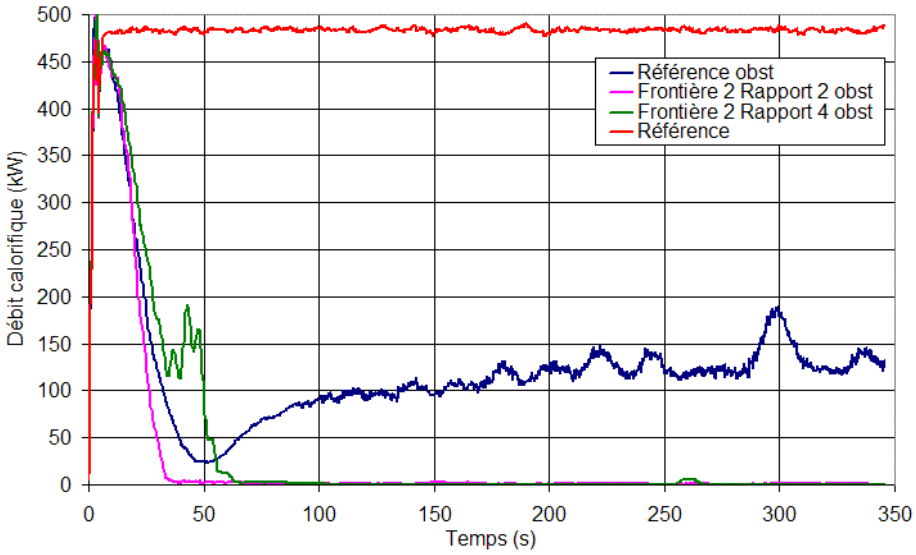


182. *Maillage de l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 2*



183. *Maillage de l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 4*

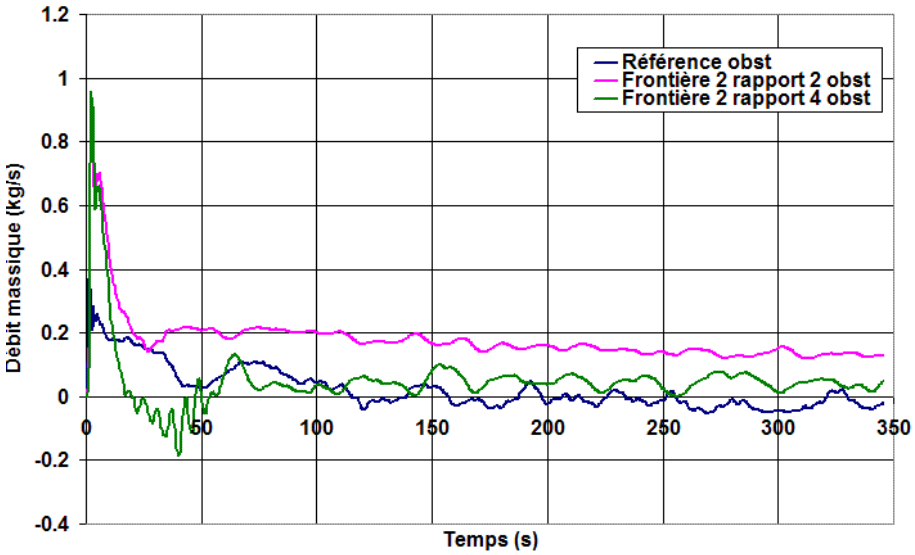
Sur le graphique 184 sont tracés les débits calorifiques des trois cas obstrués et du cas de référence lorsqu'il n'est pas obstrué. Pour le cas de référence non obstrué, le débit calorifique se stabilise très rapidement autour d'une valeur constante égale à 480 kW jusqu'à la fin de la simulation : la combustion est contrôlée par le combustible. Ce n'est pas le cas des autres configurations qui, après un maximum de 500 kW, ont une décroissance très rapide du débit calorifique : il n'y a plus assez de comburant dans le parallélépipède pour que l'ensemble du combustible dégagé par le brûleur soit consommé. Le feu est alors contrôlé par la ventilation. À partir de ce moment, le combustible n'est plus consommé à la verticale du brûleur mais près de l'ouverture où de l'oxygène est disponible : il y a un déplacement du front de flamme. Après la chute rapide du débit calorifique jusqu'à 25 kW environ, la valeur pour le cas de référence obstrué augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur constante égale à 125 kW environ. Cette augmentation n'est pas observée pour les deux autres cas obstrués pour lesquels le débit calorifique reste quasiment nul. Il faut voir ici un effet du maillage sur la ventilation.



184. *Débit calorifique pour les cas obstrué et le cas de référence*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

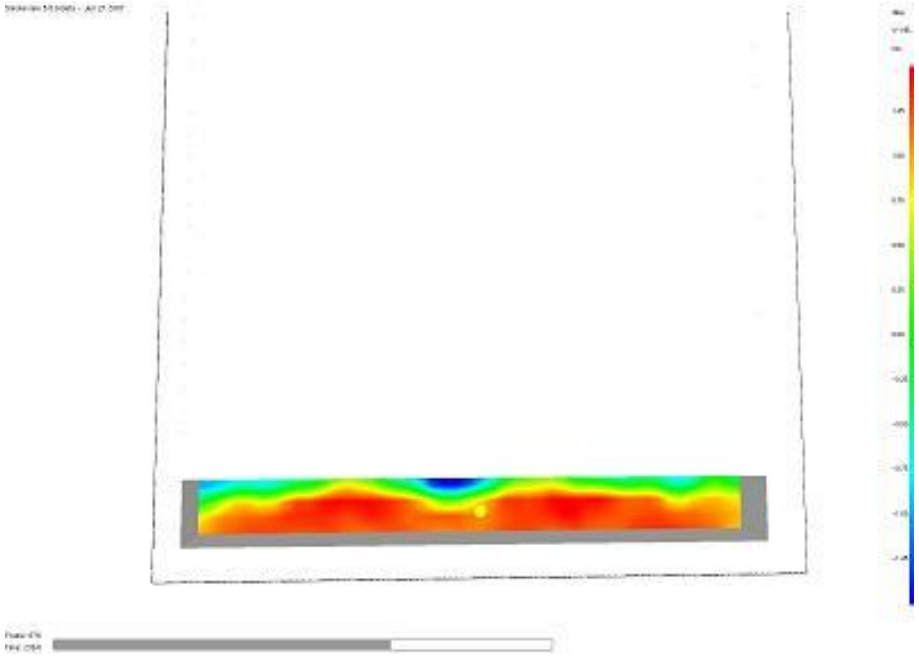
Le débit massique à travers l'ouverture est toujours positif pour le cas frontière 2 rapport 2 : il y a toujours plus de gaz qui rentre dans le volume de calcul que ce qu'il en sort (voir le graphique 185). L'ouverture est entièrement utilisée pour évacuer les gaz éjectés par le brûleur. Le débit calorifique devient alors nul lorsque l'ensemble du parallélépipède est rempli de combustible et que l'air présent au début de la simulation a été soit consommé par combustion, soit éjecté avec les gaz de combustion. Pour le cas rapport 2 frontière 4, le débit massique est, après 50 s, très majoritairement positif. Comme pour le cas rapport 2 frontière 2, le débit calorifique est alors nul. Ce n'est pas le cas de la simulation de référence pour laquelle le débit massique oscille entre une valeur positive et une valeur négative : les échanges de matières entre le parallélépipède et l'extérieur s'équilibrent de telle façon que la combustion ait lieu à l'intérieur du parallélépipède.



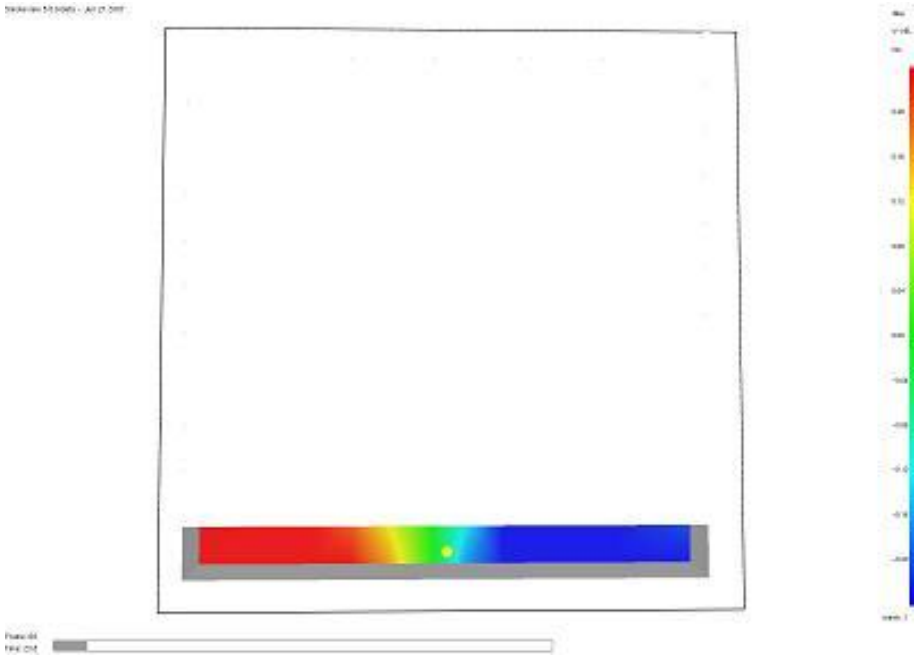
185. *Débit massique à travers l'ouverture pour les cas référence, frontière 2 rapport 2 et frontière 2 rapport 4*

Ainsi, si moins de quatre cellules sont disposées au niveau de l'ouverture, la sortie des gaz de combustion et l'apport d'air frais par cette ouverture ne sont pas simulés correctement d'un point de vue physique. Lorsque moins de quatre cellules sont utilisées pour mailler l'ouverture, il n'y a à aucun moment sur la surface de l'ouverture un gradient horizontal des vitesses avec une partie qui est utilisée pour expulser les gaz du volume et l'autre pour en faire rentrer (voir l'image 186). Pour les simulations ayant moins de quatre cellules verticales sur l'ouverture, le gradient devient alors horizontal et n'est jamais vertical (voir l'image 187)

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



186. *Champ de vitesses perpendiculaires à l'ouverture pour le cas de référence*



187. *Champ de vitesses perpendiculaires à l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 4*

3.3.7 Conclusion sur la validation de l'outil numérique

Le paragraphe 3.3 s'est intéressé à la validation de FDS pour une utilisation dans un cadre d'investigation. Après une présentation de la démarche générale de validation et de vérification d'un outil de simulation, un critère de maillage a été recherché afin que les résultats de simulation ne soient plus dépendants de la taille de cellule utilisée dans le calcul. Le cas d'étude fictif d'un incendie dans une chambre d'hôtel a été considéré. Après avoir simulé le cas avec diverses configurations de taille de maille, il a été déterminé qu'en utilisant des cellules dont le R^* est inférieur ou égal à 0,067, une convergence des résultats des simulations en fonction de la taille de maille est atteinte.

Fort de ce premier critère obtenu suite à l'étude de sensibilité effectuée sur un cas complet, une validation sur des sous-systèmes a été menée. Au contraire du cas de la chambre d'hôtel, les

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

simulations ont alors été comparées à des corrélations ou à des mesures. La hauteur et la température de flamme et la température et la vitesse dans les écoulements du panache et du jet sous plafond ont donc été étudiées. Un R^* de 0,06, de l'ordre de celui trouvé pour la chambre d'hôtel, a été déduit des simulations afin d'atteindre une convergence des résultats en fonction de la taille de maille ainsi qu'un écart relatif des simulations par rapport à l'expérience ou aux corrélations jugé comme acceptable pour une application en investigation incendie. En effet, il ne faut pas oublier que les incertitudes des données d'entrée se révèlent parfois assez élevées en investigation car les quantités et natures exactes des combustibles ne sont pas toujours facilement accessibles à posteriori. Il n'est alors pas toujours nécessaire de rechercher des simulations précises au pourcent près. Cette valeur de R^* offre donc le meilleur compromis entre temps de calcul et qualité du résultat.

Malheureusement, un R^* égal à 0,06 correspond, pour les débits calorifiques rencontrés, à des petites tailles de cellules de l'ordre de 10 cm pour un foyer de 3,6 MW. Les temps de calcul sont par conséquent élevés. Diverses stratégies de maillages ont alors été éprouvées sur le cas fictif de la chambre d'hôtel et d'un volume parallélépipède uniquement ouvert sur une face. Ces simulations ont permis de déterminer quelques règles élémentaires à respecter lors de la définition des maillages afin d'éviter des erreurs lorsque le maillage est constitué de plusieurs blocs.

En conclusion de ce paragraphe, la mise en œuvre de FDS dans un objectif de simulation de scénarios d'incendie est donc jugée comme envisageable. Il faudra tout de même respecter certaines règles lors de l'élaboration du maillage afin d'assurer la validité des résultats.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4 Méthodologie d'investigation

4.1 Pourquoi une investigation post incendie ?

L'investigation post incendie est une discipline qui trouve, de nos jours, de nombreuses justifications à son existence. Actuellement, elle est majoritairement appliquée à des fins judiciaires afin de déterminer l'origine criminelle ou accidentelle d'un incendie et de rechercher plus avant des responsables. Cependant, il ne faut pas négliger les aspects de retour d'expérience que peuvent revêtir les investigations. Ainsi, les préventionnistes étudient par exemple le fonctionnement des dispositifs de sécurité (d'un détecteur de fumée, d'un extracteur, d'un groupe électrogène, …) ou le comportement des personnes lors de l'évacuation, les pompiers s'intéressent à l'aspect intervention, les assureurs à des dysfonctionnements récurrents de systèmes à l'origine de l'incendie, etc.. Ces derniers sont également souvent missionnés pour étudier les responsabilités des différentes parties assurées dans la cause et le développement de l'incendie et ainsi déterminer qui prendra à sa charge les indemnisations.

4.2 Méthodologie générale d'investigation basée sur l'expertise

En France, l'investigation post incendie est traitée par de nombreux protagonistes issus de formations et d'horizons très divers :

- Dans un cadre judiciaire, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris, l'Institut National de Police Scientifique, l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale et les experts judiciaires nommés par les tribunaux se partagent le travail en fonction de leurs missions et de leur zone territoriale d'action.
- De nombreux experts exercent à titre privé au profit de compagnies d'assurances.
- Des cellules d'investigations ont commencé à naître très récemment au sein de la Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris, et des Services Départementaux d'Incendie et de Secours, les plus actifs étant ceux des Yvelines (78) et du Val d'Oise (95). Bien qu'un arrêté autorise dorénavant les pompiers à être nommés comme experts judiciaires, ils n'ont toujours aucune légitimité à exercer cette fonction dans un cadre judiciaire sans avoir été préalablement requis.
- Des préventionnistes qui s'intéressent au fonctionnement de la stratégie de sécurité incendie mise en place, dans un objectif de retour d'expérience afin de faire évoluer la réglementation.

Tous ces experts en investigation post incendie ont un objectif en commun, à savoir la détermination des causes de l'incendie et l'explication, en s'appuyant sur un raisonnement scientifique, de son développement. Cependant, du fait de leurs fonctions au sein des différentes entités présentées précédemment, les experts en investigation post incendie n'étudient pas toujours le sinistre avec le même regard, dans le même but. Les experts privés des assurances cherchent en premier lieu à déterminer les responsabilités des assurés concernés par le sinistre. Les investigateurs travaillant pour des autorités policières sont plus intéressés par la recherche d'une nature criminelle de l'acte. Cela pourrait expliquer l'absence au niveau français de méthodologie d'investigation post incendie commune et reconnue, qui servirait de référence comme c'est le cas aux États-Unis et dans la majorité des pays anglo-saxons avec le Guide for fire and explosion investigations rédigé par le National Fire Protection Association [NFPA 2001].

L'incendie, tout comme l'explosion, est souvent considéré comme un domaine très cloisonné par rapport aux autres missions de police scientifique. Pourtant, ils partagent les mêmes méthodologies de recherche d'informations exploitant les traces physico-chimiques laissées sur une scène. C'est

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

sans nul doute les effets destructeurs du feu qui marginalisent l'expertise post incendie des autres disciplines. En effet, lorsque l'expert se rend sur une scène d'incendie, il trouve les lieux dans une configuration très modifiée de l'environnement ayant vu naître le départ du feu. Les phénomènes de surpressions, les hautes températures atteintes ou encore les dépôts de suie engendrés par l'incendie interagissent sur les lieux en déformant les structures, brisant les fenêtres, salissant les murs. Toutes ces actions ont pour conséquence de modifier, effacer ou détruire la majorité des traces permettant à l'expert de remonter facilement jusqu'à la cause du sinistre. À cela, il ne faut pas oublier d'ajouter l'intervention des services de secours, dont le rôle de protection envers les personnes et les biens prime sur la nécessité de préservation des lieux en vue de l'enquête post incendie. Il incombe donc à l'expert d'intégrer, par exemple, les conséquences de l'actionnement d'un ouvrant de désenfumage d'une cage d'escalier, du bris d'une fenêtre, du déplacement d'une victime par les sapeurs-pompiers ou encore le déblai partiel voire total d'une pièce concernée par l'incendie.

L'investigation sur les lieux de l'incendie a pour but la collecte d'informations nécessaires à la détermination de la cause de l'incendie. Pour remonter jusqu'à cette cause, l'expert doit être méthodique et ne pas sauter d'étapes dans l'ordre immuable des actions à mener. En l'occurrence, il faut commencer par trouver l'origine spatiale et temporelle de l'incendie. Une fois cette origine déterminée, il commence ensuite à travailler sur la cause de l'incendie. L'origine et la cause sont intimement liées. Trouver et justifier la seconde sans avoir au préalable travaillé sur la première est improbable, voire impossible. Enfin, l'investigateur se prononce sur la capacité de cette cause à générer le départ de l'incendie constaté ainsi que la propagation. La démarche d'investigation est développée dans la suite de ce chapitre. Sa rédaction s'est basée sur divers documents [PIEROPAN 2001] [GARDINER 2001], ainsi que sur la formation prodiguée au LCPP sur le terrain par des investigateurs expérimentés.

4.2.1 Approche spatiale : D'une vue d'ensemble à celle du détail

L'origine d'un incendie est l'endroit où le foyer initial a pris naissance, c'est-à-dire l'emplacement où une énergie calorifique produite est suffisamment élevée pour que le feu se propage au combustible adjacent. L'origine d'un incendie est donc une zone très localisée que l'expert doit situer dans des lieux parfois extrêmement volumineux. Une des méthodes pour arriver à localiser cette zone consiste à réduire progressivement la zone de recherche, l'expert remonte ainsi jusqu'à la ou les zones susceptibles d'être l'origine de l'incendie.

Pour appliquer cette méthode, il est important de commencer par considérer les lieux sinistrés de manière à avoir une vision globale. Pour un incendie touchant un ou plusieurs appartements dans un ensemble d'immeubles par exemple, l'expert commence son investigation en procédant à une observation extérieure des bâtiments. Cela lui permet d'évaluer, par rapport à celle de l'ensemble de l'immeuble, la superficie de la zone touchée par le feu et les fumées, de récolter des informations susceptibles d'expliquer une propagation par les façades ou par les toitures, ou encore d'évaluer les moyens d'interventions des services de secours.

Sur l'exemple suivant d'un incendie s'étant produit en banlieue parisienne dans un immeuble de six étages sur rez-de-chaussée, ne pas procéder à l'examen extérieur des lieux aurait compliqué la détermination de l'origine de l'incendie.
Un appartement de 25 m² au rez-de-chaussée est totalement détruit. Un second de mêmes dimensions au quatrième étage est également ravagé par l'incendie, ainsi que l'ensemble de la circulation commune de cet étage. Enfin, un troisième appartement de 75 m² situé au cinquième étage présente lui aussi des dégradations importantes.
L'origine de l'incendie est localisée au quatrième étage, et la propagation à l'ensemble de la circulation commune s'explique par la porte laissée ouverte lors de la fuite de la victime se déplaçant en fauteuil roulant. Les dégâts visibles de l'extérieur laissent présager une propagation en façade qui est confirmée par la suite par les investigations au niveau du balcon fortement chargé en potentiel calorifique et qui a été aménagé de façon à agrandir la cuisine.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

188. *Vue extérieure depuis une cour intérieure d'une façade du bâtiment sinistré*

L'origine de l'incendie au rez-de-chaussée est moins évidente à déterminer. En effet, les dégradations de l'appartement sont quasiment uniformes et la majorité des éléments mobiliers a été détruite par les flammes ou déplacée par les sapeurs-pompiers lors des opérations de déblai ce qui ne facilite pas les constatations techniques. Une propagation par l'intérieur du bâtiment est improbable car seul l'appartement est concerné par l'incendie au rez-de-chaussée. Cependant, après l'examen de la façade, il est envisagé une propagation suite à la chute de matière enflammée à partir des quatrième et cinquième étages. Une fouille des débris au pied de l'immeuble devant la fenêtre de l'appartement a mis en évidence la présence d'une faible quantité de plexiglas provenant des gardes corps des balcons et étayant la thèse de la chute de matière enflammée. Des essais ont par la suite été effectués en laboratoire et ont révélés un matériau au comportement fusible, très facilement inflammable. Cet exemple montre bien l'importance de considérer dès le début des investigations les lieux dans leur ensemble.

L'étape suivante dans la recherche de l'origine de l'incendie est la visite par l'expert de l'intérieur du volume, et plus précisément de l'ensemble des lieux touchés par l'incendie. Cela lui permet ainsi d'évaluer les zones où les dégâts les plus sévères sont observables. L'expert réalise ainsi une cartographie de l'importance des dégâts. Dans l'ordre des dégradations, une calcination est synonyme d'une sollicitation thermique plus importante qu'un simple dépôt de fumées qui n'est d'ailleurs lui-même pas directement synonyme d'une sollicitation thermique mais reste cependant une conséquence de l'incendie. Et plus les calcinations sont importantes, plus le feu s'est maintenu dans cette zone. Lors de cette étape, l'expert doit s'appuyer sur ses connaissances scientifiques, notamment sur les caractéristiques des matériaux, pour estimer les sollicitations thermiques nécessaires pour les dégrader[12].

L'origine du foyer peut être contenue dans la zone où les sollicitations thermiques sont les plus importantes. Cependant, il faut, pour en être sûr, vérifier que la charge calorifique est répartie uniformément dans le volume. En imaginant un embrasement généralisé dans un volume où la charge calorifique est répartie uniformément, les dégradations attendues sont identiques partout. Dans le cas contraire, comme un canapé disposé au centre de la pièce dont le sol est combustible, les dégradations du plafond à la verticale du canapé sont plus marquées qu'ailleurs. Par conséquent, les investigateurs peuvent alors être tentés de situer l'origine de l'incendie à l'emplacement du canapé même si ce n'est pas le cas. Cela illustre l'importance d'observer la répartition des charges combustibles et d'intégrer dans l'analyse une disposition non uniforme. Le second point à vérifier est l'uniformité de l'apport d'air dans le volume concerné par l'incendie. En effet, dans le cas d'un feu contrôlé par la ventilation, la combustion, et par conséquent le dégagement d'énergie, se fait

[12] Un recensement plus exhaustif et plus détaillé d'indicateurs de températures et de sollicitations thermiques susceptibles d'engendrer des dégradations est effectué dans la suite du document au paragraphe 4.4.2.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

prioritairement à proximité de l'ouverture par laquelle l'air est amené. Les dégradations dans une telle configuration ont donc tendance à être supérieures à proximité de l'ouverture plutôt qu'à l'opposé et cela même si la charge calorifique est disposée uniformément. Ensuite, l'action des sapeurs-pompiers lors de l'extinction est également un paramètre important à intégrer dans l'analyse de l'incendie. Si l'attaque du feu n'a pas été uniforme, les zones les plus éloignées des portes lances continuent à se consumer alors que d'autres sont déjà éteintes. Enfin, l'observation d'un embrasement généralisé est également primordiale à prendre en compte.

L'atteinte de conditions d'embrasement généralisé change parfois l'interprétation de certaines dégradations. Sur les exemples qui suivent, le dépôt de suie ou la calcination peuvent être interprétés de deux façons distinctes par l'expert. Sur la photo 189, les dégradations constatées sur site ne permettent pas de conclure à un embrasement généralisé. Aucun rayonnement en direction de l'élément mobilier et aucune chute de matière enflammée n'expliquent son inflammation : il constitue l'origine ou l'une des origines de l'incendie. Dans ce cas, les dégradations en forme de V sur la paroi en plâtre à la verticale de l'élément combustible (délimité par les traits rouges sur la photo 189) sont caractéristiques de l'origine de l'incendie. Après un embrasement généralisé, les mêmes dégradations en forme de V sur le mur de la photo 190 (encore délimité par les traits rouges) sont interprétables d'une façon différente : l'origine du feu n'est pas obligatoirement située à cet emplacement car l'inflammation de la literie est une conséquence de l'embrasement généralisé et non plus l'origine de l'incendie. La forte énergie dégagée dans la pièce et la présence contre la paroi de meubles à l'emplacement où des suies sont encore visibles, ont provoqué les effets en V observables sur le dépôt de suie. Dans le premier cas, la forme en V du dépôt de suie sur les parois s'explique par l'expansion latérale du panache thermique causé par le cisaillement provoqué par l'air environnant sur les gaz de combustion en mouvement ascensionnel. Il peut également être la conséquence de la propagation de flammes sur une paroi combustible, la vitesse de propagation latérale étant inférieure à la verticale.

189. *Conditions d'embrasement généralisé non atteintes*

190. *Conditions d'embrasement généralisé atteintes*

Ce sont des exemples simples d'un point de vue de l'investigation, mais ils permettent d'intégrer la notion importante de foyers primaire et secondaire. Le foyer primaire est l'emplacement où l'incendie prend initialement naissance à la suite d'un acte volontaire, accidentel, etc.. Le foyer secondaire est une conséquence du primaire ; il est par exemple provoqué par la chute de brandon ou de matière enflammée sur un matériau combustible, par le rayonnement du foyer primaire ou des fumées, par conduction ou enfin par convection. L'intégration de cette notion est importante lorsqu'une cause volontaire est suspectée. En effet, dans un contexte de feu dans un local cloisonné, la probabilité qu'un incendie se développe à partir de deux foyers primaires est extrêmement faible. Cela est éventuellement envisageable lorsque la cause de l'incendie est imputable à la foudre ou à un court circuit électrique [JACQUEMET PAPILLOUD 2003]. Par conséquent, lorsque plusieurs foyers sont trouvés par l'expert, il doit analyser le déplacement des flammes et des flux de chaleur pour expliquer une éventuelle non continuité du feu.

Dans l'exemple qui suit et qui illustre cette notion de foyers primaire et secondaire, l'incendie s'est déroulé en journée dans un appartement. L'action volontaire est prouvée par la présence d'au moins trois foyers distincts dans trois pièces différentes, sans qu'aucune propagation du feu n'ait été

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

possible de l'un à l'autre. Ces trois foyers constituent des foyers primaires. Un doute persiste dans la pièce principale sur la possibilité d'y avoir également plusieurs foyers primaires supplémentaires.

- Sur la photo 193, les calcinations et le dépôt de suies sur le mur et la combustion totale de la mousse constituant l'assise et le dossier du canapé autorisent à y situer un foyer.
- Sur la photo 192, aucune dégradation imputable à la propagation des flammes n'est visible. Seuls certains éléments plastiques sont légèrement déformés.
- Sur la photo 191, le canapé et le coussin jaune situé sur le sol présentent des traces de carbonisation très prononcées pour le premier et plus légères pour le second. Les fumées dégagées par la combustion du premier canapé correspondant au foyer primaire s'accumulent en partie haute ; la couche de gaz chauds ainsi constituée se stratifie et occupe de plus en plus de place dans le volume. Lorsque ces fumées atteignent la partie haute du dossier du canapé, celles-ci sont à des températures suffisantes pour enflammer le matériau le constituant. Ce canapé est alors considéré comme un foyer secondaire. Au contraire du second canapé, le coussin jaune situé sur le sol n'est jamais plongé dans les fumées chaudes stratifiées. Son inflammation résulte de la chute de matière plastique enflammée provenant du lustre directement à sa verticale, lui-même plongé dans les fumées et donc soumis à des températures suffisantes pour provoquer la fonte du matériau le constituant. Le coussin constitue également un second foyer secondaire.

En conclusion, il a été noté sur cet incendie la présence de trois foyers primaires, lesquels induisent des foyers secondaires.

Photos des dégâts dans le salon de l'appartement

191. *Côté gauche du salon*

192. *Centre du salon*

193. *Côté droit du salon*

Lorsque des matériels électriques sont retrouvés sur les lieux d'un incendie, ils sont parfois utiles pour déterminer son origine. En effet, il arrive très souvent que des matériels électriques (TV, chauffages indépendants, …) soient branchés dans la pièce dans laquelle le feu prend naissance. Lorsque le foyer se propage, les fils d'alimentations ou les matériels eux-mêmes sont soumis à des contraintes thermiques susceptibles de les mettre en défaut et de provoquer des courts-circuits. Ainsi la recherche de perlages d'une taille caractéristique sur les fils d'alimentation électrique [BABRAUSKAS 2003] et une analyse du comportement des protections du tableau électrique du bâtiment permettent dans certains cas de compléter la diminution progressive de l'espace de recherche. Il est envisageable que les protections de la pièce contenant le foyer initial, où celles en communication immédiate, disjonctent en premier. De plus, lorsque le tableau général disjoncte et que le feu se propage dans les pièces plus éloignées, les matériels électriques s'y trouvant ne présentent donc plus les marques caractéristiques du type perlage, d'un matériel alimenté électriquement soumis à une forte sollicitation thermique car ils ne sont tout simplement plus alimentés. En conclusion, la chronologie des déclenchements des protections électriques et des dégradations sur les matériels électriques est parfois à mettre en parallèle de celle du développement du feu.

De manière analogue, il est important dans les bâtiments équipés de système de détecteurs d'incendie d'étudier la chronologie de leur activation au travers d'un système de détection incendie (SDI) ou d'une unité d'aide à l'exploitation (UAE). De nouvelles UAE permettent dans les meilleurs des cas de se renseigner sur les réponses des détecteurs d'incendie dans un établissement recevant du public. Il est ainsi possible de connaître l'évolution spatiale et temporelle de la détection de l'incendie.

La surface d'investigation étant fortement réduite, il lui est alors maintenant possible de se pencher sur la recherche de la cause.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.2.2 À la recherche d'une cause

À ce stade, l'expert se doit de ne négliger aucune hypothèse pouvant mener à la détermination de la cause de l'incendie. Son travail est alors d'associer à chaque sommet du triangle du feu, un élément de la zone d'investigation. Le comburant est en général l'élément le plus facile à justifier car il est rare de travailler sur une investigation post incendie dans des atmosphères pauvres en oxygène. Le combustible est parfois plus complexe à déterminer car les lieux sont souvent très différents de ceux ayant vu naître l'incendie et le support du foyer initial peut avoir disparu suite à sa combustion totale. Cependant, il faut toujours arriver à déterminer sa nature et sa masse pour remonter jusqu'au dernier sommet du triangle du feu, l'énergie d'activation. C'est sans aucun doute l'élément le plus difficile à trouver et à justifier, c'est pourquoi il faut évaluer méthodiquement l'ensemble des sources potentielles de chaleur présent dans la région d'origine avant l'évènement ainsi que leur puissance.

Il est possible de rassembler l'ensemble des sources d'allumages en différents groupes [MARTIN 2008, JACQUEMET PAPILLOUD 2003] :

- Le premier est un allumage par une source d'échauffement, c'est-à-dire un apport de chaleur à un système par conduction, convection ou rayonnement s'effectuant sans flamme ni étincelle. Un tel type d'allumage est très complexe à mettre en évidence. Le système doit être suffisamment isolé pour que l'énergie dissipée par conduction dans le matériau soit inférieure à l'énergie apportée par échauffement. Sans cela, la température du système n'augmente pas suffisamment pour atteindre des valeurs d'inflammation des gaz de pyrolyse. Les échauffements sont de nature très diverses : frottement mécanique, réaction chimique, rayonnement thermique, résistance électrique, …
- Le second mode est un allumage par flamme, que la flamme soit de prémélange comme lors d'un accident ayant pour origine un brûleur à gaz d'une gazinière ou de diffusion avec la flamme de bougie. Aux deux types de flammes, de diffusion et de prémélange, pourrait être rajoutée l'incandescence d'un matériau qui, bien qu'ayant une vitesse de combustion bien plus faible que celle des flammes, dégage une quantité de chaleur non négligeable et susceptible d'enflammer certains combustibles. Des braises déposées dans un contenant combustible sont un exemple d'incendie causé par une source incandescente.
- Et enfin, l'allumage par arcs ou étincelles est à considérer. Le cas d'un allumage par la foudre est d'ailleurs à classer dans la catégorie des arcs. Les arcs ou étincelles sont le plus généralement d'origine électrique et sont la conséquence d'une réaction en chaîne induite par la pénétration d'un électron ionisant une particule d'air dans un espace entre deux objets ayant des potentiels différents. Ce phénomène est accompagné d'une forte augmentation de température qui est parfois maintenues pendant plusieurs minutes pour le cas des arcs électriques.

En recherchant dans la zone du foyer initial l'ensemble des éléments susceptibles de provoquer l'allumage par l'un des trois types définis précédemment, l'expert avance alors une cause à l'incendie. Pour aider à la recherche, la technique couramment répandue dans le milieu industriel de la constitution d'un arbre des causes d'incendie a même été utilisée [JACQUEMET PAPILLOUD 2003].

4.2.3 Justifications d'une cause d'incendie

4.2.3.1 Recours à l'expérimentation

La détermination de façon catégorique de la cause d'un incendie n'est jamais chose aisée. Il faut bien évidemment commencer par prouver la présence ou la possibilité d'existence de la cause avancée. Par exemple, une cause proposée de départ de feu sur une literie est bien souvent la chute d'un mégot par un fumeur imprudent. Mais comment prouver une telle hypothèse alors que l'ensemble des éléments a généralement été totalement consumé ?
Pour des cas plus complexes, l'un des moyens d'étayer son argumentaire est le recours à l'expérimentation. L'expert doit cependant prendre garde à respecter au plus près possible dans son protocole expérimental, les conditions supposées du départ d'incendie. Sans ces précautions, les informations apportées par l'essai ne sont pas exploitables et totalement réfutables.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.2.3.2 Développement de l'incendie

Lorsque l'origine et la cause sont déterminées par l'expert, il explique le développement de l'incendie. En se basant sur des arguments scientifiques, il doit répondre à la question : Comment le feu s'est-il propagé dans les volumes considérés à partir du foyer initial ? Lorsque plusieurs causes sont avancées par l'investigateur, se pencher sur le développement de l'incendie lui permet parfois de choisir une hypothèse plutôt qu'une autre.

Il est intéressant de comparer le développement de l'incendie à la chronologie des faits. Cela permet d'intégrer dans l'investigation, les différents types de combustion n'ayant pas la même cinétique et de vérifier que la cause avancée est en accord avec ces éléments temporels.

Ainsi, quatre régimes de combustions existent : l'incandescence, un feu présentant une flamme de diffusion, une déflagration et une détonation. Seule leur vitesse de réaction diffère d'un régime à l'autre, l'incandescence ayant la vitesse la plus faible et la détonation la plus rapide. Ces travaux n'intégrant pas les enquêtes après explosion, les caractéristiques de ces deux derniers phénomènes ne seront pas développées.

Comme toute réaction de combustion, l'incandescence est une oxydoréduction. Parfois, la combustion est très lente et aucune flamme n'est produite. L'une des causes peut être la raréfaction d'oxydant dans le milieu réactionnel à proximité du combustible. Lors de la naissance d'un incendie, l'incandescence est généralement consécutive à un apport faible d'énergie et sa progression s'effectue vers l'intérieur du matériau. Le bois est connu pour se consumer de façon incandescente dans certaines conditions ; il est fréquent de constater une combustion par incandescence suite à un défaut d'isolation thermique, un incident électrique ou un travail par point chaud au contact ou à proximité d'une poutre en bois massif pendant un temps allant de plusieurs minutes à plusieurs heures voire plusieurs jours. De la même façon, des feux de toitures sont parfois consécutifs à une incandescence des mousses à base de polyuréthane utilisées pour l'isolation thermique.

Les feux dits couvants sont synonymes d'incandescence. Lors d'une investigation post incendie, lorsque l'expert décèle les signes d'un tel régime de combustion, il est essentiel qu'il intègre lors de la détermination des causes de l'incendie, des hypothèses pouvant être temporellement très éloignées de l'instant où l'incendie a été détecté. Un feu couvant est en général reconnaissable par une grande quantité de fumées dégagées par le foyer et le peu de dégâts thermiques constatés au regard de la masse de combustible consommée et de l'énergie théorique que cette masse aurait dégagé lors d'une combustion non incandescente.

Après avoir expliqué le développement de l'incendie au niveau du foyer initial, l'investigateur justifie le mouvement des fumées, la création des foyers secondaires, et les dégradations qu'il observe dans l'ensemble des lieux concernés par le sinistre.

4.2.3.3 Intégration des témoignages

Dans la mesure du possible, il est important que l'expert arrive à ses propres conclusions avant d'intégrer dans son analyse les informations collectées dans les témoignages. L'importance d'être exhaustif dans la recherche des causes de l'incendie a été évoquée précédemment ; prendre connaissance des témoignages influence l'expert et l'amène à ne pas envisager l'ensemble des possibilités d'allumage.

L'expert doit garder en tête que les témoignages des premiers intervenants, des secours et des autorités doivent avoir plus de poids que celui des victimes ou des témoins. Par leur formation et leur statut, ils ont l'habitude d'intervenir sur des incendies et leur jugement est par conséquent moins altéré par leurs émotions. Procéder à l'audition ou à des auditions complémentaires des témoins après la détermination par l'expert de la cause de l'incendie permet d'orienter les questions afin de confirmer le scénario avancé. Cependant, certaines questions sont toujours importantes à être posées comme l'alimentation en gaz et en électricité des lieux, la réalisation avant l'incendie de travaux susceptibles d'engendrer des points chauds, la présence des occupants au moment du départ du feu, etc. … Les témoignages permettent également d'établir une chronologie des faits (découverte des premières fumées, des premières flammes, …) qu'il est intéressant de comparer avec le scénario avancé par l'expert ; les étapes d'allumage et de développement de l'incendie déterminées comme

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

décrit dans les paragraphes précédents sont alors directement comparables à des données temporelles.

4.2.3.4 Analyse des résidus d'incendie

L'investigation post incendie est l'ensemble des recherches et des analyses réalisées sur les lieux du sinistre auquel il faut rajouter l'analyse en laboratoire des prélèvements effectués sur le terrain pour la recherche d'un accélérant. Les deux aspects sont indissociables et le premier prend parfois le pas sur le second. Ils sont également complémentaires car pour qu'il soit efficace, un prélèvement se doit d'être effectué à l'emplacement même où l'utilisation d'un accélérant est suspectée ; le réaliser à quelques dizaines de centimètre de l'origine présumée de l'incendie mène à un résultat négatif, malgré l'emploi d'un accélérant. La méthode de prélèvement entre également en jeu. Sur du carrelage par exemple, un frottis n'est parfois pas suffisant. Il faut briser les carreaux pour récolter les éventuelles traces d'accélérant piégées dans les joints. A contrario, une analyse mettant en avant la présence d'un accélérant n'est pas toujours synonyme d'un acte volontaire. En effet, la présence de produits accélérants dans un prélèvement est tout à fait justifiable par l'activité menée dans les locaux touchés par l'incendie. La méthode de prélèvement doit également être maîtrisée car des résidus d'accélérant, non détectables à l'aide d'un frottis, peuvent parfois être captés par le support. Ainsi, il est courant de retrouver des résidus dans les joints d'un carrelage alors qu'il ne reste aucune trace en surface.

En conclusion, l'analyse en laboratoire[13] de prélèvements de résidus d'incendie est le seul moyen de mettre en évidence l'utilisation d'accélérant et l'expert ne doit en aucun cas séparer l'investigation sur site de l'interprétation des résultats d'analyse.

4.3 Introduction de l'outil numérique dans l'investigation post incendie

Depuis une quarantaine d'années, les systèmes informatiques et les modèles mathématiques ont évolués de telle sorte qu'il est maintenant envisageable de modéliser de façon précise une partie des phénomènes physiques et chimiques rentrant en jeu dans un incendie ou, tout au moins, ceux dont les règles théoriques qui les régissent sont connus.

4.3.1 Application courante des modèles de simulations numériques d'incendie

Les outils numériques sont dorénavant utilisés dans la prévention incendie lors du recours à l'ingénierie du comportement au feu des ouvrages et du désenfumage, dans le but de dimensionner les structures des bâtiments et déterminer la stratégie de désenfumage à mettre en œuvre. L'article DF4 et le chapitre 8 de l'Instruction Technique 246 relative au désenfumage et l'arrêté relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrage autorisent en France depuis le 22 mars 2004, le recours à ces nouveaux outils pour justifier des choix des dispositions en matière de sécurité incendie dérogeant au règlement de sécurité. Dans des pays comme les Etats-Unis, le recours à l'ingénierie de la sécurité incendie est fait depuis plus de 10 ans. Les modèles sont dans ces cas appliqués en amont de l'incendie, dans l'hypothèse où un sinistre se déroulerait dans des bâtiments en construction ou en cours de rénovation. Par conséquent, l'aspect préventif des études induit que les simulations sont des cas majorants par rapport aux incendies couramment rencontrés dans l'investigation, de façon à envisager les pires des scénarios.

Les modèles numériques sont également appliqués pour reconstituer des incendies réels dans un objectif d'investigation ou de pré ou post étude expérimentale. Pour ces applications, une des difficultés réside dans la détermination des paramètres d'entrée pour que les simulations reproduisent au plus près les conditions rencontrées dans le déroulement des faits et non plus de façon majorante ou sécuritaire.

[13] La méthode d'analyse utilisée au Laboratoire Central de la Préfecture de Police est détaillée en annexes.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.3.2 Applications de modèles numériques de simulations d'incendie à des reconstitutions post incendie

Les premières applications de modèles numériques à la reconstitution d'incendies réels avaient pour but d'expliquer les phénomènes et les facteurs ayant aggravé un feu a priori banal. Ces modélisations informatiques ont été réalisées afin de mieux comprendre et appréhender les enchaînements d'évènements ayant au final menés le sinistre à des conséquences désastreuses inattendues. Une notion uniquement informative et explicative était en quelque sorte attendue de ces calculs.

Ainsi, le modèle de zones CFAST [JONES 2004, PEACOCK 2005] était utilisé en 1995 pour étudier les conditions nécessaires à la formation d'un backdraft dans une cage d'escalier ayant entraîné le décès de 3 pompiers dans la ville de New York [BUKOWSKI 1995]. À l'ouverture de la porte d'un appartement du premier étage où le sinistre avait pris naissance, une colonne de flammes se forme soudainement à partir de la partie supérieure de l'ouverture et s'engouffre dans la cage d'escalier piégeant les trois hommes sur le palier du second étage. Plus qu'un backdraft classiquement observé qui aurait eu tendance à se produire dans les pièces de l'appartement d'où le feu avait démarré, les flammes ont persisté pendant près de 6 minutes et demie dans la cage d'escalier. La modélisation de l'incendie a réussi à démontrer que, dans l'appartement d'origine, le foyer devenu couvant après quelques minutes avait produit suffisamment d'imbrûlés pour générer, après l'amenée de comburant lors de l'ouverture de la porte, une combustion d'environ 7 minutes. Une interprétation théorique des résultats numériques des simulations CFAST a été nécessaire pour arriver à ces conclusions. Des phénomènes physiques tels que la sous-ventilation du foyer, la réinflammation d'imbrûlés de combustion, ou des mouvements d'air ont du être reliés à des variations temporelles dans l'appartement et la cage d'escalier de la température, du débit calorifique et de la concentration en oxygène. Cette application d'un modèle de zones à un cas réel a permis une meilleure compréhension et justification des phénomènes observés sur cet incendie. Les calculs ont montré, en quantifiant l'incendie, que la théorie du développement du feu était techniquement valable, qu'une accumulation de monoxyde de carbone et d'imbrûlés de combustion étaient possible dans ces conditions sous-ventilées et que les températures et les temps de combustion étaient suffisants pour provoquer les dégâts observés dans la cage d'escalier et l'appartement.

Une des reconstitutions numériques les plus anciennes est celle de l'incendie datant de 1987 dans la gare King's Cross du métro londonien, simulé grâce au modèle de champs FLOW3D en 1989 [SIMCOX 1992]. Ce sinistre, qui a fait trente et une victimes et de nombreux blessés, a fait l'objet de nombreuses discussions pour tenter d'expliquer les causes de la violente propagation suite à un embrassement généralisé qui a été observé quelques minutes seulement après l'arrivée des pompiers. Le rôle joué par la dégradation sous l'effet de la chaleur des peintures des parois des tunnels n'était pas une théorie suffisante pour justifier cette propagation, c'est pourquoi des simulations ont été réalisées. À son tour, la validité de ces simulations informatiques a été largement débattue au sein de la communauté scientifique car elles mettaient en avant une propagation par les escaliers mécaniques jusqu'alors jamais observée : un effet de tranchée [DRYSDALE 1999b]. Des essais en laboratoire à diverses échelles [DRYSDALE 1992, MOODIE 1992] ont par la suite confirmé le mécanisme de propagation des flammes tel qu'il avait été avancé par les simulations informatiques. Le recours à la modélisation informatique a non pas permis de déterminer l'origine ou la cause de l'incendie puisqu'elles étaient connues, mais d'en expliquer la propagation en avançant une théorie jusqu'alors jugée comme improbable ; son apport scientifique sur cette étude est indéniable.

Le National Institute of Standards and Technology a utilisé à des fins de reconstitutions post incendie le modèle de champs qu'il développe : Fire Dynamics Simulator [McGRATTAN 2006, McGRATTAN 2006]. Leur dernière étude majeure est la reconstitution d'un incendie s'étant produit en 2003 lors d'un concert à The Station Nightclub (Rhode Island, USA) et ayant fait environ 100 morts et 100 blessés [BRYNER 2007]. Le NIST s'est attaché à reproduire la propagation du foyer et la croissance de l'incendie et a comparé ses résultats de simulations à des vidéos enregistrées lors du concert. Les flammes observées sur les vidéos sont mises en parallèle de la fraction de mélange air – combustible à la stœchiométrie. Par rapport aux études précédentes, le calcul de la propagation du foyer par l'outil numérique est introduit. Cette étude montre que, dans l'état de développement actuel de FDS, pour que le module de pyrolyse soit utilisé correctement afin de calculer la propagation d'un foyer à partir d'une source d'allumage, des travaux de validations des données d'entrée ont besoin d'être réalisés au préalable à plusieurs échelles croissantes. Cette validation des caractéristiques du polyuréthane

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

sur lequel les premières flammes se sont propagées a été faite en commençant par le test au cône calorimètre. Puis des essais à l'échelle de la taille d'une pièce moyenne ont été comparés aux simulations des mêmes tests pour caler la propagation des flammes. Enfin, les données matériaux validées aux échelles inférieures ont été introduites dans la simulation des 412 m² de la boite de nuit. Ce n'est qu'après s'être assuré d'avoir une propagation correcte des flammes à partir du foyer d'origine que les auteurs se sont intéressés aux conditions de tenabilité des personnes présentes dans les locaux pour essayer d'expliquer le grand nombre de victimes. Cette étude a permis au NIST de proposer un ensemble de recommandations à suivre aux établissements du même type et a appelé à une modification du code régissant la sécurité incendie.

Ces trois exemples permettent d'apprécier l'apport scientifique de la reconstitution d'incendies réels à l'aide d'outils numériques. À mon sens, ils mettent également en exergue l'importance de définir correctement, en amont de l'étude, ce qui est attendu des résultats des simulations numériques ; la recherche de l'outil le plus approprié pour réaliser les calculs est alors facilitée.

4.3.3 Applications de modèles numériques de simulations d'incendie dans un cadre d'investigations post incendie

Les études présentées au paragraphe précédent ont été réalisées dans un cadre scientifique et non judiciaire. Chaque scénario de départ d'incendie était parfaitement connu grâce notamment aux enquêtes post incendie qui avaient permis de déterminer avec de grandes certitudes l'origine et la cause de chaque sinistre. Le but des simulations était d'expliquer la dynamique du développement qui a amené l'incendie à avoir de lourdes conséquences, en termes de victimes notamment. Les études n'ont pas débouché sur une confrontation très directe et explicite des résultats des simulations aux observations des dégradations post incendie faites sur le site du sinistre :

- Les températures et les teneurs en oxygène dans la reconstitution de l'incendie dans la boite de nuit The Station Nightclub sont telles que les conditions deviennent très rapidement intenables[14] pour le public.
- La concentration en imbrûlés est suffisante pour avoir une combustion d'environ 7 minutes lorsque la porte est ouverte dans la cage d'escalier de l'immeuble et une température de 1200 °C est suffisante pour faire fondre le verre de la lucarne.
- Les dégradations observées sur le plafond des couloirs du métro londonien de la station King's Cross ont des formes et des positions proches de celles des surfaces de températures maximales simulées et la dynamique de l'incendie dans l'escalier mécanique permet d'expliquer l'embrasement généralisé.

Les auteurs de ces études ne se plaçaient donc pas dans une position d'expert en investigation post incendie cherchant à étayer l'argumentaire de son scénario d'incendie grâce aux résultats des simulations. C'est dans cette optique que l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne a mené des travaux de recherches très complets sur l'intégration grâce à l'utilisation de modèles de l'influence de l'évolution dynamique du feu dans l'investigation d'incendies [DELÉMONT 2005, DELÉMONT et MARTIN 2007]. Après avoir évalué CFX-4.3 sur le cas de la chambre Steckler [STECKLER 1982], l'auteur s'est lancé dans la reconstitution d'un incendie qui s'est déroulé dans un bâtiment d'un étage sur rez-de-chaussée, la pièce principale du rez-de-chaussée servant de salle de réunion et celle de l'étage comme salle de tir. La cause et l'origine de l'incendie ont été parfaitement déterminées : le déversement sur la réserve de bois stocké dans un compartiment du rez-de-chaussée, de particules encore incandescentes provenant du cendrier du chauffage. L'intégralité de l'étage construit majoritairement en bois est détruite alors qu'au rez-de-chaussée, les dégâts sont plus restreints. En se focalisant sur les éléments qui permettent de déterminer la propagation de l'incendie à savoir ici les carbonisations des parois et du plafond en bois, il apparaît une évolution dynamique du feu non pas uniforme, mais dans une direction privilégiée vers l'entrée du bâtiment et la porte de l'étage placées à quelques centimètres l'une de l'autre.
Les simulations numériques ont permis de montrer qu'un tel mouvement de convection ne pouvait être observé que si la porte d'entrée était ouverte lors de l'incendie. De plus, les influences du vent sur la propagation de la chaleur dans le bâtiment, puis de la puissance thermique imposée pour modéliser

[14] Seuil de tenabilité à la température utilisé : 120 °C. Seuil de tenabilité à la concentration en oxygène utilisé : 12 % en fraction volumique

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

la cause de l'incendie, ont été évaluées. La simulation numérique fournit une représentation satisfaisante du développement de l'incendie malgré des simplifications dans l'environnement modélisé ainsi que dans la nature du foyer et aucune variation des conditions de vent ou de la puissance thermique n'est susceptible de modifier cette conclusion.

L'auteur a aussi appliqué l'outil numérique à une investigation post incendie en criminalistique. Son choix s'est porté sur l'incendie datant de 1997 de la Chapelle Guarini qui s'est également propagé à une partie du Palais Royal contigu à la chapelle. Lors de l'investigation dans cet édifice historique, deux hypothèses de départ d'incendie étaient avancées par les experts ; sans l'utilisation de la simulation numérique, aucune des deux ne pouvait être privilégiée par rapport à l'autre. Une cause électrique accidentelle s'opposait à une cause criminelle, les deux ayant également deux origines différentes. Les résultats des simulations numériques ont été comparés par une confrontation indirecte, aux dégradations constatées sur le site. Lors de l'investigation, les carbonisations des éléments en bois et la déformation voire la fonte des structures métalliques ont été évaluées. À partir de ces dégradations, les zones du bâtiment ont en quelque sorte été hiérarchisées en fonction du gradient des sollicitations thermiques. Sur les simulations, le même travail de hiérarchisation a été mené en se basant sur le classement des températures obtenues par les calculs. En comparant les deux hiérarchisations des zones, la première hypothèse, accidentelle, a été privilégiée par rapport à la seconde, criminelle.

Ces travaux d'Olivier Delémont montrent qu'il est parfaitement possible d'utiliser la simulation numérique en complément d'une investigation post incendie à condition que les utilisateurs soient conscients des limites des modèles utilisés. Les simulations ne sont qu'une représentation simplifiée de la réalité et elles souffrent encore d'un manque de précision et d'exactitude. Cependant, l'auteur ne confronte jamais directement les dégradations constatées sur une scène d'incendie aux niveaux de températures atteints, en particulier à cause des limites du code de calcul utilisé. Cette confrontation est étudiée dans la suite de ce présent mémoire.

4.4 Méthode d'investigation utilisant la modélisation informatique introduite au Laboratoire Central de la Préfecture de Police

Depuis 2005, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police s'est lancé dans un projet de recherche visant à évaluer le recours à la modélisation informatique à des fins d'investigation post incendie. L'une des missions du LCPP, par le biais de la Permanence Générale, est d'assister, sur la demande, entre autre, des forces de police ou des services de secours de la Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris, à la détermination de l'origine et de la cause d'incendies ayant eu lieu sur Paris (75), les Hauts-de-Seine (92), la Seine-Saint-Denis (93) et le Val-de-Marne (94). L'utilisation de la simulation numérique est envisagée en complément de certaines de ces enquêtes, dans le but d'appuyer une hypothèse de scénario d'incendie ou d'infléchir un scénario proposé par rapport à d'autres.

4.4.1 Approche générale d'investigation pour la modélisation informatique

L'objectif principal de cette approche n'est pas de rechercher sur site l'origine et la cause d'un incendie, ce travail étant réservé aux membres de la Permanence Générale. L'objectif direct est le recueil sur site d'informations complémentaires qui permettront la reconstitution du sinistre par simulation numérique et l'évaluation des scénarios ainsi simulés. Il faut donc partir du principe qu'à ce moment précis de l'intervention, la chronologie des faits est établie et des origines ainsi que des causes sont avancées par les investigateurs. Si un élément lui parait suspect dans la chronologie, l'origine ou même la cause, ou s'il hésite entre plusieurs hypothèses de scénarios d'incendie, il peut demander l'utilisation de modélisation informatique pour compléter ses investigations et l'aider à apporter une conclusion.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Dans les exemples de reconstitution d'incendie présentés précédemment, aucune méthode n'est jamais clairement définie ni utilisée pour comparer les résultats de simulations aux constatations faites sur site. Les formes des dégradations du matériau constituant le plafond sont évoquées, au même titre que la carbonisation d'un bois ou la fonte d'un métal. Mais à aucun moment, la démarche consistant à confronter une température obtenue par le calcul numérique à celle susceptible d'engendrer les dégradations observées n'est clairement effectuée. C'est une des finalités de la procédure de recueil de données[15] qui a été rédigée au LCPP afin de décrire, en huit étapes, l'organisation, la démarche et les responsabilités de chaque intervenant pour collecter l'ensemble des données nécessaires à la modélisation des sinistres par le calcul.

Afin de respecter au mieux chacune des étapes de la procédure, deux fiches[16] ont également été créées. La première est une fiche d'informations préalables qui permet de recenser les informations générales facilitant l'intervention comme les noms et les numéros de téléphone des contacts utiles. Y sont également décris l'état des lieux afin de savoir si une conservation a été demandée ou si au contraire le déblai a été effectué par les pompiers pour éviter une reprise de feu, le nombre de victimes éventuelles, l'origine de l'incendie ou encore si les locaux étaient équipés de dispositifs de sécurité incendie. Cette fiche est très rapide à compléter et n'apporte que très peu d'informations susceptibles d'être intéressantes pour la modélisation numérique du sinistre ; celles-ci sont renseignées dans la seconde fiche. Sa première partie est le détail des relevés photographiques : chaque numéro de photo est associé à un élément et localisé dans l'espace. Sa seconde partie permet la reconstitution des lieux à l'aide de l'outil numérique : ce sont des feuillets sur lesquels sont notés les dimensions de chaque pièce, de chaque ouverture, l'état de ces ouvertures, la nature et l'épaisseur des parois, l'emplacement, la dimension et les matériaux constituant les éléments mobiliers et enfin, la charge calorifique. Sur la troisième partie sont indiqués l'emplacement, la nature et la dégradation des points de comparaison.

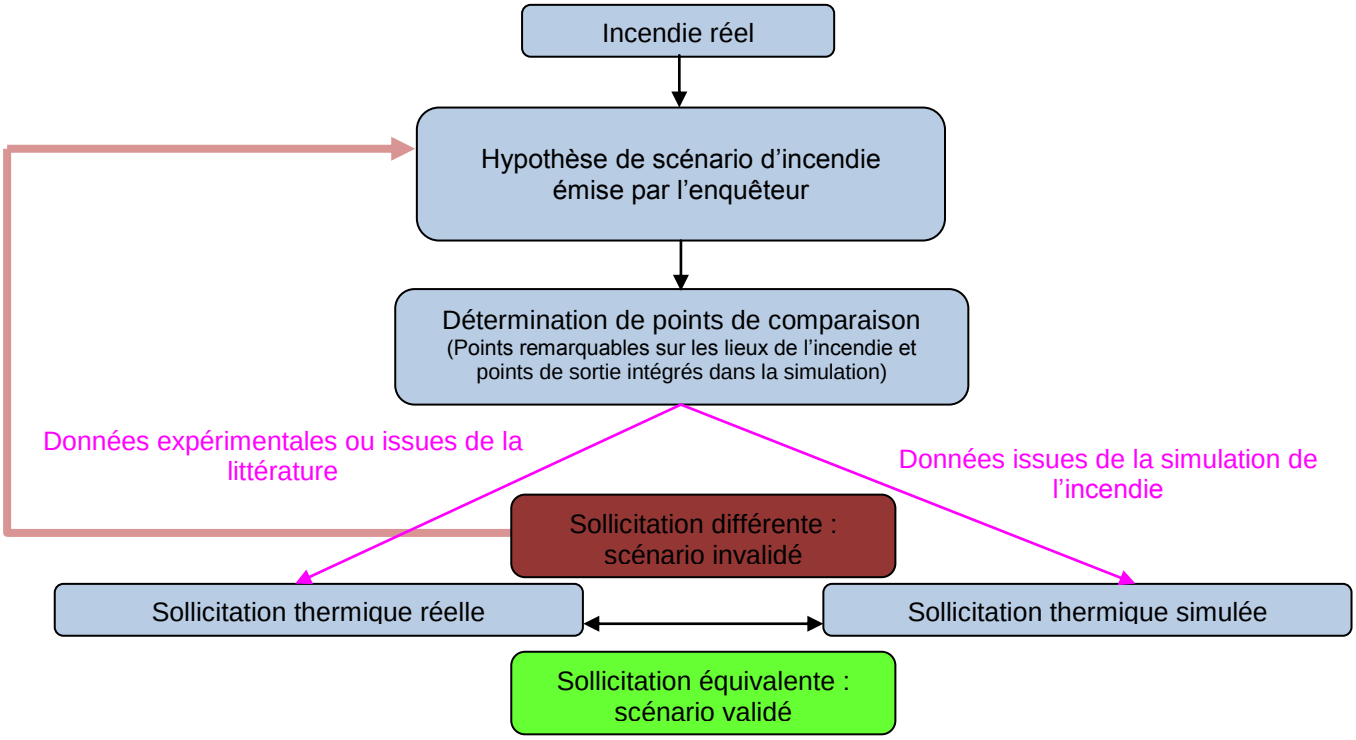
La démarche initiée par le LCPP se différencie de celles mises en place jusqu'à aujourd'hui par le recours systématique à l'utilisation de points de comparaison pour évaluer une hypothèse de scénario d'incendie. Un point de comparaison est un effet thermique, mécanique ou chimique remarquable sur un matériau : la fonte d'un métal, la déformation voire même la non-déformation d'un élément plastique, un dépôt de suie sur une paroi verticale, le bris d'un vitrage suite à un effet de surpression, l'agression d'un matériau par les produits acides des fumées, etc.. À un point de comparaison est ensuite associée une sollicitation thermique, c'est-à-dire la conjugaison d'une température ou d'un flux thermique incident et d'un temps d'exposition. Cette sollicitation thermique, parfaitement localisée dans l'espace, est ensuite comparée aux valeurs calculées au même emplacement. En multipliant dans l'espace les points de comparaison, des éléments d'information supplémentaires sont disponibles pour évaluer un scénario d'incendie. Si une majorité des sollicitations thermiques concorde entre les points de comparaison sur site et ceux introduits dans les modélisations numériques, le scénario simulé est alors jugé comme probable. Les critères de concordance restent à définir.

Il faut également que l'évolution dynamique du feu, c'est-à-dire la propagation des flammes et le déplacement des fumées soient similaires dans les simulations à ceux constatés à partir des dégradations et des dépôts de fumée sur le site de l'incendie.

Le schéma 194 récapitule la démarche appliquée.

[15] La procédure est disponible en annexe.
[16] Les deux fiches sont disponibles en annexe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



194. *Démarche d'évaluation, utilisant des points de comparaison, d'un scénario d'incendie simulé numériquement*

4.4.2 Recherches bibliographiques pour l'interprétation des sollicitations thermiques aux points de comparaison

Les points de comparaison sont de natures très diverses ; ils prennent la forme d'un dépôt de suie, de la dégradation mécanique d'un élément structurel, du changement de nature chimique d'un matériau, de l'intoxication ou des brûlures d'une victime. Réaliser une liste exhaustive des points de comparaison et leur associer une sollicitation thermique est une démarche impossible. Seule la constitution d'une base de données rassemblant au fur et à mesure de leur utilisation les points de comparaison et la sollicitation thermique associée aux dégradations constatées est une solution pour que la méthode d'évaluation d'une hypothèse de scénario d'incendie proposée précédemment soit réellement utilisable. Dans la suite du paragraphe 4.4.2, quelques points de comparaison couramment rencontrés et leurs sollicitations thermiques sont présentés ; ces renseignements sont issus de recherches bibliographiques.

4.4.2.1 Dépôt de suies

Lors d'investigations post incendie, le dépôt de suie sur les parois ou les éléments mobiliers est un excellent point de comparaison.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Comme cela a été évoqué précédemment, la quantité de fumées produites lors d'un incendie est un indicateur de la nature de la combustion, en particulier dans le cas des feux couvants. Cette fumée est également utilisée comme point de comparaison par le biais du dépôt de suies par thermophorèse sur les murs [ZHENG 2002] ; les particules, sous l'action d'un gradient thermique, sont attirées par les parois plus froides. Plusieurs données numériques sont déduites de ce point de comparaison.
En effet, lorsque les fumées sont stratifiées comme sur la photo 195, la hauteur limitant la zone noircie par les suies de celle immaculée peut-être indirectement exploitée en tant que valeur numérique déduite du point de comparaison 'dépôt de suies avec stratification des fumées'. C'est en effet approximativement la hauteur minimale à laquelle est descendue l'interface entre les gaz chauds et l'air frais. Le terme « approximativement » est employé car la limite entre les gaz de combustion en partie haute et l'air frais en zone basse n'est pas nette. De plus, comme la thermophorèse dépend du gradient thermique entre les gaz chauds et les parois froides et qu'il existe également un gradient thermique vertical à l'intérieur des fumées stratifiées, le dépôt des fumées n'est pas identique sur l'ensemble de la hauteur de la zone stratifiée.

195. *Point de comparaison 'dépôt de suies avec stratification des fumées'*

196. *Illustration de la dégradation de suies déposées sur les parois*

Le point de comparaison 'dépôt de suie' fournit également d'autres informations et cela que le dépôt soit obtenu avec, ou sans, stratification des fumées ; une sollicitation thermique du type <température – temps> peut être déduite. En effet, il arrive que par endroit les suies ne soient plus visibles après l'incendie alors qu'elles ont obligatoirement été présentes à un instant précédent l'extinction : cela est synonyme de leur dégradation. Ce constat est illustré par la photo 196 sur laquelle la zone grisâtre correspond à une zone où il y a eu dégradation des suies après qu'elles se soient déposées lors des phases précédentes de l'incendie.

Des essais réalisés en laboratoire par le Centre National de Protection et de Prévention [CNPP 2007] donnent une sollicitation thermique minimale rapportée dans le tableau 197 pour observer la dégradation des suies. Ces valeurs semblent assez élevées mais ce sont les seules qui soient justifiées par des essais et qui intègrent une notion temporelle. Elles ne sont pas obtenues en exposant les suies à l'effet direct d'une flamme mais seulement à une ambiance thermique aux températures indiquées dans le tableau 197. Cela peut expliquer les valeurs assez élevées évoquées précédemment.

Température (°C)	Temps de disparition (min)
500	150
550	50
600	20
650	8
700	3

197. *Temps d'exposition minimal de suies pour obtenir leur dégradation à une température donnée [CNPP2007]*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.4.2.2 Réponse d'un vitrage à une sollicitation thermique

Le développement d'un incendie est directement lié à la quantité de comburant disponible. Pour un feu dans un local encloisonné, l'oxygène consommé pour la combustion est celui déjà présent dans le local, celui apporté par les fuites diverses (encadrement de porte, bouches d'aération, …) et, plus majoritairement, celui provenant des ouvertures telles que les portes et les fenêtres. Le comportement mécanique des vitrages est donc une donnée importante à connaître pour simuler correctement un incendie dans le but d'une investigation post incendie. En effet, un bris de vitre représente une ouverture supplémentaire et modifie par conséquent les conditions aérauliques et éventuellement le régime de combustion qui peut passer d'une configuration où le débit calorifique est contrôlé par la ventilation à un autre régit par le combustible. En plus de cet impact sur le développement de l'incendie, connaître le comportement d'un vitrage est également utile dans l'interprétation de la sollicitation thermique du point de comparaison 'endommagement du vitrage'. Déterminer une température ou un flux radiatif et un temps d'exposition pour lesquels un vitrage se fissure ou se brise n'est pas aisé tant les processus amenant ces phénomènes dépend de nombreux paramètres : la nature et l'épaisseur du verre, la vitesse d'échauffement, les contraintes mécaniques apportées par le cadre, la nature du cadre, les défauts dans la vitre, le gradient vertical de température dans le local, etc..

198. *Bris mécanique*

Pour commencer à traiter les points de comparaison 'endommagement du vitrage', l'observation de la morphologie des débris de verre ou les restes de verre sur le châssis permet de distinguer un bris provoqué par un choc thermique d'un autre obtenu à la suite d'un choc mécanique. En effet, pour un bris mécanique, les fissures très angulaires dans la vitre partent d'un point, d'une zone d'impact ; ce phénomène est visible sur la photo 198. Alors que un bris thermique, les fissures, aux arêtes plus arrondies que pour un bris mécanique, ne partent pas d'un point unique ; cela est illustré sur le bris partiel du premier vitrage du double vitrage sur la photo 199.

199. *Bris thermique*

Lorsqu'une vitre ordinaire est chauffée, elle a tendance à se fissurer lorsqu'elle atteint 150 à 200 °C. Il est intéressant de noter que cette fissure qui court sur la vitre n'est pas susceptible à elle seule de modifier la ventilation dans le local en feu ; pour que l'amenée d'air soit modifiée, il faut qu'un morceau de cette vitre chute.

Keski-Rahkonen [KESKI-RAHKONEN 1988] a avancé que la différence de température entre la surface exposée de la vitre et le verre masqué par le montant du châssis joue un rôle dominant dans l'apparition de fissures ; une différence de température de 80 °C est nécessaire pour que le phénomène débute. Une étude complémentaire [PAGNI 1991] avance une température de 58°C. Les écarts de température entre ces deux références s'expliquent par l'utilisation de verres aux caractéristiques thermiques et mécaniques différentes[17].

Pour ce qui concerne le bris d'un vitrage simple et non plus l'apparition de fissures, les valeurs suivantes sont utilisables :

- Une limite inférieure raisonnable de température est de 300°C [ROYTMAN 1975]
- Une vitre de 3 mm d'épaisseur casse à environ 340 °C [MIZUNO 1999]
- Une vitre de 4 à 6 mm d'épaisseur casse à environ 450 °C [HASSANI 1994]

[17] Des mesures lors de feux à l'échelle 1 ont été réalisées dans le cadre des expérimentations d'Arcueil dans le cadre du Projet National de l'Ingénierie de la Sécurité Incendie afin de les confronter aux résultats expérimentaux de Pagni, Keshi et Rahkonen.

Les doubles ou triples vitrages résistent plus longtemps au feu sans se briser. Pour des feux de courte durée, il est probable qu'ils ne se cassent jamais ou alors bien après un vitrage simple dans un feu d'une durée supérieure. Pour des doubles vitrages de 6 mm d'épaisseur, la température de 600°C est avancée [LOSS PREVENTION COUNCIL 1999].

Lors de campagnes expérimentales à échelle réelle, il est fréquemment observé que le temps où le bris d'un double-vitrage apparaît sensiblement égal à celui où le seuil de résistance mécanique du châssis est atteint. Ainsi, il n'est pas rare de voir un châssis en PVC s'affaisser puis tomber, alors que les doubles vitrages ne sont que fissurés voire encore intacts. Des essais réalisés dans le cadre du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie par le CTICM [RENAUD 2007] sur deux châssis vitrés en aluminium et en PVC mettent en évidence ce constat ; dans ces conditions expérimentales précises, l'éclatement total des vitrages suite à la formation d'un grand nombre de fissures ne survient pas ; la ruine est provoquée par la défaillance des châssis sous l'effet de l'augmentation de la température. Ces données sont difficiles à intégrer dans une étude car les conclusions ne sont basées que sur deux essais.
Il a de plus été montré que la montée en température du vitrage, par exemple, était une notion importante à intégrer dans le bris de vitre. En effet, plus le vitrage monte progressivement en température, plus il résistera à une exposition à une température ou un flux thermique élevé.
Les phénomènes de surpression jouent également parfois un rôle dans le bris d'une fenêtre. Des essais ont été lancés sur ce thème par l'IRSN [ARTOUS 2007], toujours dans le cadre du Projet National de la Sécurité Incendie.

En conclusion, à cause de leur influence sur l'évolution de l'incendie en cas de bris, le comportement des vitrages à une sollicitation thermique est important à connaître. Cela est également intéressant afin d'associer une sollicitation thermique au point de comparaison 'dégradation d'un vitrage', la dégradation pouvant aller de la non dégradation jusqu'à la chute de la fenêtre en passant par une fissuration, ou un bris. Les phénomènes thermiques menant à ces dégradations ont été largement étudiés et sont maintenant connus. Cependant, bien qu'il soit possible d'évaluer une température maximale ou un flux incident maximal pour obtenir une dégradation, aucune notion temporelle n'est associée aux données bibliographiques disponibles et rend donc l'utilisation du point de comparaison 'dégradation d'un vitrage' complexe et difficilement exploitable dans le cadre de reconstitution d'incendie en investigation. Les valeurs de bris avancées par Roytman, Mizuno et Hassani sont tout de même retenues comme valeurs seuils.

4.4.2.3 Réponse du béton à une sollicitation thermique

Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans la construction d'immeubles et d'autres structures. Trouver une caractéristique qui lui est propre lorsqu'il est soumis à une sollicitation thermique précise est très utile car l'endommagement ou non d'une paroi en béton serait alors un point de comparaison très répandu sur les lieux d'un incendie. Encore une fois, il est très difficile de généraliser les données numériques trouvées à l'ensemble des constructions en béton car il en existe de nombreux types différents : le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant. Ainsi, selon le liant utilisé, la proportion ou le type de granulat choisi, la présence ou non d'acier, une résistance au feu différente est obtenue.

Un béton courant soumis à de fortes sollicitations thermiques a tendance à s'écailler voire à exploser. L'écaillement est une disparition locale ou générale de la peau de ciment d'un élément en béton, lui donnant un aspect rugueux et irrégulier rappelant l'aspect de "peau de poisson". Ce phénomène est provoqué par la vaporisation de l'eau dans un béton humide, des coefficients de dilatation différents entre le ciment et les autres matériaux (granulats, acier), une dilatation plus forte entre la zone au contact du feu et l'intérieur du béton ou encore une libération et une vaporisation de l'eau de structure chimiquement liée au béton (qui bout à 210°C dans les conditions de pression dans laquelle elle se trouve). L'écaillement est très pratique pour arriver à localiser les zones où le dégagement calorifique a été maximum ; il est par exemple courant de retrouver une surface écaillée de béton à la verticale d'un canapé ayant brûlé dans un appartement. Cependant, il n'est pas possible de généraliser l'association d'une exposition thermique à une dégradation du point de comparaison 'écaillage du béton' [SCHROEDER et AL 2003]. Les mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées sont décrits en détails par Msaad [MSAAD 2005].

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En plus de l'écaillage, le béton présente trois autres réponses remarquables à une sollicitation thermique : une perte de résistance mécanique, une perte de l'eau chimiquement liée, et un changement de couleur. Ce dernier point a été étudié par de nombreux chercheurs et quelques résultats sont listés dans le tableau 200 [SCHROEDER 2003].

Température (°C)	Changement de couleur du béton
Ambiante – 20	Jaune
232 – 250	Rose léger
300	Rose prononcé
300 – 600	Rose allant sur le rouge brique
600	Rouge brique
	Noir
600 – 900	Gris
900	Gris
900	Beige
1000	Beige

200. *Changements de couleur du béton en fonction d'un changement de température [SCHROEDER et AL 2003]*

En se basant sur des études expérimentales [SCHROEDER 1999] menées au cône calorimètre sur des éprouvettes de 100 mm x 100 mm x 50 mm, Schroeder affirme que l'écaillage du béton ne peut être utilisé comme indicateur de sollicitation thermique car les températures d'occurrence du phénomène varient trop selon la nature des matériaux, que l'observation visuelle de changements de couleur est, au mieux, peu fiable car aucun changement de couleur prononcé identifie des isothermes parallèles à la surface exposée et que seule une analyse pétrologique d'une section de béton [ASTM C856] peut être utilisée pour déterminer un isotherme à environ 500°C, grâce à la dégradation de l'hydroxyde de calcium.

En conclusion, avec les moyens dont dispose le LCPP, il ne lui est pas possible de relier la dégradation d'un béton à une sollicitation thermique. L'écaillage lui permet cependant, lors de l'investigation et la recherche de l'origine en particulier, de situer dans l'espace les zones de débits calorifiques, en notant cependant que ce phénomène peut se produire plusieurs minutes voire plusieurs heures après l'extinction de l'incendie.

4.4.2.4 Réponse du plâtre à une sollicitation thermique

Comme le béton, le plâtre est un matériau de construction très utilisé. Son avantage par rapport au béton est qu'il est homogène, et le reste même après avoir été soumis à de très fortes températures : cela le rend plus susceptible d'être un bon point de comparaison.
Le principal composé du plâtre est le gypse. C'est un minéral cristallin chimiquement très stable, composé de sulfate hydraté de calcium de formule chimique $CaSO_4.2H_2O$. Lorsqu'il est lentement chauffé, il a été constaté des changements de phase et une déshydratation qui commencent à apparaître à des températures supérieures à 80°C. À cet instant, 75 % de l'eau chimiquement combinée se dissocie en eau et en hémihydrate : $CaSO_4.2H_2O \rightarrow CaSO_4.1/2H_2O + 3/2\ H_2O$.
Entre 98°C et 130°C, le gypse s'est totalement transformé en hémihydrate. Cependant, il en existe deux formes, le α qui se transforme en β à des températures supérieures à 110°C – 115°C. Pour des températures supérieures à 130°C, il y a une nouvelle transformation de l'hémihydrate β en α-anhydrite : $CaSO_4.1/2H_2O \rightarrow CaSO_4.0{,}001H_2O$
Et enfin, pour des températures supérieures à 200°C, cette dernière se transforme en β-anhydrite : ($\beta CaSO_4.<0.001H_2O$).

Il peut arriver qu'il y ait une réhydratation du plâtre au cours de l'extinction du feu par les services de secours. Cependant, lorsqu'il a été soumis à des températures supérieures à 200°C, il ne se réhydrate pas [SCHROEDER 2003]. Une perte de masse significative et par conséquent une diminution de la densité du plâtre se produit alors. Il est donc possible de cartographier les zones où les sollicitations thermiques ont été maximales et d'utiliser le point de comparaison 'dégradation du plâtre'. Une observation visuelle de coupes dans le plâtre ou l'utilisation d'une sonde sont deux moyens de réaliser cette cartographie [NFPA 2001]. Une étude [KENNEDY 2003] a été menée pour la seconde méthode, afin d'évaluer si elle fournit des résultats précis et reproductibles dans l'analyse de la dynamique d'un incendie. La méthode se base sur la mesure, à l'aide d'une sonde, de la différence

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

de densité entre des zones ayant subi les effets de l'incendie et des zones vierges : les profondeurs de pénétrations renseignent l'investigateur sur les points qui ont été les plus chauffés, les profondeurs les plus grandes correspondant aux points situés les plus près d'une source ponctuelle de chaleur. Par rapport à la méthode consistant à faire des coupes dans le plâtre et d'apprécier les sollicitations thermiques à partir des changements chimiques du plâtre se traduisant également par une modification de la couleur, la méthode de sondage a l'avantage d'être plus pratique, plus rapide et moins destructrice, ce qui est important pour la préservation de la scène d'incendie. En conclusion, l'analyse d'un incendie à partir de la mesure de la profondeur de calcination par sondage est une méthode donnant des résultats précis et reproductibles, qualitativement comparables à ceux obtenus par l'estimation visuelle de coupe de plâtre.

La méthode de sondage du plâtre est donc un moyen fiable pour situer les sollicitations thermiques maximales dans un local, en particulier dans le cas d'une investigation incendie post-flashover. Pour l'évaluation d'une hypothèse de scénario d'incendie en utilisant des modélisations numériques, cette méthode est utile pour comparer plusieurs simulations. Lorsque la validité d'un unique scénario est étudiée, il manque dans la démarche présentée précédemment un lien entre la sollicitation thermique et la mesure de la profondeur de pénétration de la sonde. Une telle corrélation a été recherchée en s'appuyant sur une étude expérimentale menée sur des éprouvettes en plâtre exposées au rayonnement thermique d'un cône calorimètre [CHU 2004]. Lors de cette étude, les profondeurs de calcination D_{calci} ont été mesurées avec une sonde à force constante et comparées à la sévérité du feu S_{feu}, c'est-à-dire au flux de chaleur rayonné par la résistance du cône calorimètre vers l'échantillon, multiplié par le temps d'exposition. Une corrélation ((58)) a été trouvée, les coefficients α et β dépendant du type de plâtre utilisé : pour les matériaux testés, le premier varie de 0,52 à 1,90 et le second de 0,27 à 0,45.

$$D_{calci}=\alpha\, S_{feu}^{\beta} \qquad (58).$$

Cette méthode donne de très bons résultats pour des plâtres standards, mais quelques précautions supplémentaires doivent être prises pour l'appliquer à des plâtres ayant reçu des traitements pour augmenter leur résistance au feu car la pénétration de la sonde peut être gênée par des constituants supplémentaires, tels que des fibres, rajoutés lors de la fabrication. Cette étude expérimentale a donc montré, en se basant sur des résultats obtenus sur des essais en laboratoire, qu'il est possible d'utiliser la mesure de la profondeur de calcination d'une paroi en plâtre pour en déduire une sollicitation thermique ; pour être appliquée en tant que point de comparaison à des investigations post incendie, des études complémentaires doivent être menées sur des feux à échelle réelle pour lesquels le rayonnement n'est plus l'unique mode de transfert thermique.

Il sera intéressant, pour l'application de la modélisation numérique à la validation de scénarios d'incendie, que le LCPP se documente sur cette méthode de mesure par profondeur de calcination à l'aide d'une sonde ainsi qu'aux travaux de recherche complémentaires sur ce sujet. En effet, le LCPP manque parfois d'informations lors d'investigations sur des incendies ayant atteint des conditions d'embrasement généralisé et cette méthode pourrait être un bon moyen d'acquérir des informations sur les sollicitations thermiques du point de comparaison 'dégradation des parois en plâtre'.

4.4.2.5 Réponse du bois à une sollicitation thermique

L'interprétation du comportement du bois lorsqu'il est soumis à un incendie a, pendant de nombreuses années, été un sujet de recherche pour les investigateurs post-incendie. Cependant, l'utilisation des dégradations sur ce type de matériau pour déterminer une sollicitation est actuellement remise en cause. Certains auteurs affirment même que le bois peut être un matériau difficile pour procéder à des interprétations répétables, quantifiables et objectives de scènes d'incendie [SCHROEDER 2003]. En effet, s'il y a une bonne compréhension générale de la combustion du bois, il n'y a pas consensus parmi les chercheurs sur les températures exactes de décompositions, ou encore de début ou de fin de pyrolyse. Cela s'explique en partie par le nombre important de paramètres tels que la teneur en eau contenue dans le bois, sa désorption, sa dureté, la façon il est chauffé, la taille de l'échantillon testé, l'orientation et la direction des fibres, de l'essence, etc.

Vytenis Babrauskas [BABRAUSKAS 2003C] considère que la température d'inflammation du bois est de 250 °C lorsque l'échantillon est exposé au flux de chaleur minimum possible pour obtenir son inflammation et que dans ces conditions, le bois s'allume invariablement, du moins dans les premiers instants, de façon incandescente. La température d'inflammation augmente alors rapidement lorsque le flux de chaleur incident augmente. Des inflammations pilotées à des flux de chaleurs suffisants pour

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

obtenir une inflammation directement avec flamme se produit en général pour des températures de surface de l'ordre de 300 à 360 °C. Le flux minimum de chaleur pour l'allumage est de 4,3 $kW.m^{-2}$, mais pour l'obtenir, le temps d'exposition de l'échantillon se compte alors plus en heures qu'en minutes. Pour des temps d'exposition plus courts, une valeur de 20 $kW.m^{-2}$ est plus proche des divers résultats expérimentaux.

Dans la littérature, de nombreuses températures d'auto-inflammation différentes sont avancées. En effet, pour une auto-inflammation pilotée, les valeurs sont comprises entre 210 et 497 °C alors que pour une auto-inflammation non pilotée, elles varient entre 200 et 510 °C. L'explication à une telle dispersion des valeurs est que plusieurs définitions de la température d'inflammation existent. En effet, la première est la température de la surface du matériau au moment de l'allumage. La seconde est la température minimale du four susceptible d'enflammer un échantillon. La définition de la température d'auto-inflammation et par conséquent la valeur mesurée lors des essais dépendent donc de la méthode utilisée pour la déterminer. Le type de bois testé et l'appareillage utilisé sont deux autres explications à ces larges plages de température d'auto-inflammation.

Au final, le tableau 201 récapitule les valeurs des températures d'inflammation [BABRAUSKAS 2003C].

Flux	Minimum	Faible	Moyen
Type d'inflammation	Incandescence ou incandescence suivie d'une flamme		Flamme
Température d'auto-inflammation pilotée (°C)	250	350 – 400. Les valeurs sont plus faibles pour des flux près du minimum	300-310 pour des bois durs 350-365 pour des bois tendres
Température d'auto-inflammation non pilotée (°C)	250	Pas de valeurs	380 – 500

201. *Température d'auto-inflammation des bois [BABRAUSKAS 2003C]*

Malheureusement, pour ces valeurs, aucune donnée temporelle n'est avancée ; elles ne sont donc pas exploitables en l'état dans la démarche d'utilisation des points de comparaison pour en déduire une sollicitation thermique. Il faut pour cela s'intéresser à la profondeur de carbonisation ; en effet, alors que les premières études réalisées sur ce sujet n'intégraient pas de notions de temps d'exposition, c'est le cas des plus récentes. Deux types d'essais sont réalisés pour mesurer l'évolution temporelle de l'épaisseur de carbonisation. Le premier consiste à soumettre, à l'aide d'un four, un échantillon de bois à des conditions contrôlées de températures évoluant dans le temps ; il est très utile pour simuler des profondeurs de carbonisation du bois pour des feux ayant atteint l'embrasement généralisé. Le second essai est une exposition de la surface de l'échantillon à un flux thermique incident connu, en général constant dans le temps. Sur le premier type d'essai, la concentration en oxygène est inférieure à celle du second type d'essai. De plus, cette concentration a un impact sur le taux de carbonisation [MIKKOLA 1990], c'est pourquoi un facteur correctif k_{ox} est intégré pour la généralisation au deux types d'essais du taux de carbonisation β (en mm/min) en fonction du temps d'exposition t (en min), de la masse volumique de l'échantillon ρ (en $kg.m^{-3}$) et du flux thermique incident total moyen $\overline{\dot{q}''}$ (kW/m^2) exprimé dans l'équation (59) [BABRAUSKAS 2004].

$$\beta = 113 k_{ox} \frac{\overline{\dot{q}''}^{0,5}}{\rho t^{0,3}} \qquad (59).$$

k_{ox} vaut 1 lorsque la concentration en oxygène de l'enceinte d'essai est égale à celle de l'air ambiant et 0,8 pour les fours où la concentration en oxygène est inférieure. Un flux thermique total est utilisé dans l'équation (59) ; le rayonnement imposé par l'appareil d'essai est pris en compte, mais également celui engendré par la flamme en direction de l'échantillon pour des appareils tels que le cône calorimètre. Pour les fours, des études ont été faites pour corréler un flux thermique incident à une sollicitation thermique dépendante du temps.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Dans des conditions d'incendie post-flashover sévères, pour un élément en bois dense, le taux de carbonisation est équivalent à ceux mesurés grâce à un four et est grossièrement compris entre 0,5 et 0,8 $mm.min^{-1}$ [BABRAUSKAS 2004]. Cela permet donc facilement de relier une profondeur de carbonisation mesurée sur un incendie à un intervalle de temps pendant lequel l'embrasement généralisé a duré. Lorsque des conditions sévères de feu n'ont pas été atteintes, le taux de carbonisation peut être nettement inférieur aux deux valeurs avancées précédemment. Pour le panneau de bois fin d'une porte, un taux de carbonisation de l'ordre de 1,7 $mm.min^{-1}$ peut être attendu.

D'après ce qui vient d'être présenté, le bois apporte des informations sur des sollicitations thermiques à associer au point de comparaison 'dégradation du bois'. Trop souvent, et cela est particulièrement vrai pour le bois, les rapports d'essai présentant des mesures de températures ou de flux d'auto-inflammation pilotée ou non, ne donnent que trop peu d'informations temporelles. Les valeurs des températures et des flux d'auto-inflammation qui ont été listées précédemment et celles disponibles dans la littérature sont difficilement exploitables dans le traitement des points de comparaison. Elles seront plus utiles dans la définition dans l'outil de simulation, des caractéristiques thermiques des matériaux. Le taux de carbonisation, quant à lui, est exploitable lorsque des conditions d'embrasement général sévères ont été atteintes [BABRAUSKAS 2004]. Elles permettent, à partir des profondeurs de carbonisation mesurée, d'estimer un temps pendant lequel l'incendie généralisé a duré. Cette valeur est directement comparable aux résultats obtenus à l'aide des simulations numériques. Malheureusement, comme ce travail ne s'attache qu'aux premiers instants de l'incendie, et que des conditions sévères d'embrasement généralisé ne sont pratiquement jamais atteintes pendant cet intervalle de temps, une application pratique de ces valeurs de taux de carbonisation du bois ne seront que rarement utilisées.

4.4.2.6 Réponse de textiles divers à une sollicitation thermique

Lors d'investigations post-incendie, il est courant de retrouver des matériaux qui présentent des traces de carbonisation suite à une inflammation par rayonnement provenant directement des flammes du foyer ou des fumées. Dans les lieux de vie, ces matériaux sont en papier ou en coton comme sur exemple de la photo 202 d'un incendie dans un hôtel parisien où les draps en coton du lit ont des traces ponctuelles d'inflammation. Ainsi, du point de comparaison 'dégradation du drap en coton', il serait alors intéressant de déduire une sollicitation thermique.

202. *Tissus d'ameublement soumis au rayonnement des gaz chauds*

Une étude a été menée dans le but de collecter des données expérimentales sur l'énergie requise pour allumer des combustibles courants ordinaires pouvant être situés près de produits de consommations susceptibles d'émettre de la chaleur [MOWRER 2003]. Les matériaux ont été soumis au rayonnement thermique d'un cône calorimètre[18] et d'un appareil LIFT[19] (Lateral Ignition Flame Test) sans le support d'échantillon habituellement utilisé pour fixer le matériau, afin de reproduire des conditions d'exposition thermiquement fine. Aucun générateur d'arc électrique ni aucune flamme ne sont utilisés pour rester dans des conditions d'auto-inflammation non pilotée et celle-ci est jugée comme atteinte lors de l'apparition à la surface du matériau d'incandescence ou de flamme, selon le premier phénomène observé. Une moyenne est faite entre le minimum du flux de chaleur auquel l'allumage est observé et le maximum de ce même flux lorsque l'allumage n'est pas observé. Les résultats sont listés dans le tableau 203.

[18] Le fonctionnement du cône calorimètre est développé en annexe.
[19] Le détail de cet appareillage d'essai est donné en annexe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Matériau	Cône Calorimètre (kW.m^{-2})	LIFT (kW.m^{-2})
Tissu	37,3	36,8
Etamine	48,2	
Serviette en papier	30,7	23,3
Papier journal	28,9	29,7
Coton chirurgical	25,2	29,8
Toile	16,9	14,5
Couverture	22,4	14,3
Tissu d'ameublement	21,3	17,9
Serviette beige	17,9	13,0
Serviette blanche	27,3	14,6

203. *Flux incident minimum pour obtenir l'auto-inflammation non pilotée des matériaux [MOWRER 2003]*

En traitant les données disponibles dans l'étude, un temps maximum d'exposition lors des essais pour observer l'auto-inflammation non pilotée des matériaux est déterminé. Les résultats sont listés dans le tableau 204.

Matériau	Cône Calorimètre (s)	LIFT (s)
Tissu	38	103
Etamine	15	
Serviette en papier	14	120
Papier journal	20	96
Coton chirurgical	20	17
Toile	276	350
Couverture	84	532
Tissu d'ameublement	170	911
Serviette beige	191	995
Serviette blanche	72	754

204. *Temps maximum d'exposition pour observer l'auto-inflammation non pilotée des matériaux aux flux incidents indiqués dans le tableau 203*

Des tableaux 203 et 204, il est donc possible de déduire pour les matériaux présentés, une sollicitation thermique minimale à relier, par exemple, au point de comparaison 'Traces de carbonisation sur la couverture'. Malheureusement, l'étude manque de précisions sur les caractéristiques exactes des éléments testés et en particulier sur leur composition ; la toile, la couverture et les serviettes sont en coton, seulement, est-ce l'unique matière qui les compose ? Les résultats ne sont donc pas applicables tels quels dans nos études, mais une démarche identique de caractérisation des sollicitations thermiques minimales sera intéressante à mettre en œuvre sur des éléments prélevés par le LCPP.

Une distinction entre les tissus d'origine naturelle et les synthétiques est souvent faite. Ces matériaux, considérés comme thermiquement fin ont tendance à se comporter comme un thermoplastique lorsqu'il est fait de fibres synthétiques ou à générer des charbons pour des fibres naturelles. Leur comportement a été largement étudié, mais les résultats sont très dispersés. Pour de nombreux matériaux, Vytenis Babrauskas [BABRAUSKAS 2003] a rassemblé les températures d'inflammation déterminées à partir de divers essais tels que le four tubulaire, le four tubulaire vertical, le LIFT, etc.. Ces températures sont intéressantes à connaître, mais ne sont pas exploitables en l'état pour déterminer la sollicitation thermique d'un point de comparaison. Par contre, la notion temporelle est intégrée dans la même référence pour tout ce qui concerne les essais au cône calorimètre réalisés dans le but de déterminer pour les tissus, les flux critiques d'auto-inflammation pilotée ou non.

En conclusion, les tissus et en particulier ceux constitués à base de fibre de coton [MOWRER 2003] sont de bons points de comparaison à partir desquels il est possible de déterminer une sollicitation thermique. Les outils expérimentaux pour le faire peuvent être le cône calorimètre pour des sollicitations en rayonnement thermique et le four tubulaire pour la convection. Le LCPP disposant de ces deux moyens d'essais, il lui sera profitable d'utiliser ces matériaux comme point de comparaison. Cependant, l'aspect temporel est primordial à prendre en compte, de la même manière que Frederik Mowrer l'a fait dans son étude [MOWRER 2003].

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.4.2.7 Réponse de métaux à une sollicitation thermique

Le point de comparaison 'fonte d'un matériel en métal' est parfois exploitable dans le cadre de ces travaux. Cependant, pendant les premiers instants de l'incendie, il est rare d'atteindre des températures susceptibles de faire fondre du cuivre par exemple. Pour la majorité des métaux dont quelques températures de fusion sont listées dans le tableau 205, seule les températures atteintes dans la flamme sont capables de mener à leur fonte. L'état d'oxydation des métaux et le changement de couleur qui s'en suit sont également un indicateur de température atteinte par le matériau. Alors que toutes ces valeurs de températures sont correctement connues, aucune notion temporelle n'est liée à ces valeurs : la sollicitation thermique à imposer à 1 m^3 d'aluminium pour le faire fondre est largement supérieure à celle nécessaire pour 1 cm^3, l'aspect temporel est donc primordial.

Matériau métallique	Température de fusion en °C	Température (°C) de déformation ou d'effondrement d'un élément structurel
Acier	1100 à 1550	300 à 600
Aluminium	660	
Argent	960	
Bronze	900 à 1050	
Cuivre	1082	
Fer	1535	
Plomb	327	
Zinc	420	

205. *Température de fusion (°C) des métaux les plus courants*

4.4.2.8 Réponse des plastiques à une sollicitation thermique

Depuis quelques dizaines d'années, l'utilisation de matériels électriques tels que les télévisions, les chaînes hi-fi, les radioréveils ou encore les lampes de chevet s'est étendue : chaque foyer français en est dorénavant équipé. Le capotage de ces matériels est majoritairement constitué de matière plastique dont le comportement lorsqu'il est soumis aux effets thermiques d'un incendie peut être de se déformer comme cela est illustré sur les photos 206. Sur cet exemple, le téléviseur et la chaîne hi-fi sont disposés à des hauteurs sensiblement égales et leurs déformations en partie supérieure, accompagnées d'un léger changement de couleur, se ressemblent fortement. Constitués du même matériau, il est possible de penser que la sollicitation thermique associée aux points de comparaison 'dégradation de la télévision' et 'dégradation de la chaîne hi-fi' est la même.

206. *Chaîne hi-fi, téléviseur et lampe ayant subi les effets d'un incendie.*

Les matériels électriques sont également susceptibles de cloquer et de brûler sans se déformer comme l'illustrent les deux prises de courant sur les photos 22.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

207. *Prise de courant ayant subi les effets d'un incendie*

Les déformations visibles sur les photos 206 et 207 illustrent la classification en deux types qui est faite des polymères en fonction de leur comportement à la chaleur : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Lorsque les premiers sont portés à des températures supérieures à la température de transition vitreuse[20] ou à la température de fusion, ils se trouvent dans un état déformable. Les seconds restent rigides jusqu'à leur décomposition complète.

- Les thermoplastiques sont à base de polymères linéaires ou ramifiés. Ils sont susceptibles de se ramollir sous l'action de la chaleur et de se durcir par refroidissement, et cela un nombre indéfini de fois. À cet égard, ils peuvent être comparés à la cire ou au fer. Les thermoplastiques typiques sont ceux à base de polyéthylène, de polypropylène, de poly (chlorure de vinyle), d'homopolymères et copolymères du styrène, de résines acryliques, de cellulosiques, de nylons et de diverses résines fluorées. Le tableau 208 liste les températures de transition vitreuse et de fusion de plusieurs matériaux plastiques, ainsi que leurs applications dans la confection de matériels.

- Les thermodurcissables sont des plastiques à base de polymères qui, ayant subi une réaction chimique (amorcée par la chaleur, par les catalyseurs ou par la lumière UV), se transforment en un produit relativement infusible, intraitable et insoluble. Le composant polymère du produit est à l'état réticulé. Les thermodurcissables se comportent donc comme le béton : après la réticulation, il n'est plus possible de les fondre ou de les mouler à nouveau. Les plastiques thermodurcissables typiques sont les phénoliques, les alkydes, les polyuréthanes, les mélamines et les uréeformaldéhydes (urée-formols) et ceux à base de résines époxydes.

[20] La transition vitreuse est le changement d'état du polymère ou du matériau composite polymérisé, sous l'action de la température. Ce changement d'état entraîne des variations importantes de ses propriétés mécaniques. Une température de transition vitreuse est associée à ce changement d'état. En dessous de cette température, le polymère est dit vitreux (état solide) et présente le comportement d'un corps solide élastique. Au-dessus il présente un comportement de solide plastique (état viscoélastique), suite à l'affaiblissement de liaisons intermoléculaires (force de Van der Waals, ...).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Matière Plastique	Température de transition vitreuse (°C)	Température de fusion (°C)	Applications
Copolymère – Acrylique, butadiène, styrène (ABS)	85 - 125	105 - 120	Capotage d'électroménager, ordinateur
Polyamide (PA)	52 - 55	176 – 265	Capot de matériel électroménager, interrupteur et prise de courant
Polychlorure de vinyle (PVC)	80	100 - 120	Tuyauterie, profilé pour fenêtre
Polytéréphtalate d'éthylène (PET)	65 – 80	255 - 260	Bouteille d'eau gazeuse
Polybutylène téréphtalate (PBT)	60	225	Sèche cheveux, interrupteur, base de grille pain ou de cafetière
Polyoxyméthylène (POM)	-50	164 – 177	Carrosserie d'appareil électroménager
Polycarbonate (PC)	150	220 – 250	Capot de matériel électroménager, interrupteur et prise de courant
Polyphtalamide (PPA)	85 - 150	310	Boîtier de lampe halogène, connecteurs électroniques

208. *Températures de transition vitreuse et de fusion des thermoplastiques (°C) et leurs applications diverses*

À cause de leur présence incontournable dans notre environnement quotidien, il est intéressant d'étudier le comportement de matériels fabriqués à base de plastique lorsqu'ils subissent les effets d'un incendie. Ainsi, des sollicitations thermiques seront fréquemment déduites des points de comparaison du type 'dégradation du matériel plastique'. C'est pour cette raison, qu'il est important de déterminer les méthodes d'essai les plus appropriées pour collecter des données expérimentales sur les matériaux plastiques.

Dans les établissements recevant du public, les appareils d'éclairage sont soumis à réglementation [JO 2002]. Les parties externes des luminaires fixes ou suspendus doivent satisfaire à l'essai au fil incandescent défini dans les normes en vigueur. Cet essai est sensé reproduire l'impact de fils ou d'éléments incandescents sur des parties de matériaux isolants ou combustibles qui pourraient de ce fait, s'enflammer et propager un incendie dans le proche voisinage. L'essai consiste donc à appliquer le fil incandescent sur l'échantillon pendant une durée donnée et à observer son comportement ainsi que celui de son environnement. Selon la réglementation, la température du fil incandescent doit être de 850 °C pour les luminaires d'éclairage de sécurité, d'éclairage normal des circulations horizontales encloisonnées et des escaliers, et d'éclairage normal des locaux accessibles au public lorsque la surface apparente totale des luminaires est supérieure à 25 % de la surface du local. Cette température passe à 750 °C pour les autres luminaires d'éclairage normal des autres locaux accessibles au public. Lors de l'essai, le fil est appliqué pendant 30 secondes sur l'échantillon. Celui-ci répond correctement à un essai si le temps d'extinction après le retrait du fil est inférieur à 30 secondes, et si aucune goutte n'enflamme le papier mousseline placé à 20 cm de l'échantillon. Cet essai est beaucoup trop localisé pour en tirer bénéfice dans le cadre de la caractérisation de la sollicitation thermique des plastiques. En prenant l'exemple d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité ayant répondu correctement à un essai au fil incandescent, il est juste montré que le feu ne se propage pas au reste du matériel et qu'il n'y a pas de gouttes, enflammées ou non, également susceptibles de propager l'incendie. En général, les températures utilisées lors des essais sont largement supérieures aux températures de fusion des matériaux. Donc il est difficile de tirer des informations de l'essai au fil incandescent exploitables pour utiliser les éléments tels que le bloc autonome de la photo 209 comme point de comparaison. Les essais dans des fours ou des étuves pour soumettre les plastiques à une atmosphère à une température imposée ou au cône calorimètre pour une exposition uniquement à un rayonnement thermique apporte déjà plus d'informations si le protocole expérimental est correctement défini.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

209. *Dégradation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité pris dans un incendie*

Dans ce paragraphe, les recherches se sont focalisées sur la fonte et la dégradation des matériaux. Bien évidemment, la non dégradation peut tout autant éclairer sur les conditions thermiques atteintes lors de l'incendie : si un matériau qui n'a subi aucune détérioration est remarqué à proximité d'autres qui ont été dégradés, il est possible d'avancer une sollicitation thermique maximale atteinte localement pour le point de comparaison 'non-dégradation d'un matériel plastique'.

L'avantage est que pour les sollicitations thermiques rencontrées dans un incendie courant, ou au moins pour des températures comprises entre 50°C et 550°C, les dégradations résultantes sur les matériaux plastiques sont nombreuses et de diverses natures sur les matériaux plastiques : non dégradation, changement de couleur, déformation, fonte, … La dernière, qui n'a pas encore été évoquée pour ce matériau, est la combustion du matériau. Pour la caractériser, il faut s'intéresser aux températures d'inflammation pilotée, d'auto-inflammation qui sont bien connus pour de nombreux types de plastiques et se trouvent aisément dans la littérature, dans les nombreux handbooks par exemple [BABRAUSKAS 2003]. Dans le tableau 210 sont données quelques valeurs de températures d'auto-inflammation mesurées au four Setchkin, afin de connaître les ordres de grandeur des températures auxquelles le phénomène se produit.

Malheureusement, pour la majorité des informations avancées concernant les températures de transition vitreuse, de fonte ou encore d'inflammation, peu de données temporelles sont communiquées ; il n'est donc pas facile, en l'état, de généraliser une sollicitation thermique à ces matériaux.

Matériau	Température d'inflammation pilotée (°C)	Température d'auto-inflammation (°C)
Nylon 6	413	439
Phénol formaldéhyde (solide)	430	482
Résine polyester	380	451
Polystyrène	375	435
Polyuréthane souple	356	374
Polyuréthane rigide	378	502

210. *Valeurs de température d'inflammation mesurées au four Setchkin [BABRAUSKAS 2003]*

4.4.2.9 Bilan des recherches bibliographiques

L'évaluation de scénarios d'incendie en utilisant des points de comparaison, telle qu'elle est envisagée par le LCPP dans le cadre de ces travaux, nécessite une très bonne connaissance des matériaux. Il est impossible de connaître leur comportement suite à une sollicitation thermique en ne se basant que sur des données bibliographiques, car ces données sont toujours incomplètes à cause d'une connaissance partielle du protocole expérimental, de la nature exacte du matériau, ou d'une sollicitation thermique trop différente de celles rencontrées lors de l'incendie. De plus, pour déterminer une sollicitation thermique à associer à un point de comparaison, l'aspect temporel est trop souvent oublié dans les études bibliographiques. En effet, les températures d'auto-inflammation, de fusion, de bris de vitrage sont toujours découplées du temps d'exposition. Or, il est évident que le capotage d'un

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

téléviseur en ABS ne fond pas instantanément lorsque sa température de fusion est atteinte. Il existe une inertie du téléviseur dépendant de sa masse, de sa capacité à diffuser l'énergie, de son environnement, de la nature de l'exposition, … Une utilisation correcte de cette méthode de validation de scénarios est donc indissociable de campagnes expérimentales. Elles permettront de relier une sollicitation thermique à un point de comparaison et complèteront les données bibliographiques présentées dans le paragraphe 4.4.2.

Pour le bois et le plâtre, les méthodes de sondage présentées sont un bon moyen de mesurer une profondeur de carbonisation ou de calcination. Les corrélations de ces mesures avec une sollicitation thermique lors d'incendies réels ne sont pas encore effectives, c'est pourquoi il sera être intéressant, moyennant quelques investissements en matériels expérimentaux, que le LCPP étudie cet aspect. À l'heure actuelle, les dégradations sur ces deux matériaux sont uniquement utilisées pour localiser les zones où les sollicitations thermiques ont été les plus sévères et ne sont jamais quantifiées.

Le béton n'a pas suffisamment d'états de dégradation différents pour être un point de comparaison rentable. De plus, les moyens d'analyse nécessaires pour relier une sollicitation thermique à une dégradation sont beaucoup trop onéreux et complexes à mettre en œuvre pour être retenus. Il en est de même pour la majorité des métaux.

Au final, le matériau le plus facilement exploitable pour relier un point de comparaison à une sollicitation thermique basse est le plastique. Il présente l'avantage d'avoir plusieurs types de dégradations : changement de couleur, déformation, fonte, combustion, etc.. Un autre aspect positif pour ce matériau est la grande quantité de plastiques différents qui existe et par conséquent la large gamme de températures que ces matériaux couvrent pour atteindre les sollicitations exposées précédemment. Malheureusement, cela se révèle également être un désavantage car il n'est pas toujours facile, a priori et a posteriori, de connaître le type de plastique utilisé. Ainsi, pour des sollicitations thermiques plus sévères, les matériaux comme le plâtre ou les métaux pourraient être utilisés.

4.4.3 Expériences menées pour aider à la caractérisation des points de comparaison

Le paragraphe 4.4.2 a présenté la méthode d'utilisation de point de comparaison pour valider des scénarios d'incendie. Une étude bibliographique n'est pas suffisante pour corréler une sollicitation thermique à un point de comparaison, des essais expérimentaux sont indispensables pour la compléter. Pour mener ces expériences, il faut au préalable déterminer le type de matériau s'y prêtant le mieux. Avec les moyens expérimentaux dont dispose le LCPP, les plastiques sont les meilleurs candidats car entre 50 et 550 °C, ils sont susceptibles d'être dégradés selon plusieurs modes. Exposer de simples plaques de plastique offre moins d'intérêt que l'exposition directe d'un produit fini car un paramètre tel que la masse par exemple joue un rôle non négligeable dans le processus de dégradation. Notre choix s'est porté sur des éléments d'usage courant présents dans l'ensemble des constructions : les interrupteurs, les prises de courant, et les blocs autonomes d'éclairage de sécurité.

4.4.3.1 Dispositifs d'essais de comportement au feu

Les dispositifs d'essais de comportement au feu sont généralement définis dans un but normatif afin d'évaluer le comportement d'un matériau sur un ou plusieurs critères de performances. C'est pourquoi ces essais ne permettent pas toujours d'obtenir des données pertinentes pour la caractérisation des points de comparaison. Cependant, il est possible de se demander si ces dispositifs pourraient être utilisés en s'éloignant du protocole d'essai normalisé afin de solliciter des éléments d'usage courant. De nombreux essais existent, ce paragraphe propose de lister les plus courants et de d'évaluer la possibilité d'en retirer des informations exploitables pour la caractérisation des points de comparaison. Il se base sur la référence [PLA 2007].

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les premiers types d'essais évaluent l'allumabilité d'un matériau et la propagation des flammes sur celui-ci. Il comporte :

- L'essai par rayonnement [NF 92501 1995] soumet l'éprouvette inclinée horizontalement à 45° à une source de chaleur rayonnante engendrée par un épiradiateur. L'éclairement énergétique est constant et voisin de 32 $kW.m^{-2}$. Une rampe de flamme pilote peut éventuellement provoquer l'inflammation des gaz dégagés. Lors de l'essai normalisé, le temps d'inflammation, la hauteur maximale de flamme par période de 30 s et le temps total de combustion sont mesurés. Étant donné l'inclinaison de l'élément ainsi que l'éclairement énergétique constant, cet essai n'est pas très utile pour caractériser les points de comparaison.

- Lors de l'essai de fusibilité [NF 92505 1995], l'éprouvette disposée horizontalement est exposée à la même source rayonnante que l'épiradiateur par sa face supérieure afin de provoquer l'inflammation des gaz dégagés ainsi que la chute de gouttes, enflammées ou non. Encore une fois, cet essai purement radiatif à l'éclairement énergétique constant n'apporte pas d'informations très exploitables pour caractériser les points de comparaison.

- Avec l'essai de propagation de flamme sur les matériaux rigides [NF 92504 1995], l'éprouvette est exposée à l'action d'un brûleur à gaz afin d'essayer de provoquer l'inflammation de l'éprouvette et un effet de propagation de flamme. Le temps de persistance des flammes et la vitesse de propagation de flamme sur 250 mm peuvent être mesurés. Cependant, ces données ne sont pas exploitables pour la caractérisation des points de comparaison. De plus, la normalisation de l'application d'une flamme n'est pas essentielle pour évaluer un élément testé, la flamme d'un briquet ou d'un bec bunsen suffit pour collecter des informations sur le comportement mécanique de l'élément.

- Le panneau radiant, alimenté au propane et couplé à une flamme pilote, est utilisé pour tester des revêtements de sol [NF 92506 1985]. Comme l'éprouvette n'est pas placée parallèlement à la source calorifique et que le réglage d'exposition se fait à l'aide de mesures de températures, une méthode peu flexible, ce dispositif expérimental n'est pas utilisable pour caractériser les points de comparaison.

- L'essai au brûleur électrique [NF 92503 1995] expose l'éprouvette à l'action d'un rayonnement calorifique, des gaz chauds balayant la surface de l'échantillon et d'une flamme de propane. Un léger phénomène convectif pourrait être intéressant à étudier pour caractériser les points de comparaison mais malheureusement, les sollicitations thermiques sont trop faibles pour engendrer l'endommagement des points de comparaison.

- Lors de l'essai indice d'oxygène [NF EN ISO 4589 1999], la combustion d'une éprouvette, maintenue en position verticale après l'inflammation avec une flamme de propane est étudiée en fonction de la modification d'une atmosphère constituée d'azote et d'oxygène. La concentration de cette dernière espèce est modifiée afin d'obtenir la concentration limite nécessaire au maintien de la combustion. D'une part, le dispositif expérimental est trop petit pour exposer un élément à tester dans son entier, et d'autre part, les données mesurées n'apportent pas d'informations intéressantes pour caractériser les éléments d'usage courant.

- L'essai au panneau radiant OMI [ISO 5658-2 2007] permet d'exposer des éléments disposés verticalement à un gradient de flux variant de 50,5 $kW.m^{-2}$ à 1,5 $kW.m^{-2}$. Un brûleur peut être utilisé comme flamme pilote. Cet essai peut être intéressant pour caractériser des points de comparaison car il permet d'exposer en un seul essai plusieurs points de comparaison à un gradient de flux radiatif. Cependant, la sollicitation ne reste qu'une exposition à un rayonnement pur. Cet essai est proche de celui du panneau radiant classique mais mieux instrumenté.

Le second type d'essai est mis en œuvre pour mesurer l'opacité des fumées. Deux dispositifs existent : celui régi par la norme [NF X 10700-2 2006] et l'autre par la norme [ISO 5659 2007]. Pour les deux essais, l'échantillon est soumis à une source rayonnante, accompagnée d'une flamme pilote pour le second, et l'opacité des fumées est mesurée dans l'enceinte clause du dispositif expérimental par perte de transmission lumineuse. Les flux incidents rayonnés sont soit de 25 $kW.m^{-2}$, soit de 50

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

kW.m^{-2} selon l'essai. Utiliser l'un de ces dispositifs aurait été intéressant pour coupler une sollicitation par rayonnement à un dépôt de suie. Malheureusement l'élément produisant les suies est l'échantillon exposé au rayonnement. Par conséquent, la génération de suie est directement liée à la combustion de l'élément, combustion qui n'est pas toujours souhaitée pour caractériser le point de comparaison.

La toxicité des fumées est majoritairement testée en France à l'aide du four tubulaire [NF X 70100-1 2006]. Un échantillon est placé à l'intérieur du four porté à 400, 600 ou 800 °C et ce dernier est balayé par un flux d'air constant. Les gaz prélevés en sortie sont analysés. Ce dispositif expérimental aurait pu reproduire une sollicitation par convection d'un élément placé à une température pouvant facilement être fixée entre 100 et 1000 °C. Mais le diamètre du tube est trop largement inférieur à la taille d'un élément à exposer. Ce dispositif n'est donc pas utilisable pour caractériser un point de comparaison.

Le dispositif expérimental le plus facilement modifiable afin de caractériser les points de comparaison est donc le cône calorimètre [ISO 5660 2002]. Les expériences développées avec ce dispositif sont décrites dans le paragraphe 4.4.3.2.

4.4.3.2 Expériences en laboratoire

Les moyens expérimentaux en comportement au feu dont le LCPP dispose pour caractériser les dégradations sur un plastique se résument à un four tubulaire[21] et un cône calorimètre[22]. Le tube réfractaire en quartz du four tubulaire, d'un diamètre de 40 mm est trop petit pour recevoir en entier, un produit fini du type interrupteur ou prise de courant. Bien que la gamme de températures imposées lors de cet essai puisse atteindre 1000 °C et soit de l'ordre de celle d'un incendie, ce dispositif expérimental ne sera pas utilisé dans le but de caractériser les dégradations d'un point de comparaison à des sollicitations thermiques. Les essais à l'aide du cône calorimètre grâce auquel un échantillon est soumis à un flux radiatif incident pouvant atteindre un maximum de 100 kW/m^2 sont par conséquent privilégiés. Ils permettent, pour un élément donné, d'associer une sollicitation thermique du type <flux radiatif incident - temps d'exposition>, à un point de comparaison. Sur les photos 211 prises lors d'un test sans allumage piloté à 36 kW.m^{-2}, le comportement thermodurcissable de l'interrupteur est mis en évidence : l'élément exposé est dégradé sans se déformer. Le bouton poussoir, plus léger que le socle de l'interrupteur se détériore en premier : le matériau vierge commence à présenter quelques cloques dès 30 secondes puis commence à noircir et s'enflamme finalement. En fin d'essai, l'interrupteur est complètement calciné, et il n'en reste que les parties métalliques. De ce type d'essais, des informations intéressantes sont déjà exploitables. En premier lieu, une caractérisation du type de plastique est effectuée c'est à dire savoir s'il se comporte plutôt comme un thermoplastique ou un thermodurcissable. Malheureusement, la majorité des dégradations constatées sur un élément dans un cas réel sont imputables à un effet conjugué de la convection et du rayonnement et l'essai au cône calorimètre, majoritairement radiatif, n'est donc en général pas représentatif des conditions rencontrées lors d'un incendie. Les essais au cône calorimètre seront donc réservés pour l'évaluation des sollicitations thermiques à associer aux points de comparaison dans les cas où ils ont été exposés à un rayonnement thermique pur, comme celui d'une flamme vers un élément en partie basse de la pièce, très peu soumise aux effets de convection.

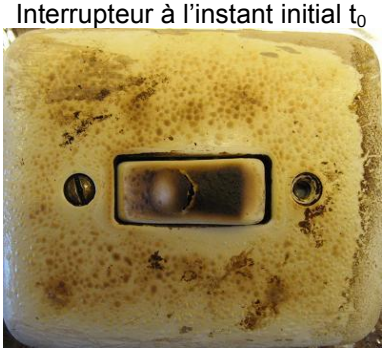
[21] Le descriptif du four tubulaire et de son fonctionnement est disponible en annexe
[22] Le descriptif du cône calorimètre et de son fonctionnement est disponible en annexe

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Interrupteur à l'instant initial t_0

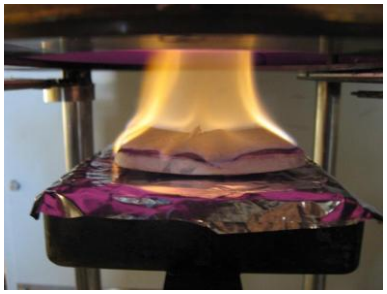
Interrupteur à t_0 + 30 s

Interrupteur à t_0 + 60 s



Interrupteur à t_0 + 90 s

Interrupteur à t_0 + 120 s

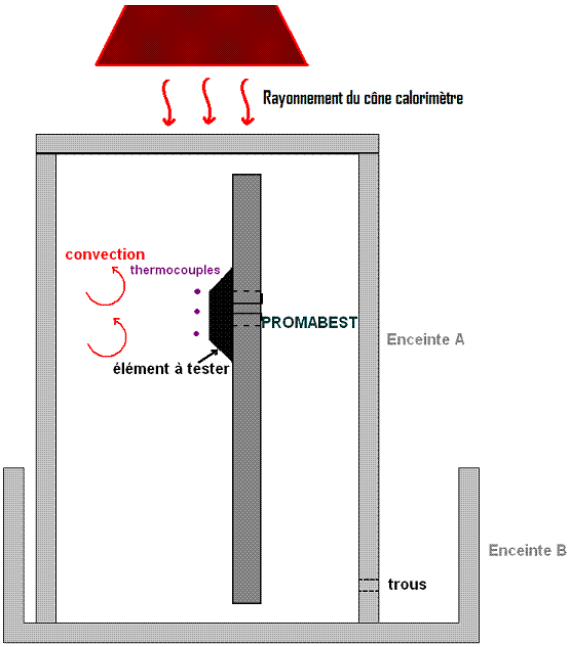


Inflammation de l'interrupteur à t_0 + 203 s

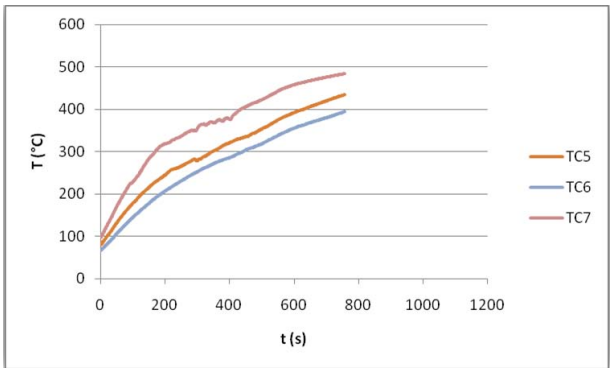
211. *Interrupteur exposé à un flux radiatif incident de 36 kW.m^{-2} au cône calorimètre*

Des essais complémentaires ont donc été réalisés au LCPP dans le but d'associer une sollicitation thermique représentative de celle rencontrée sur un incendie, aux points de comparaison 'dégradation d'un interrupteur' et 'dégradation d'une prise de courant' [PERESSON 2008]. Les premières étapes de ce travail ont été de mettre au point un dispositif expérimental (voir la photo 214) reproduisant une partie des sollicitations thermiques rencontrées lors d'un incendie : un transfert énergétique majoritairement dû à la convection par rapport au rayonnement et à la conduction, un gradient thermique vertical et enfin une évolution temporelle réaliste de la température. Malheureusement, un mouvement de convection n'a pas pu être obtenu avec le dispositif retenu : un seau percé de quelques trous pour évacuer les fumées, isolé thermiquement de l'extérieur à l'aide de laine de roche sur les côtés de l'enceinte dans lequel l'élément à tester est placé verticalement (cf. schéma 212). L'élément à tester est à placer dans une atmosphère dont la température croit. L'énergie pour chauffer le système est apportée par le rayonnement du cône calorimètre en direction de la face supérieure du seau et permet d'atteindre des températures maximales de l'ordre de 500°C avec un gradient de température important se traduisant par une augmentation de la température de 50°C.cm^{-1} au niveau de l'élément exposé. Il pourrait être reproché à ce fort gradient de ne pas solliciter uniformément l'ensemble de l'élément exposé comme cela est le cas sur un incendie réel. Cependant, trois sollicitations thermiques différentes sont synonymes de trois dégradations distinctes et cela obtenu sur un même élément au cours d'un unique essai. La variation temporelle de la température à l'intérieur de l'enceinte tracée sur le graphique 213 reproduit correctement la phase de croissance d'un incendie.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



212. *Schéma du dispositif expérimental*



213. *Températures mesurées dans l'enceinte lors d'un essai sur un interrupteur*

214. *Enceinte expérimentale isolée, disposée sous la résistance chauffante du cône calorimètre*

Les éléments exposés lors de ces essais sont des prises de courant et des interrupteurs fabriqués à base de polycarbonate (PC) et d'ABS, dont les températures caractéristiques sont rappelées dans le tableau 215. Soumis à des températures pouvant atteindre 500°C, l'ensemble des dégradations susceptibles de se produire pour ces matériaux est légitimement attendu : déformation, fonte, combustion, carbonisation, etc..

Matériau	Température de transition vitreuse (°C)	Température de fusion (°C)	Température d'auto-inflammation (°C)
Polycarbonate	150	220 – 250	450 – 530
ABS	85 – 125	105 - 120	400 – 470

215. *Températures caractéristiques du polycarbonate et de l'ABS*

Sur les courbes de température présentées par la suite (cf. graphiques 216), le point de mesure TC7 correspond au thermocouple placé au centre de l'élément testé, TC6 est placé 1 cm au-dessus de TC7 et TC8 est disposé 1 cm en dessous. La caractérisation des déformations observées lors des essais se fait principalement de manière qualitative : modification de la couleur, degré d'affectation (aucun, dépôt de suie, carbonisation en surface, en profondeur, etc.), épaisseur de la couche carbonisée. Cela permet de distinguer trois catégories de dégradations : déformation légère (fusion superficielle, changement de couleur), carbonisation superficielle, carbonisation en profondeur et de leur attribuer une sollicitation thermique.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

La synthèse d'une partie des résultats des essais sur les interrupteurs[23] est présentée dans le tableau 216 ; elle se base sur des sollicitations thermiques du type <Température – temps> et s'appuie particulièrement sur les températures de transition vitreuse et de fusion du polycarbonate rappelées dans le tableau 215. Une des difficultés pour relier une dégradation à cette sollicitation thermique est d'appréhender le poids du facteur temps dans le processus d'endommagement. En effet, alors qu'il est aisé de concevoir qu'il existe une température limite à partir de laquelle un matériau commence par exemple à se déformer, il est plus complexe d'estimer le temps d'exposition à cette température pour que cette déformation apparaisse. L'origine de cette difficulté provient des températures considérées. Lorsque la température de transition vitreuse est évoquée, elle correspond à celle du matériau ; lors de ces essais, la température de la sollicitation thermique correspond à celle de l'atmosphère ambiante. L'écart entre ces deux températures dépend de l'inertie thermique du matériau, de sa capacité à accumuler et à dissiper l'énergie. Cependant, au regard de la masse des éléments testés et des conditions d'expérience en laboratoire et en particulier de la croissance relativement lente des températures, les températures dans l'enceinte sont considérées comme égales à celles de l'élément exposé tant que ce dernier n'est pas le siège d'une combustion ; le facteur temps de la sollicitation thermique n'est par conséquent pas ici un facteur prépondérant dans la corrélation avec les dégradations constatées.
Les essais présentés soulignent l'importance de la connaissance des températures caractéristiques du matériau testé. En effet :

- les dégradations légères correspondent à une sollicitation thermique ayant des températures comprises entre 150 et 220 °C c'est-à-dire entre la température de transition vitreuse et celle de fusion du matériau. (voir la synthèse de la sollicitation thermique dans le tableau 216),

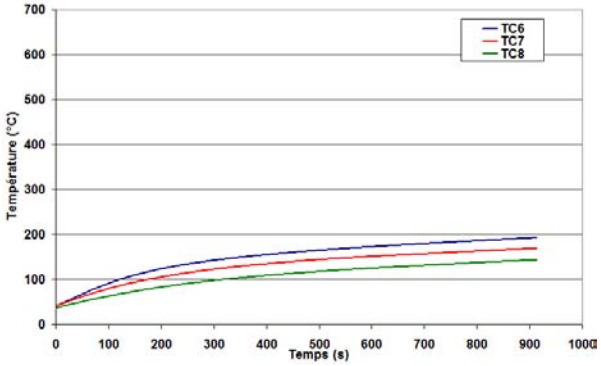
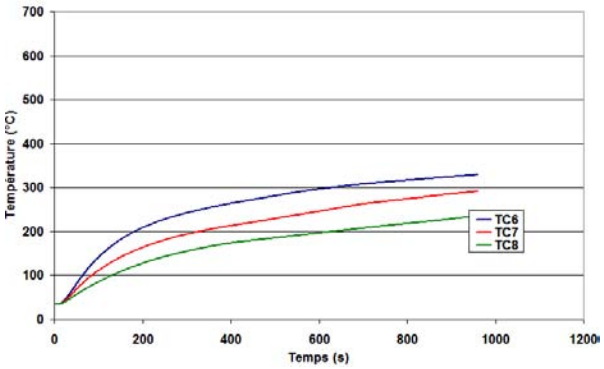
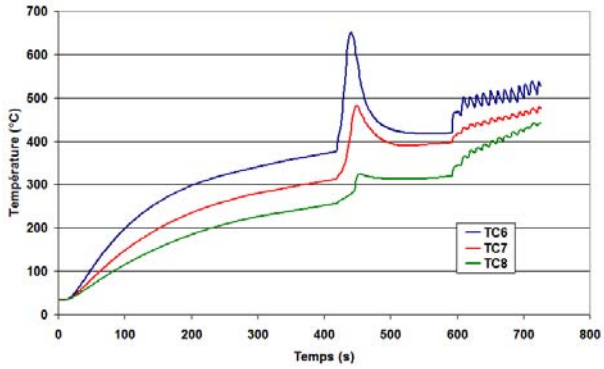
- des carbonisations superficielles correspondent à des températures comprises entre 250 et 320 °C, c'est-à-dire entre la température de fusion du matériau et une valeur inférieure à la température moyenne d'auto-inflammation non pilotée de 550°C,

- et enfin, des carbonisations en profondeur correspondent à des températures comprises entre 250 et 650°C, c'est-à-dire supérieures à la température d'auto-inflammation non pilotée du polycarbonate.

Ces conclusions peuvent paraître triviales, cependant elles ne le sont que parce que les températures dans l'enceinte croissent lentement et régulièrement et que par conséquent, la température de l'échantillon est assimilable à celle de l'enceinte ; le facteur temporel de la sollicitation thermique n'est alors pas prépondérant. Cet essai en laboratoire est donc une simplification de la sollicitation thermique à laquelle un élément est exposé lors d'un incendie. Malheureusement, il ne reproduira jamais l'ensemble des effets, c'est pourquoi des essais dans des conditions réelles sont nécessaires. Le dépôt de suie est par exemple un phénomène qui ne se retrouve pas dans ces essais alors qu'ils sont importants à intégrer dans l'analyse car ils peuvent modifier et complexifier l'interprétation faite de la dégradation de l'élément. Lorsque la sollicitation thermique imposée à des matériaux thermoplastiques dépasse un seuil, ils se déforment ; ils redurcissent ensuite en refroidissant. À aucun moment lors de ces essais, cet aspect de refroidissement de l'enceinte n'a été pris en compte. Il n'est pas facile, lors d'un feu réel, d'estimer les conséquences de l'extinction de l'incendie par les pompiers ainsi que le temps de refroidissement sur la dégradation des éléments. Des essais à l'échelle du laboratoire pourraient être un moyen d'apprécier ces conséquences.

[23] Celle pour les prises de courant et les interrupteurs est disponible en annexe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

	Photo	Sollicitation thermique imposée	Synthèse de la sollicitation thermique maximale
Déformations légères			150<T<195 °C Δt=560 s
Carbonisation superficielle			150<T<330 °C Δt=850 s 250<T<330 °C Δt=620 s
Carbonisation en profondeur			150<T<650 °C Δt=650 s 250<T<650 °C Δt=590 s

216. *Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les interrupteurs*

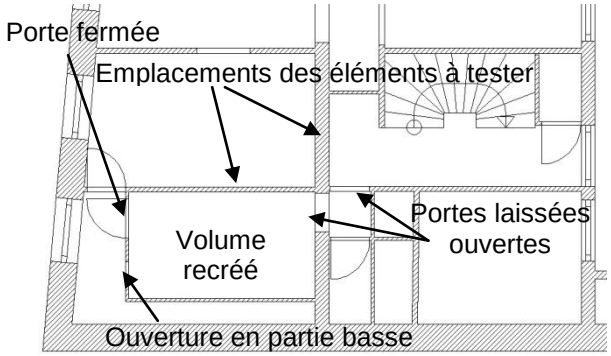
4.4.3.3 Expériences sur feux réels

Les essais en laboratoire ont permis de commencer à caractériser les sollicitations thermiques à associer à un point de comparaison du type 'dégradation d'un interrupteur' et 'dégradation d'une prise de courant'. Cependant, ces essais à petite échelle dans un laboratoire ne permettent pas d'observer l'ensemble des dégradations susceptibles d'être rencontrées sur les prises de courant et les interrupteurs, c'est pourquoi des expériences sur des feux réels ont permis de compléter la caractérisation. Des opportunités se sont offertes sur trois campagnes expérimentales et les résultats collectés seront présentés au cas par cas, sans qu'une synthèse ne soit faite, car le protocole expérimental s'est enrichi à chaque essai et les données collectées ne sont pas directement comparables.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.4.3.3.1 Essais de la rue Boinod

Les premiers essais réels pour associer une sollicitation thermique aux points de comparaison 'dégradation d'un interrupteur, d'une prise de courant ou d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité' ont été menés dans un immeuble parisien du 18ième arrondissement. Ce bâtiment R+5/R-1 présente les caractéristiques des constructions anciennes de l'agglomération parisienne : escalier non encloisonné avec palier desservant les appartements à chaque niveau, escalier desservant les caves débouchant dans le hall d'entrée, cage d'escalier très étroite et chargée en combustible… À cause de son implantation en milieu urbain à proximité d'autres habitations et du besoin de préserver la façade en vue de la rénovation de l'immeuble, les feux expérimentaux ont été limités en puissance et en temps. Un volume de 7 m^2 de surface au sol a été recréé à l'intérieur d'une pièce à l'aide de plaque de plâtre. Celui-ci communique vers l'escalier par une porte de 2 m de haut par 80 cm de large et vers l'extérieur par le biais d'une ouverture de 50 par 40 cm située en partie basse du local. Les locaux sont représentés sur le plan 217. Un matelas en mousse de polyuréthane haute densité (1,4 x 2,0 x 0,16 m^3), une palette de bois placée sous le matelas comme sommier, une fine moquette en polyester, une table de chevet en bois, une imprimante et une tour et un écran d'ordinateur sont disposés dans le volume et constituent la charge calorifique (voir la photo 218). Quatre panneaux en contreplaqué de (2,0 x 1,20 x 0,005 m^3) sont également fixés sur les parois. La mise à feu s'effectue à l'aide d'un récipient d'alcool éthylique dénaturé placé sous le matelas et l'extinction par la BSPP débute 10 min après l'allumage.



217. *Plan du 3ème étage de l'immeuble*

218. *Volume expérimental recréé et charge combustible disposée*

Les éléments à soumettre au feu ont été disposés à deux emplacements distincts indiqués sur le plan 217. Dans la chambre recréée, trois interrupteurs et trois prises de courant ont été fixés aux hauteurs de 1.85 m, 1.65 m et 1.45 m comme illustré sur la photo 219. Sur le palier de l'appartement, l'interrupteur a été mis à 2.40 m du sol, les prises de courant à 2.40 m, 2.10 m et 1.80 m et le bloc autonome d'éclairage de sécurité à 2.25 m comme cela est visible sur la photo 220. Les températures ont été mesurées à l'aide de thermocouples. Pour les prises de courant et les interrupteurs, ils ont été placés à l'intérieur des éléments de façon à légèrement affleurer par la surface exposée. Le bloc autonome d'éclairage de sécurité a été équipé de deux thermocouples, le premier collé contre la face intérieure de la vasque et le second à l'intérieur sur le circuit imprimé. Pour ces premiers essais, le choix d'une mesure de température du matériau et non pas des conditions ambiantes a été fait, c'est pourquoi les dispositifs de mesure étaient placés à l'intérieur des matériels électriques. Ce point important sera rediscuté dans la suite de ce paragraphe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

219. *Disposition des prises et des interrupteurs dans le volume recréé*

220. *Disposition des prises de courant, interrupteurs et bloc autonome de sécurité sur le palier de l'appartement*

Lors de l'essai, l'embrasement généralisé a été atteint dans le volume recréé ; la quasi-totalité des éléments disposés à l'intérieur ont disparu car ils ont été exposés aux effets des fumées supérieures à 600°C aux points de mesure, au rayonnement des flammes et certainement même au contact direct des flammes. Quelles que soient les hauteurs auxquelles les éléments étaient fixés et leur nature thermoplastique ou thermodurcissable, les dégradations sont identiques : les prises de courant et les interrupteurs ont été totalement carbonisés et ont pratiquement totalement disparu. Les interrupteurs en matériau thermoplastique ont dans un premier temps fondu pour ensuite se consumer au sol. Les prises de courant thermodurcissables ont carbonisé sans se déformer. Les éléments ont été exposés à une sollicitation thermique supérieure à 500°C pendant plus de 4 minutes (voir le tableau 221); ces températures sont supérieures aux températures d'auto-inflammation des plastiques exposés, il est donc naturel d'observer de telles dégradations. Entre 200 s et 400 s, il existe une différence de près de 300°C entre les températures mesurées sur les prises de courant et celles sur les interrupteurs (voir le tableau 221), bien que les thermocouples aient été placés à l'identique sur les deux éléments, contre le dos de la face exposée au feu. Cette différence provient vraisemblablement des deux matériaux différents composant l'interrupteur ; un des deux points de mesure a été fixé sur la partie dont la température de fusion est inférieure à l'autre. Ainsi, dès que les températures ont dépassé 200°C, ce thermocouple n'a plus mesuré la température du plastique, mais celle de l'air ambiant puisqu'il n'a plus été en contact avec aucun élément solide. Il en est de même pour toutes les températures mesurées au contact des autres éléments exposés : lorsque la température dépasse 400 °C, il n'est plus possible de la considérer comme étant représentative de celle du matériau.
Comme pour les éléments placés dans le volume recréé, l'interrupteur et les prises de courant disposés sur le palier présentent les mêmes dégradations. Ils sont majoritairement fondus et ont de très légères traces de combustion. De plus, quelle que soit la hauteur, la sollicitation thermique est identique comme le montre l'évolution temporelle de la température tracée dans le tableau 221. Par conséquent, il en est déduit que, pour un même élément, une sollicitation thermique identique mène aux mêmes dégradations. Ici, une exposition de 400 s à plus de 150 °C, température de transition vitreuse du polycarbonate, avec un maximum de 225°C, température de fusion, sera caractéristique des dégradations constatées.

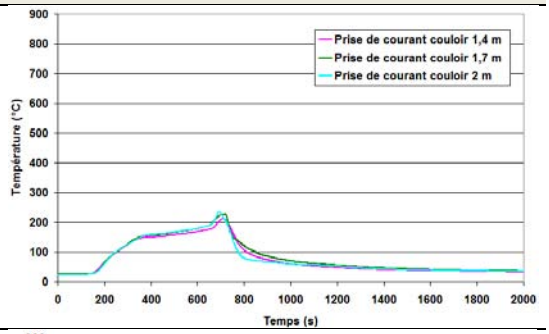
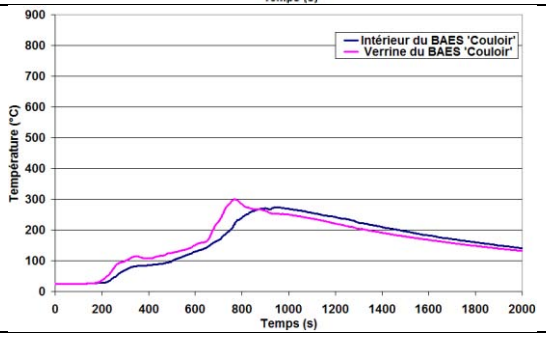
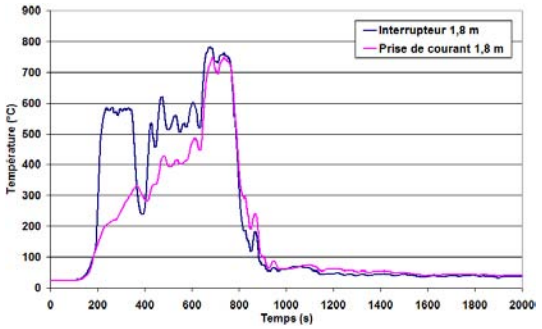
Le bloc autonome d'éclairage de sécurité disposé sur le palier a été soumis à des températures supérieures à 200°C pendant plus de 800 s avec un maximum de 300°C. Il a été très dégradé, mais des parties restent pourtant encore peu endommagées comme le circuit imprimé par exemple qui n'a d'ailleurs pratiquement pas été déformé. Ce n'est par contre pas le cas de la vasque et de la partie fixe du bloc autonome d'éclairage de sécurité qui ont fondu et présentent des traces de carbonisation.

Lors de cet essai, il était prévu que les éléments disposés dans le couloir ne soient exposés ni aux flammes du foyer du volume recréé, ni aux effets de leur rayonnement mais uniquement à une sollicitation thermique provenant des fumées. Cependant au moment où la trappe de désenfumage située au dernier étage de la cage d'escalier a été actionnée pour faciliter l'intervention des sapeurs pompiers, un effet cheminée a été créé qui a augmenté la quantité de comburant disponible pour le foyer, intensifié la combustion du foyer et l'énergie dégagée et déplacé le front de combustion en direction de l'escalier : la température au niveau du palier de l'étage a alors augmenté brusquement de 500°C. Lors de la définition du protocole expérimental, ce phénomène qui a engendré les

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

conséquences décrites, n'a pas été prévu ; c'est pourquoi, il sera envisagé sur les expériences suivantes de réaliser des simulations avant les essais afin d'estimer les niveaux thermiques atteints et ainsi, de positionner les éléments à exposer en fonction de ces niveaux.

En complément de cet essai dans le volume recréé, un feu au pied de la cage d'escalier desservant cet appartement du troisième étage a été réalisé. Des prises de courant, le bloc autonome d'éclairage de sécurité et les interrupteurs placés aux mêmes endroits ont été exposés sans avoir été endommagés environ 3min30 à des températures supérieures à 70°C avec un maximum de 80°C ; aucune trace de fusion et encore moins de combustion ne sont visibles ce qui est cohérent avec une température de transition vitreuse de 150°C pour le polycarbonate.

	Nature et emplacement de l'élément exposé	Photo après l'essai	Nature des dégradations	Sollicitation thermique
Carbonisation superficielle	Prise de courant placée à 2 m sur le palier		Entièrement déformée, partiellement fondue et présente de très légères traces de combustion	
	Bloc autonome d'éclairage de sécurité placé à 1,9 m sur le palier		Entièrement fondu et présente des traces de combustion	
Carbonisation en profondeur	Interrupteur placé à 1,8 m dans la chambre		Entièrement carbonisé	
	Prise de courant placée à 1,8 m dans la chambre		Entièrement carbonisée	

221. *Synthèse des essais de la rue Boinod*[24]

[24] L'ensemble des mesures expérimentales est disponible en annexe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En conclusion, les températures atteintes lors de ces essais ont été soit trop élevées soit trop faibles pour obtenir des déclinaisons de fusion ou de déformation susceptibles d'être réellement exploitables. Seules les prises de courant implantées dans le couloir pour lesquelles une température maximale de l'ordre de 250°C est atteinte, donnent des résultats concrètement exploitables. En reconsidérant à posteriori la puissance de la source et la distance du foyer à laquelle sont disposés les éléments, il est logique que ceux fixés dans le volume recréé ne pouvaient apporter plus d'informations que celles qui ont été recueillies lors de l'analyse. De façon générale, les températures atteintes aux différentes hauteurs ont été trop homogènes pour engendrer des déclinaisons de déformation. Dans de futurs essais, il conviendra donc d'implanter les éléments de manière à obtenir des niveaux de sollicitation thermique mieux étagés. Cela passe en particulier par une meilleure évaluation de la puissance du foyer pour estimer des distances d'éloignement minimales par rapport à la source. Pour l'évaluation de ces distances, des simulations informatiques pré-essais sont la solution envisagée.
Pour la mesure des températures à relier aux dégradations, le choix d'implanter les thermocouples directement au contact des matériaux a été fait. Pour plusieurs raisons, cela ne s'est pas avéré optimal. Pour commencer, lorsque que le matériau sur lequel le point de mesure est fixé commence à fondre lorsqu'il en a la faculté, il est impossible dans l'interprétation des données collectées, de situer la transition d'une mesure de température du matériau à celle de l'ambiance thermique. Disposer un thermocouple à côté de l'élément exposé est donc une solution plus raisonnable pour l'exploitation des données expérimentales. Ce choix est d'ailleurs cohérent avec l'utilisation qui est faite par la suite des données récoltées qui permettent de relier une sollicitation thermique à un point de comparaison, ce dernier étant la base de la mise en parallèle de la simulation numérique d'un scénario d'incendie avec la scène d'incendie telle qu'elle a été investiguée. Or, les données obtenues par simulation ne sont pas les températures du matériau constituant l'interrupteur, la prise de courant ou le bloc autonome d'éclairage de sécurité, mais la température ambiante à l'emplacement de l'élément. Cela confirme donc le choix dans les futures expérimentations, de placer les thermocouples à côté des éléments exposés.

4.4.3.3.2 Essais du Puy en Velay

À la suite des résultats perfectibles obtenus sur les essais réalisés dans un immeuble de la rue Boinod, il a été décidé de poursuivre l'exposition à un incendie réel d'éléments d'usage courant du type prise de courant, interrupteur et bloc autonome d'éclairage de sécurité. En effet, même si peu d'informations ont été collectées sur ces essais à cause d'une disposition des éléments qui ne s'est pas révélée optimale, elles se sont cependant montrées encourageantes.

Les nouveaux essais se sont déroulés en parallèle d'une campagne expérimentale visant à évaluer l'efficacité d'un système de protection par brouillard d'eau sur les conditions d'évacuation de personnes par les parties communes d'un immeuble situé au Puy en Velay. Pour cela, plusieurs configurations de protection ont été testées pour les trois scénarios suivants :

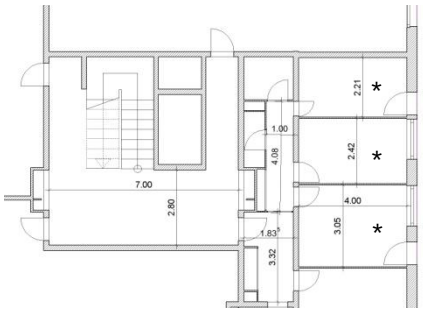
- Potentiel calorifique en pied de cage d'escalier
- Feu d'appartement enfumant la cage d'escalier
- Feu de cave avec protection au niveau de la circulation menant au rez-de-chaussée

L'immeuble à usage d'habitation accueillant les essais est établi sur neuf étages et un niveau de sous-sol (cf. photo 222). Chaque étage comporte quatre appartements et est desservi par un unique escalier, non encloisonné (cf. plan 224). Parmi les trois scénarios expérimentés, celui utilisé pour solliciter thermiquement les éléments est le feu d'appartement. Le potentiel calorifique lors de ces essais est constitué d'un matelas de mousse de polyuréthane haute densité (1,4 x 2,0 x 0,16 m^3) surélevé du sol au moyen de six palettes, d'un fauteuil cible en mousse sur cadre acier, de parois combustibles en contreplaqué de faible épaisseur (quatre panneaux de 2,0 x 1,20 x 0,005 m^3), de petits éléments mobiliers type tables de chevet, d'un plancher en bois (trois à quatre panneaux de particules 2,0 m x 0.9 m), d'une moquette en polyester et enfin d'un ensemble informatique complet (clavier, écran et unité centrale) (cf. photo 223). Ce potentiel calorifique est disposé dans l'une des trois pièces repérées par un astérisque * sur le plan 224. L'intervention des pompiers débute 20 min après l'allumage réalisé soit au moyen d'un bac d'alcool de petite contenance inséré sous le matelas, soit grâce à un chalumeau ou un allume-feu disposé sur la face supérieure du matelas.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

222. *Vue de l'immeuble*

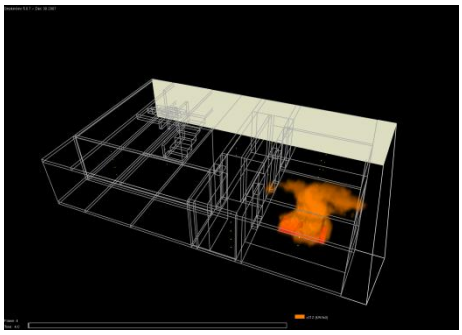
223. *Potentiel calorifique*



224. *Plan d'étage : cage d'escalier et appartement test*

Les éléments à exposer ont été récoltés dans les appartements de l'immeuble ; les prises de courant et les interrupteurs ont en majorité été installés lors de la construction du bâtiment datant d'une trentaine d'années environ. En comparaison des matériaux constituant les éléments prélevés, ceux testés en laboratoire (cf. § 4.4.3.1) ont nettement évolué : les prises de courant sont passées de thermodurcissables à thermoplastiques et les interrupteurs d'une combinaison de thermoplastiques et de thermodurcissables à uniquement thermoplastiques. Les résultats collectés sur ces expériences sont donc difficilement comparables avec ceux obtenus en laboratoire.

Pour placer les éléments dans des zones où ils seront exposés à des températures susceptibles d'engendrer des déclinaisons de déformations, des simulations numériques en amont des essais ont été réalisées. Ainsi, un ou plusieurs murs pour installer les éléments sont recherchés, murs au niveau desquels des températures comprises pendant plusieurs minutes entre 80 (température de transition vitreuse de l'ABS) et un maximum de 530 °C (température d'auto-inflammation du polycarbonate) sont souhaitées expérimentalement. À l'emplacement à déterminer, une stratification thermique est également désirée. Il faudrait enfin que les éléments ne soient pas exposés directement au contact des flammes du foyer



225. *Vue Smokeview de la géométrie des lieux, obtenue avec FDS*

Trois des chambres de l'appartement ainsi que son couloir, le palier de l'étage et une partie de l'escalier ont été modélisés à l'aide de FDS (cf. image 225). Des sorties de températures en fonction du temps ont été demandées dans des plans placés dans la longueur du couloir de l'appartement, de chacune des chambres, du palier et de l'escalier et aux quatre hauteurs de 1 m, 1,4 m, 1,8 m et 2,2 m en deux verticales de chaque chambre, du couloir et du palier. Les flux thermiques incidents sur les parois solides, les températures des parois solides et des isosurfaces de températures (150, 200, 250, 300 et 350°C) complètent les sorties demandées.

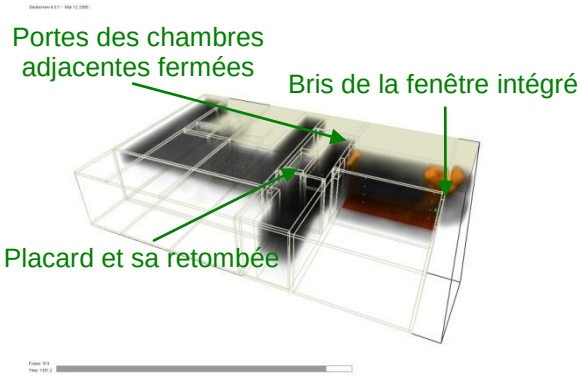
Dans un premier temps, cinq calculs ont été effectués avec des foyers ayant des puissances de 1000 à 5000 kW avec un incrément de 1000 kW pour une surface de feu de 2 m par 1 m. Les simulations ont été réalisées porte et fenêtre de la chambre foyer ouvertes et porte des chambres adjacentes également ouvertes ce qui correspondait au protocole expérimental initial. Celui-ci ayant été ensuite largement modifié, les résultats de ces simulations ne sont disposés qu'en annexe. Par rapport à ces simulations, le protocole expérimental définitif impose que la fenêtre de la chambre foyer soit fermée tout comme les portes des autres chambres de l'appartement (cf. image 226).

Les caractéristiques de la simulation définitive réalisée en amont des essais sont les suivantes :

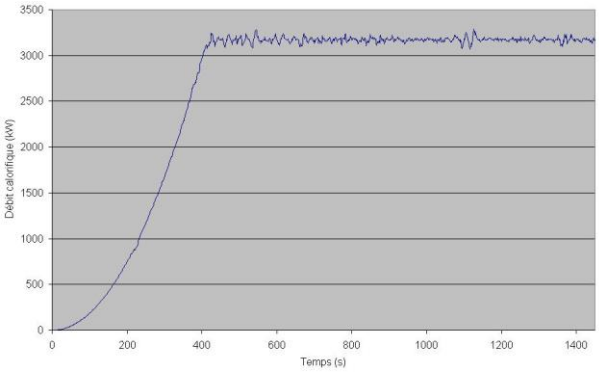
- Le débit calorifique imposé est de 3 200 kW. Ceci est une évaluation maximale en fonction du combustible disposé dans la chambre et la surface des ouvertures.
- Le débit surfacique imposé est de 700 $kW.m^{-2}$ sur une surface de 4,6 m^2 (cf. graphique 227)
- Le débit surfacique imposé suit une courbe de montée en puissance en αt^2 (cf. graphique 227)

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

- Les fenêtres se brisent lorsque la température ambiante dans son très proche voisinage atteint 400°C. Ceci n'est pas la méthode la plus réaliste pour simuler le bris d'un vitrage car l'inertie du matériau dans sa montée en température n'est pas prise en compte. De plus, il a été constaté que pour ce type de fenêtres, le bris thermique du double vitrage se produit à une température similaire à celle de la ruine de l'huisserie PVC. Le phénomène n'est donc pas simple à simuler. Cependant, comme il est spéculé que les températures maximales à l'étage devaient être obtenues avec la fenêtre de la pièce du foyer ouverte et que pratiquement seule l'étude de ces températures maximales atteintes est intéressante, ce choix de température de bris de vitrage parait être le plus judicieux.



226. *Vue Smokeview après bris des vitrages de la simulation de l'essai*

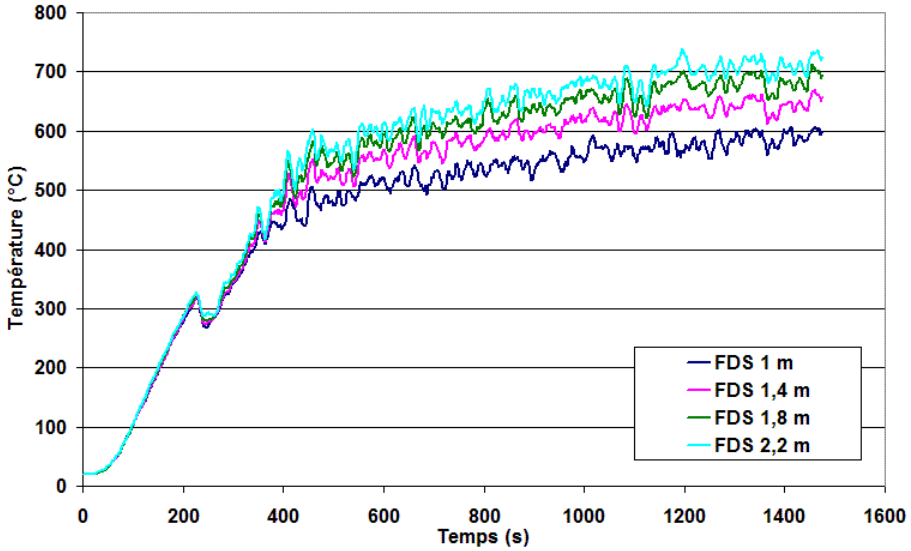


227. *Débit calorifique en fonction du temps calculé par FDS*

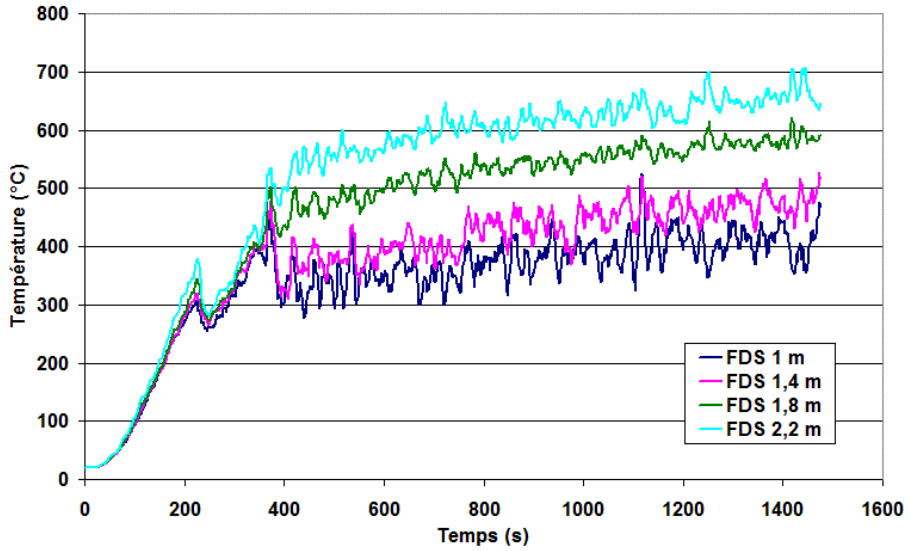
Dans la simulation, avec les températures de bris de vitre considérées, elles disparaissent à 229 s pour la plus large et 381 s pour la seconde. Le débit calorifique imposé est alors respectivement à 31 et 84 % de sa valeur maximale ; la première vitre se brisant alors que le débit calorifique est encore assez faible, le foyer ne se retrouve jamais sur cette simulation, dans des conditions de feu sous-ventilé.

Les températures à l'entrée ou au fond de la chambre foyer sont très largement supérieures à celles recherchées pour disposer les éléments à exposer (cf. graphiques 228). Lorsque le feu est établi, les valeurs maximales sont comprises entre 600 et 700 °C à l'entrée de la chambre et entre 400 et 680 °C près de la fenêtre. De plus, comme pour les essais de la rue Boinod, les flammes du foyer auraient eu un effet destructeur prépondérant sur la dégradation des éléments, par rapport à ceux imputables à la convection. Sur le palier, les températures maximales atteintes à 2,2 m sont de 65 °C et sont nettement inférieures à celles souhaitées. Dans le couloir de l'appartement, les températures sont comprises entre 200 °C à 1 m du sol et 500 °C à 2,2 m. Cela semble être l'emplacement à privilégier pour exposer les éléments ; les températures à 1 m sont supérieures à celles désirées, mais comme une stratification thermique est obtenue avec un fort gradient thermique, (les températures variant en moyenne de 30°C tous les 10 cm) cela n'est pas incompatible avec une disposition des prises de courant et des interrupteurs à des hauteurs inférieures à 1 m.

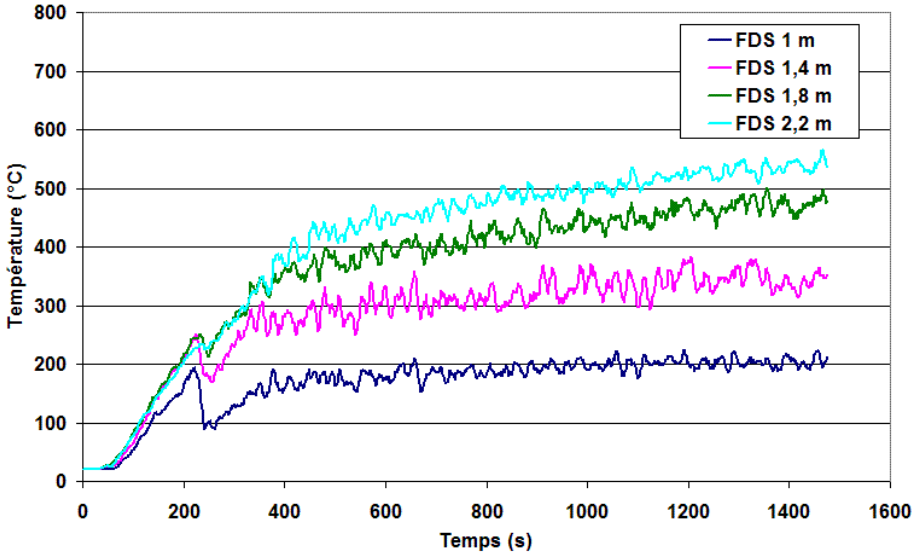
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



Température à l'entrée de la chambre foyer

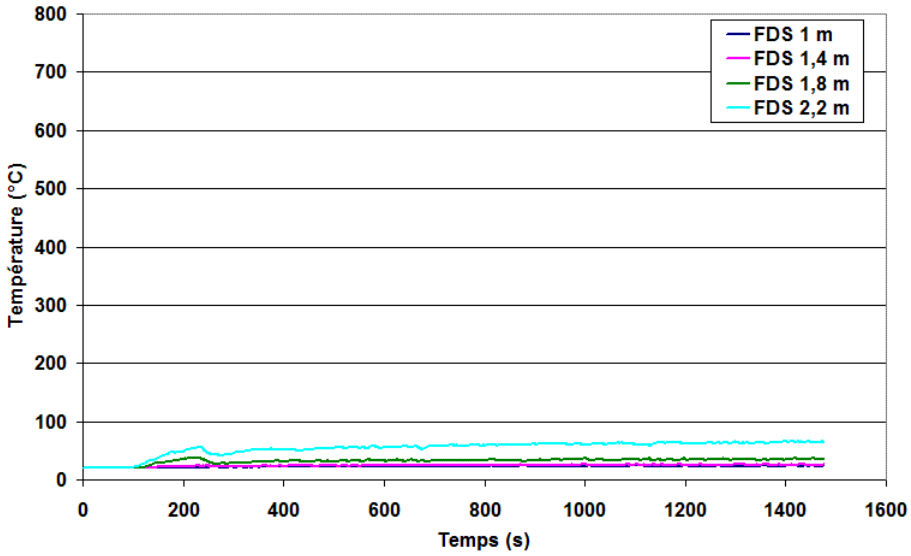


Température au fond de la chambre foyer



Température dans le couloir de l'appartement

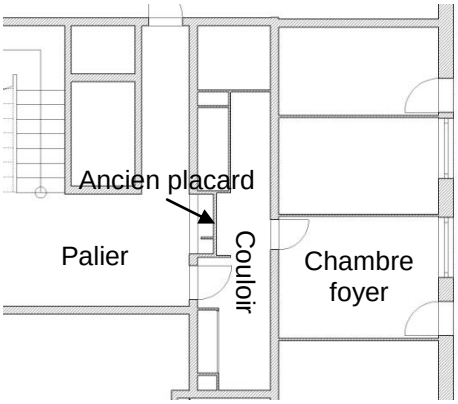
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



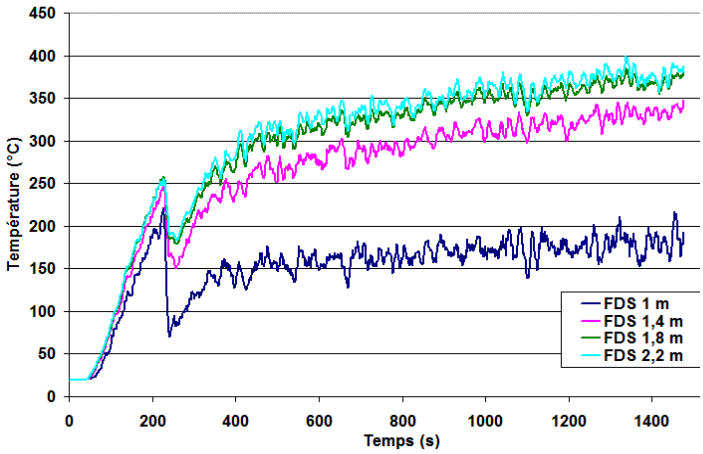
Température sur le palier de l'appartement

228. *Température en fonction du temps pour la simulation numérique en amont de l'expérience*

Pour bénéficier d'une surface sur le mur suffisamment élevée pour exposer l'ensemble des éléments à disposition, il a été choisi de les implanter dans l'ancien placard, situé en face de la chambre contenant le foyer (voir le plan 229). À cet emplacement, les températures maximales atteintes d'environ 400 °C sont inférieures d'une centaine de degrés à celles du couloir et les températures à 1,8 m sont à quelques degrés près égales à celles à 2,2 m. Cela s'explique par un effet de cantonnement des gaz chauds par la retombée verticale en partie haute du placard.



229. *Emplacement sur le plan, des éléments à exposer*



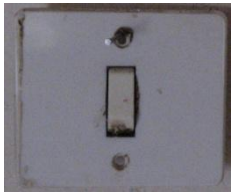
230. *Température à l'emplacement des éléments à exposer*

Lors de la campagne expérimentale précédente (cf. § 4.4.3.3.1), la température des matériels était directement mesurée en fixant un thermocouple contre une face interne de l'élément exposé. Cette démarche est la plus intéressante car il est plus facile de lier les grandeurs physiques mesurées aux données bibliographiques telles que des températures de fusion ou de transition vitreuse ainsi qu'aux dégradations thermiques constatées. Cette mesure de température ne prend pas en compte l'inertie thermique de matériel. Cependant, comme la nature exacte des matériaux constituant les éléments et par conséquent leurs caractéristiques physiques ne sont toujours pas connues, il n'est pas facile de comparer ces mesures thermiques avec un résultat de température d'élément solide simulé avec FDS. C'est pourquoi, pour ces nouveaux essais, des mesures aérauliques récoltées à l'aide de thermocouples placés à une même hauteur à proximité de l'élément testé ont été choisies. Les dégradations observées sont reliées aux températures mesurées et à celles calculées directement par FDS.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

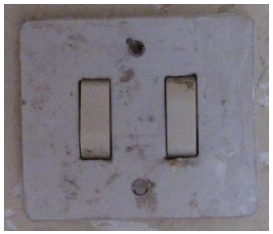
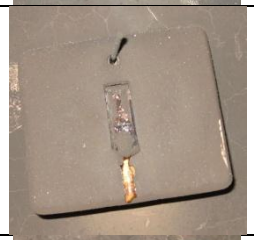
Sur la semaine consacrée à l'expérimentation, quatre essais ont fourni des résultats exploitables parmi les nombreuses configurations des scénarios testés. Le détail de ces résultats est uniquement disponible en annexes car sur plusieurs essais, les sollicitations thermiques sur les éléments ont mené à des dégradations identiques, c'est pourquoi seule une synthèse est présentée dans le tableau 231. Dans ce tableau, T représente la température mesurée lors de l'essai au point de mesure le plus proche de l'élément exposé et t le temps.
Pour un élément, une sollicitation thermique du type 110°C<T<170 °C pendant Δt=200 s et 150°C<T<170 °C pendant Δt=90 s équivaut à dire que l'élément est resté exposé 200 secondes environ à des températures comprises entre 110 et 170 °C et 90 s environ entre 150 et 170 °C. 170 °C est la température maximale à laquelle est exposé l'élément. Il est soumis à des températures supérieures à 110°C pendant 200 s et le reste de l'essai, elles sont inférieures.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

	Nature et position	Photo avant l'essai	Photo après l'essai	Dégradation observée	Exposition
Aucune dégradation	Interrupteur 1			Aucune dégradation	T_{max} < 30 °C Δt=1 200 s
Aucune dégradation	Interrupteur 2 1,8 m dans la circulation			Se situait dans la partie basse des fumées stratifiées dans la circulation. Aucune dégradation n'est constatée.	T_{max} < 45 °C Δt=1 200 s
Dégradation légère	Interrupteur 3 2,2 m dans la circulation			Se situait dans la partie haute des fumées stratifiées dans la circulation. Très légèrement noirci en surface.	T_{max} < 45 °C Δt=1 200 s
Dégradation légère	Interrupteur 4 1 m			Jauni. Pas de déformations	110°C < T < 170 °C Δt=200 s 150°C < T < 170 °C Δt=90 s
Dégradation légère	Interrupteur 5 1,4 m			Noirci par les fumées. Bouton poussoir très proche d'afficher des déformations. Des cloques apparaissent à la surface de l'enjoliveur.	250°C < T < 340 °C Δt=245 s

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

	Interrupteur 6 1 m			Les boutons ont commencé à noircir et à se déformer. La zone inférieure de l'enjoliveur est noircie et les premières dégradations sont légèrement visibles. La zone supérieure est quant à elle plus endommagée et sa structure présente les premières dégradations surfaciques menant à une structure cassante. Cette exposition est l'état intermédiaire entre carbonisation superficielle et dégradation légère	190°C < *T* < 320 °C Δt=470 s 250°C < *T* < 320 °C Δt=200 s 100 s + 100 s
Carbonisation superficielle	Interrupteur 7 1 m			L'enjoliveur est légèrement carbonisé en surface et le bouton a commencé à fondre.	250°C < *T* < 500 °C Δt=275 s
	Interrupteur 8 1,4 m			Le bouton a fondu et coulé vers la partie inférieure de l'interrupteur mais est encore visible dans son ensemble. L'enjoliveur est noirci, légèrement carbonisé et la structure de la surface est dégradée.	250°C < *T* < 500 °C Δt=550 s
	Interrupteur 9 2,2 m			Enjoliveur noirci par les fumées mais très peu carbonisé. Bouton poussoir légèrement fondu	290°C < *T* < 365 °C Δt=250s
profondeur	Interrupteur 10 1,8 m			Enjoliveur noirci par les fumées et matériau plastique carbonisé : il devient fragile, craquant. Le bouton est fondu et commence à couler.	305°C < *T* < 400 °C Δt=245s

Carbonisation en	Interrupteur 11 2,2 m			Les boutons ont fondu et ont totalement disparu. L'enjoliveur est déformé, noirci et carbonisé en profondeur. Il présente une structure cassante.	250°C < *T* < 500 °C (au minimum) Δt=1 110 s
	Interrupteur 12 1,8 m			Un bouton a fondu et a totalement disparu. Une très petite partie fondue du premier est encore visible. L'enjoliveur est déformé, noirci et carbonisé profondeur. Il présente une structure cassante et des fissures sont apparentes.	250°C < *T* < 600 °C Δt=1 200 s

231. *Synthèse des dégradations remarquables sur les éléments exposés lors de l'ensemble des essais*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les essais ont permis d'observer une déclinaison de déformations sur les éléments ; ils ont été mieux disposés que sur les essais de la rue Boinod et c'est une conséquence positive de l'utilisation de la simulation numérique en amont des expérimentations.

Cela pourrait sembler une lapalissade, cependant, après les essais, les matériaux n'ayant subi aucune dégradation suite à l'exposition à un sinistre apportent des informations ; la première étant que les températures de dégradation n'ont jamais été atteintes, ou alors que le temps d'exposition à une température pouvant entraîner des dégradations est insuffisant. Une sollicitation thermique maximale <température – temps> atteinte localement est donc déduite de ce type d'observation. Les trois premiers interrupteurs présentés dans le tableau récapitulatif n'atteignent jamais des sollicitations thermiques susceptibles de les dégrader : les températures restent inférieures à 45°C sur la totalité de l'essai c'est-à-dire pour un temps d'exposition supérieur à 10 minutes. Cependant, il est important de noter que les interrupteurs 2 et 3 permettent de renseigner sur la position de la couche de fumée, stratifiée lors des essais sur le palier de l'appartement. En effet, celui qui est placé à 2,2 m, directement dans la couche de fumée est légèrement noirci et présente un léger dépôt de suie, ce qui n'est pas le cas du second, fixé à 1,8 m. L'interrupteur 4 est le dernier interrupteur du tableau récapitulatif à n'avoir aucune dégradation. Comme l'interrupteur 3, il est possible d'observer un changement de couleur de son enjoliveur, cependant il n'est pas noirci suite à un dépôt de suie, mais jaunie suite à l'action thermique qu'il a subit. Ce jaunissement de l'élément est à relier avec des températures atteintes proches des températures de dégradation.
Malgré des températures très supérieures aux valeurs théoriques susceptibles de provoquer des déformations des matériaux plastiques, le bouton poussoir de l'interrupteur 5 est seulement dans un état à la limite de la déformation ; quant à l'enjoliveur, sa surface est cloquée. Cela met en avant une inertie thermique importante de l'élément ; le temps d'exposition est un critère qui se révèle important car la déformation d'un élément est loin d'être instantanée, une fois les températures de fusion des matériaux plastiques atteintes voire largement dépassées. Cet interrupteur 5 est le premier élément à avoir été déformé. Par rapport aux éléments 1 à 4, les températures d'exposition sont supérieures pour l'élément 5. En effet, elles sont deux fois plus élevées (170°C pour 340°C) pour des temps d'exposition du même ordre de grandeur, à savoir 200 s et 245 s.
La dégradation de l'interrupteur 6 par rapport au 5, tout comme celle du 8 par rapport au 7, met une nouvelle fois en avant, les conséquences du temps d'exposition sur la dégradation des éléments. De plus à l'aide de ces quatre éléments, il est noté que les dégradations sur l'enjoliveur nécessitent beaucoup plus de temps que celles sur le bouton poussoir pour être visibles, et donc évaluées à posteriori. Ceci est dû à la nature du plastique, celui de l'enjoliveur étant un thermodurcissable en opposition au thermoplastique des boutons poussoirs. Un thermodurcissable n'a réellement que deux températures de référence exploitables : sa température de dégradation à laquelle il commence à perdre de la matière, et sa température d'auto-inflammation.
Les interrupteurs 5 et 7 ont été exposés à des températures supérieures à 250 °C sur des temps très proches (245 et 275 s). Cependant, la température maximale d'exposition de 500°C pour le 7 qui est supérieure de 160°C à celle du 5, explique les dégradations supérieures au niveau des boutons poussoirs et des enjoliveurs : l'importance de la température maximale d'exposition est ainsi mise en avant sur cet essai.
Les interrupteurs 9 à 11 ne font que confirmer ce qui est évoqué pour les éléments 5 à 8.

Les premiers essais sur des expérimentations à échelle réelle de la rue Boinod ont permis d'appréhender les difficultés qu'il était possible de rencontrer lors de l'exposition d'éléments à une sollicitation thermique afin d'obtenir des déclinaisons de déformation. À la suite de ces essais, un choix a été fait sur la méthode de mesure de température, une mesure aéraulique étant préférée pour les futurs essais à celle effectuée directement sur le matériau. Par rapport aux essais de la rue Boinod, la complexité pour analyser les températures mesurées s'est nettement allégée lors du traitement des données enregistrées au Puy en Velay car il n'est plus nécessaire de déterminer l'instant où le thermocouple n'est plus en contact avec le matériau suite à sa déformation ou sa fonte. De plus, pour positionner au mieux les éléments, il a été décidé à la suite des premiers essais de la rue Boinod, de procéder à des simulations numériques en amont des essais ; le bénéfice évident peut être constaté par la déclinaison de déformations obtenu sur les interrupteurs et les prises de courant exposés.
Par rapport aux expériences en laboratoire, l'exposition d'éléments lors d'essais réels a permis d'estimer la complexité d'utilisation de la méthode des points de comparaison pour valider un scénario d'incendie. En laboratoire, la nature exacte des matériaux utilisés et par conséquent leurs caractéristiques physiques, sont parfaitement connues. Une des conclusions du paragraphe 4.4.3.1

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

est que l'interprétation correcte d'une dégradation est largement facilitée par la connaissance des températures caractéristiques des matériaux. Lorsqu'ils sont récents, la collecte d'informations est relativement facile, mais dès que les éléments ont plusieurs dizaines d'années, les fabricants ne sont pas toujours capables de communiquer la nature des matériaux utilisés pour la fabrication et la détermination de leurs caractéristiques ne peut être faite qu'avec des essais complémentaires. De plus, la sollicitation thermique en laboratoire se résume facilement à une exposition au-dessus d'une température limite pendant un temps donné ; lors des essais réels, les conditions expérimentales étant moins maîtrisées, les variations de température ne se font pas de manière croissante et il n'est pas toujours simple d'extraire une sollicitation thermique synthétique. Cependant, ces essais réels permettent d'observer l'ensemble des phénomènes menant à une dégradation. En laboratoire, avec le dispositif mis en place, la sollicitation thermique est uniquement faite en plongeant l'élément à tester dans une atmosphère dont la température augmente ; les aspects de transfert d'énergie comme le rayonnement ainsi que le dépôt de suie sont par exemple totalement inexistants et ils ne peuvent être occultés pour mettre au point une méthode dans une démarche d'investigation post-incendie basée sur l'interprétation des dégradations sur les points de comparaison. Il en est de même avec l'essai au cône calorimètre et le rayonnement pur sans réelle convection de gaz chauds.

En conclusion, d'autres essais sur des feux réels sont nécessaires, en privilégiant une étude en amont par simulation numérique pour déterminer la meilleure position des éléments à exposer ainsi qu'une mesure aéraulique des températures plutôt qu'au contact direct du matériau. Cependant, les interrupteurs et les prises de courant exposés ne devront plus être uniquement des éléments collectés sur place car leurs températures caractéristiques sont difficiles à obtenir. Il faudra également des matériels récents parfaitement connus pour pouvoir lier les essais en laboratoire avec ceux du Puy en Velay car les éléments testés pour les essais en labo n'étaient pas les mêmes que ceux utilisés pour les expériences en conditions réelles du Puy en Velay et de la rue Boinod.

4.4.4 Applicabilité des points de comparaison pour la validation de scénarios d'incendie

4.4.4.1 Nouveaux essais à développer

La présente étude se révèle positive pour l'application de la méthode des points de comparaison mettant en œuvre des éléments d'usage courant du type prise de courant, interrupteur électrique et bloc autonome d'éclairage de sécurité. Cependant, certaines difficultés subsistent. Les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en avant un mode définitif d'analyse des expositions : plus d'importance doit-elle être accordée au rayonnement direct du foyer des flammes du foyer, à la température maximale, au temps d'exposition au-dessus d'une température critique de dégradation ou alors à une combinaison de ces deux derniers paramètres ? Il est donc essentiel de compléter ces essais dans des conditions réelles par de nouveaux tests en laboratoire dont les conditions expérimentales d'exposition des éléments seront mieux maîtrisées. Ces essais devront confirmer que lorsqu'un même élément est soumis plusieurs fois à une exposition identique, une répétitivité des dégradations est constatée. Lors de ces essais, il sera également important d'étudier si deux sollicitations thermiques <temps – température> différentes mènent à un même état de dégradation. Ce dernier point a déjà été observé sur les essais réalisés au Puy en Velay, mais devront cependant être confirmés. Il sera primordial que le dispositif d'essai ne soit pas uniquement basé sur du rayonnement, ou de la convection comme sur les essais déjà menés en laboratoire mais soit une combinaison de ces deux sollicitations, voire même couplée à la reproduction d'un dépôt de suies.
Le meilleur dispositif expérimental pour réaliser ces essais est une étuve de 1 m^3 environ, pouvant atteindre des températures de 600°C avec une augmentation de ces températures plus ou moins rapide car l'application brutale d'un flux n'est pas réaliste. Une fois équipé de ce dispositif, il faut exposer un élément à une même température sur plusieurs durées. Ceci permet de quantifier l'effet du temps d'exposition : à partir de combien de secondes au-dessus de la température théorique de dégradation, l'élément commence effectivement à être endommagé, quel est l'effet de la masse du matériau ou de son épaisseur sur le temps de dégradation, etc.. Il faut ensuite, sur une même durée d'essai, exposer un élément à diverses températures pour confronter par exemple les dégradations, aux températures de dégradation théoriques.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

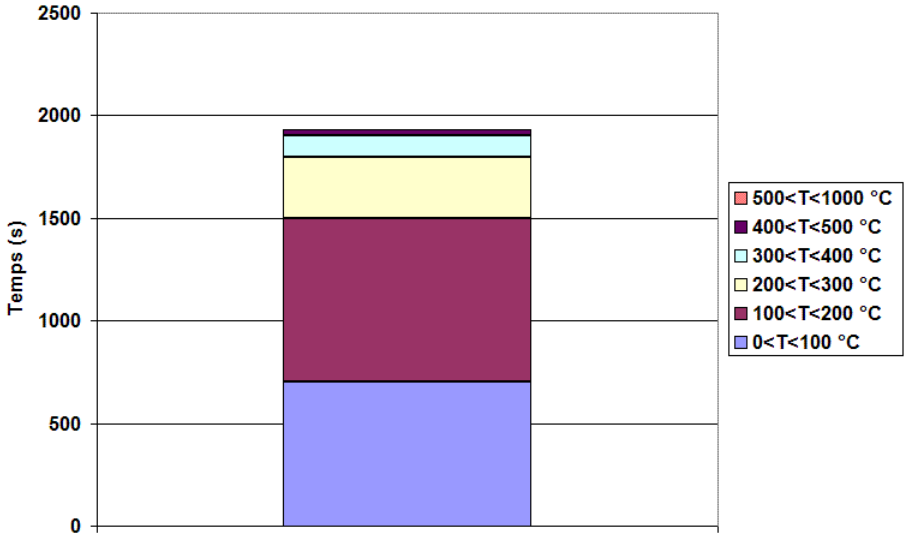
Il serait également intéressant d'évaluer l'importance de l'effet chimique dans la dégradation du point de comparaison. Un test à envisager serait de soumettre un échantillon à un flux de produit de combustion et d'analyser l'agression résultante sur le matériau.

4.4.4.2 Moyen d'utilisation des points de comparaison

Avant de débuter, tout travail expérimental complémentaire pour qu'il soit réellement efficace, devra être pensé dans l'objectif d'application de la méthode des points de comparaison. Il doit donc débuter par une mise en place de critères de dégradation qui sont soit évalués visuellement, soit mesurés. Un interrupteur est par exemple considéré comme déformé, si des points de son enjoliveur ont bougé de moins de 1 cm. Au-dessus de 1 cm, l'élément est classé fondu. D'autres critères comme ceux qui ont été mis en évidence dans les études de la rue Boinod et du Puy en Velay peuvent déjà être définis. Ces critères serviront par la suite, à établir un catalogue de dégradation pour un élément donné et à relier les valeurs des sollicitations thermiques obtenues par simulation à l'emplacement d'un point de comparaison, aux dégradations observées sur un sinistre. Ce catalogue se présente sous forme de tableau (cf. tableau 232[25]).

Interrupteur réf 120	0-100 °C	100-200°C	200-300°C	300-400°C	…
0-60 s	Pas de déformation	Changement de couleur	Déformation légère	Carbonisation en profondeur	…
61-120 s	Pas de déformation	Déformation légère	Carbonisation superficielle	Carbonisation en profondeur	…
121-180 s	Pas de déformation	Carbonisation superficielle	Carbonisation superficielle	…	…
…	…	…	…	…	…

232. *Catalogue des déformations d'un élément en fonction de la sollicitation thermique <temps - température>*



233. *Cumul des températures en une sortie FDS*

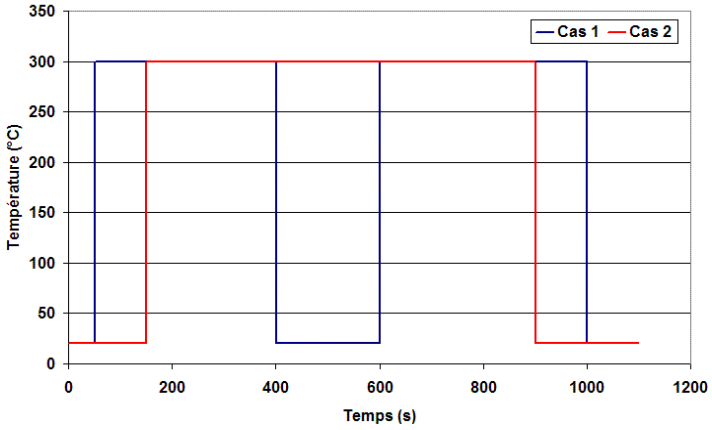
Une fois le catalogue des déformations établi, diverses méthodes d'exploitation des sorties en température des simulations numériques aux points de comparaison sont envisageables. Les temps d'exposition peuvent être mis en relation avec les températures en utilisant des histogrammes comme cela est montré dans le graphique 233. Ainsi, en utilisant le catalogue, il est par exemple possible de conclure que les expositions à $0<T<100$°C ne mènent à aucune dégradation, donc cette partie de l'histogramme est négligeable, quel que soit le temps d'exposition.

Au contraire, les expositions à $300<T<400$°C entraînent une carbonisation en profondeur de l'élément, quelle que soit la durée d'exposition ; les autres températures sont alors négligeables pour cet élément. Etc.. Cette méthode ne prend par contre pas en compte les variations de température ; c'est

[25] Les informations qui y sont renseignées sont fictives

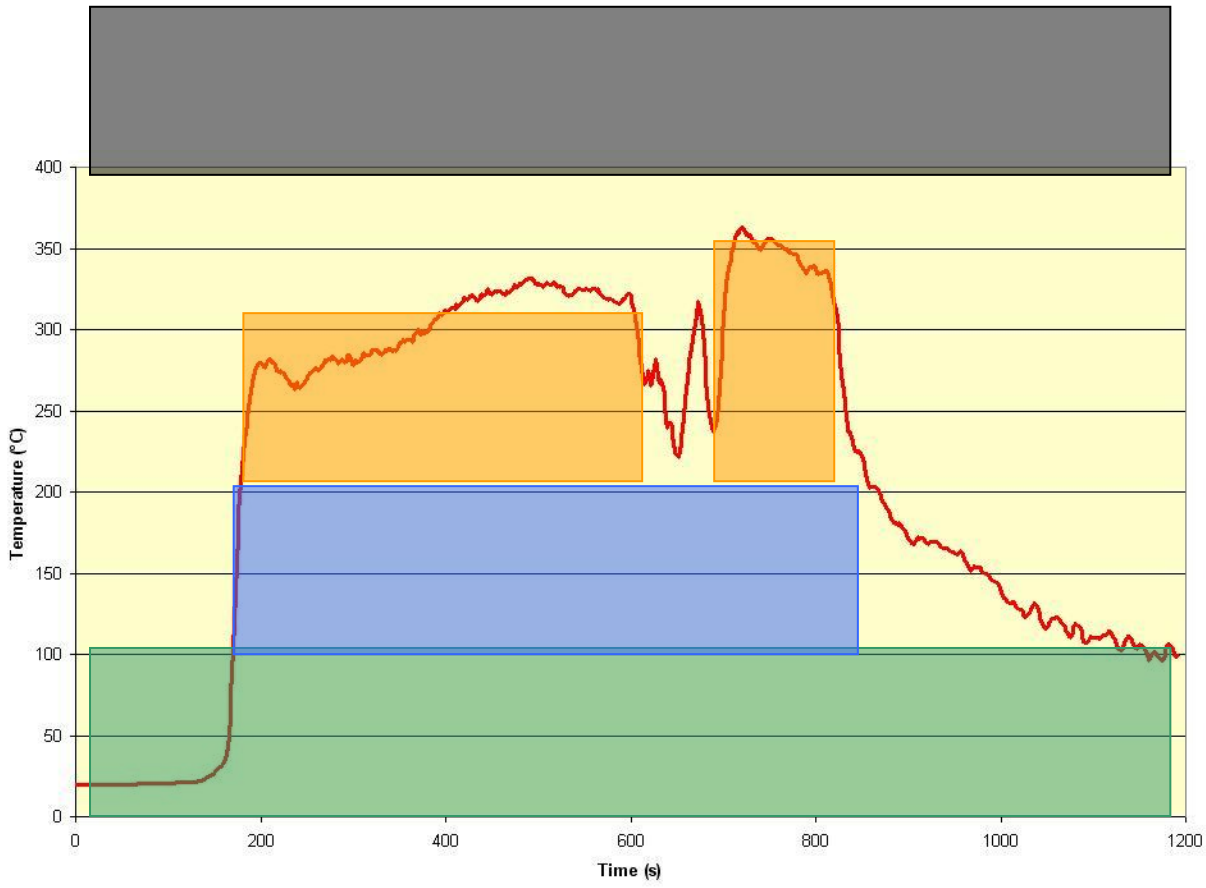
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

un cumul sur un temps total d'exposition. En effet, soumettre un élément aux températures présentées dans le graphique 234, mène à un cumul identique des expositions pour les deux cas alors que le matériau peut s'être suffisamment refroidit entre 300 et 320 s sur l'exposition « cas 2 » pour que l'élément n'affiche pas de dégradations en fin d'incendie.



234. *Exemple d'exposition d'un élément*

La seconde méthode d'exploitation des sorties en température des simulations, moins rapide et plus complexe que celle qui vient d'être présentée, mais qui prend en compte l'évolution temporelle de l'exposition, se base sur un raisonnement surfacique de la sollicitation thermique en s'appuyant toujours, sur le catalogue de dégradation.



235. *Traitement graphique de l'exposition FDS d'un élément en utilisant des données catalogue*

Pas de déformations
Carbonisation
Fonte
Trace de combustion

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les aires tracées sur le graphique 235, de surface égale au temps d'exposition *Δt* à un intervalle de température, multiplié par cet intervalle de température *ΔT* se basent sur les données obtenues grâce au catalogue. En effet, les expériences complémentaires auront permis de collecter les informations nécessaires pour déterminer si l'exposition d'un élément à l'intervalle de température *ΔT* pendant un temps *Δt*, mène à sa fonte, sa déformation, ou à toute autre dégradation. La méthode consiste ensuite à repérer dans la sortie FDS de température en fonction du temps à l'emplacement du point de comparaison, quelles combinaisons de sollicitations thermiques du type *Δt x ΔT* lui correspondent mieux. Et enfin, il suffit de comparer la dégradation du point de comparaison à celle déduite de la simulation.

4.4.4.3 Difficultés dans l'utilisation des points de comparaison

La comparaison des résultats des essais menés au Puy en Velay présentés dans ce document à ceux déjà effectués en laboratoire est rendue difficile par un changement de la nature des matériaux utilisés pour fabriquer les éléments. Les interrupteurs produits actuellement sont en majorité fait d'ABS et/ou de PP ; ce sont deux matériaux thermoplastiques qui vont donc en premier lieu se déformer et fondre lorsqu'ils sont soumis à des températures supérieures à la température de transition vitreuse, puis brûler. Or, sur les essais réalisés au Puy en Velay, il apparaît que les enjoliveurs des éléments fabriqués il y a une quarantaine d'années étaient faits à partir de matériaux thermodurcissables. Nous avons donc été confrontés pour les essais, comme les investigateurs le seront sur une scène d'incendie, à une première difficulté due à la détermination de la nature d'un matériau. Une méthode fiable et rapide pour connaître rapidement la famille de plastique utilisé doit être mise en œuvre. Elle pourrait par exemple se baser sur la couleur de la flamme lorsque le matériau est attaqué à l'aide d'une flamme nue (Voir le test de Belstein et le tableau sur les caractéristiques des flammes lors de la combustion de matières plastiques en annexe).
Si des essais complémentaires sont effectivement souhaités, une difficulté rencontrée concerne l'acquisition d'éléments d'usage courant utilisés dans des bâtiments équipés il y a quelques dizaines d'années. S'il n'y a aucune possibilité de prélèvement d'élément directement à proximité du sinistre, aucun test en laboratoire ne sera effectué, en complément, pour caractériser le matériau s'il n'est pas déjà dans le catalogue. L'association d'une sollicitation thermique à un point de comparaison sera alors beaucoup moins précise.

Actuellement, l'évaluation des dégradations sur les éléments d'usage courant lors de nos tests ne s'est appuyée que sur des observations visuelles : la fonte d'un matériau, le changement apparent de la structure d'un enjoliveur sur sa face externe, un changement de couleur, … Cette évaluation des dégradations est certainement trop subjective pour être appliquée dans un cadre général de reconstitution d'incendie. À l'heure actuelle, seules les personnes ayant participé à l'étude expérimentale sont susceptibles d'utiliser les données récoltées. Par conséquent, il serait intéressant de se pencher sur une évaluation des dégradations plus quantifiables en s'appuyant par exemple sur une profondeur de carbonisation pour un matériau thermodurcissable, un changement chimique du plastique des prises de courant ou des interrupteurs, etc. … Le changement d'état des métaux constituants ces mêmes prises de courant ou interrupteurs est une solution qui est souvent proposée, en particulier par des personnes travaillant dans le domaine de l'électricité. Il est vrai que les alliages en cuivres/laiton par exemple, subissent des transformations de phases quand ils sont soumis aux effets thermiques d'un incendie. Ces transformations sont observables facilement en disposant du matériel adéquat et elles peuvent ensuite être reliées à une température maximale d'échauffement. Cependant, cet indicateur de température maximale atteinte localement, ne sera jamais comparable à un résultat de simulation. En effet, les parties métalliques des prises de courant par exemple, ne sont jamais directement exposées aux effets thermiques du foyer. Pour connaître à partir des sorties FDS une température d'exposition du métal, un calcul de transfert d'énergie par conduction à l'intérieur de l'élément devrait être réalisé. Cela n'est pas envisageable car il y aurait beaucoup trop d'incertitudes dans les résultats obtenus, dues aux simplifications et aux hypothèses faites pour mettre en équation ce transfert thermique dans une géométrie complexe ainsi qu'aux erreurs commises sur l'évaluation des caractéristiques thermomécaniques des matériaux. Sur les essais du Puy en Velay, l'exposition d'éléments plastiques à des températures supérieures à 600 °C n'aurait pas apporté d'informations supplémentaires car le matériau plastique brûle lorsqu'il atteint de tels niveaux ; ces éléments d'usage courant atteignent alors leur limite d'utilisation comme cela a été observé sur la rue Boinod. C'est pourquoi il serait intéressant d'étudier également de nouveaux éléments (matériaux de construction ou d'isolement, verrerie, etc..) qui permettraient d'évaluer des températures supérieures à 600°C.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

4.5 Conclusions

Pour être correctement effectuée, une investigation post incendie demande des observations qui aident à repérer dans les traces de l'incendie, celles qui permettront à l'expert de remonter jusqu'à l'origine et la cause de l'incendie. Pour interpréter ces traces, l'investigateur s'appuie en partie sur son expérience, mais également sur un raisonnement scientifique. De nos jours, il est demandé par les autorités judiciaires que l'argumentaire de l'expert soit de plus en plus étayé et justifié. Avec le développement actuel des codes de calcul, l'une des solutions pour le compléter est le recours à la validation de scénarios par la simulation numérique. L'utilisation de ces nouveaux outils s'est déjà révélée indispensable pour comprendre des phénomènes scientifiques inattendus, des propagations imprévues du foyer ou encore pour privilégier un scénario d'incendie par rapport à un autre. Le LCPP propose de s'appuyer sur ces études positives déjà menées pour étendre cette méthode de validation de scénarios d'incendie grâce à l'outil de simulation numérique. L'un des points faibles de ces études est le manque de méthode clairement définie de comparaison des résultats des simulations numériques aux scènes d'incendie. En complément d'une comparaison de la dynamique de l'écoulement simulé par rapport à celui interprété à partir des constations post incendie, le LCPP propose de systématiser pour évaluer la validité d'un scénario simulé, l'utilisation de points de comparaison, un effet thermique, mécanique ou chimique remarquable sur un matériau. De ces points de comparaison, une sollicitation thermique est associée et c'est cette dernière qui sert de base à la comparaison du scénario simulé par rapport à celui déduit de l'investigation. En multipliant les sollicitations thermiques concordantes aux points de comparaison, le scénario est validé d'un point de vue thermique. La difficulté dans cette méthode est justement de relier à un point de comparaison une sollicitation thermique ; les données bibliographiques sont assez rares et pas toujours représentatives des conditions d'incendie. C'est pourquoi des essais en laboratoire et lors de feux réels ont été réalisés pour les compléter. Les résultats obtenus sont encourageants quant à l'applicabilité des points de comparaison pour valider un scénario d'incendie. Mais pour que cela soit utilisé de façon systématique, le catalogue de point de comparaison doit être maintenant complété avec les pistes proposées dans le présent travail.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5 Application à des cas réels

Dans le chapitre 3, des conditions optimales d'utilisation de FDS ont été recherchées pour une application en investigation post-incendie. Des critères de taille de maille à respecter ont par exemple été déterminés, tout comme des stratégies de raffinement du maillage. Les conclusions obtenues vont être appliquées dans ce chapitre à deux cas réels.
Le premier est la combustion d'un matelas en mousse polyuréthane. Cette étude a été envisagée pour évaluer le modèle de pyrolyse de FDS ainsi que pour appréhender les difficultés des changements d'échelles entre les essais préliminaires au cône calorimètre et les tests à échelle réelle.
Le second cas est la confrontation de différents scénarios simulés à une scène d'incendie selon la méthode qui a été développée dans le chapitre 4.

5.1 Combustion d'un matelas en mousse polyuréthane

Dans le chapitre 4, il a été mis en avant l'importance que les aspects temporels ont dans les processus d'investigation post-incendie. En effet, certaines hypothèses sont parfois écartées par l'investigateur si le développement temporel du feu dans le scénario considéré ne correspond pas aux informations collectées lors de l'investigation (témoignage, feu couvant, sensibilisation de la détection incendie, …). Le recours à la simulation numérique peut donc être envisagé pour aider à répondre à des interrogations portant sur le développement temporel de l'incendie. Il est par conséquent essentiel d'évaluer la capacité de simulation par FDS du développement du foyer lors des premières minutes d'un feu.

L'étude expérimentale du développement d'un foyer revient à s'intéresser à l'évolution temporelle du débit calorifique dans l'ensemble du domaine concerné. Cette information est rarement disponible dans une investigation.
Dans FDS, plusieurs méthodes existent pour simuler le débit calorifique d'un foyer. La première consiste à imposer directement en donnée d'entrée des valeurs de débit massique de combustible. FDS calcule ensuite une évolution du débit calorifique en fonction de l'influence de paramètres externes telle que la quantité d'oxygène disponible. Les hypothèses, les simplifications et les choix faits pour imposer ce débit de combustible dépendent directement des compétences et de l'expérience de l'utilisateur. Celui-ci peut par exemple choisir d'utiliser des valeurs collectées expérimentalement. Si le combustible et le régime de combustion sont identiques dans l'expérience et la simulation, cette méthode est la plus précise. Mais la réalisation des essais reste souvent coûteuse et, par conséquent, les données ne sont pas toujours disponibles. Il faut souvent extrapoler des valeurs à l'échelle 1 à partir d'essais à plus petites échelles.

Lorsqu'aucune donnée expérimentale n'est disponible, l'utilisateur peut estimer le débit calorifique en utilisant des corrélations semi-empiriques. Le développement de l'incendie est alors grossièrement séparé en trois phases : sa croissance, sa stabilisation à une valeur constante et sa décroissance (voir le chapitre 2). Les courbes de croissance les plus fréquemment utilisées sont les standards NFPA [ALPERT 2002] reliant le débit calorifique au temps par l'équation (60) (cf. graphique 236). Le coefficient α_c associé à des familles de combustible peut prendre plusieurs valeurs. La référence en définit quatre[26] selon la nature du combustible et la rapidité de leur croissance.

$$\dot{Q} = \alpha_c t^2 \qquad (60).$$

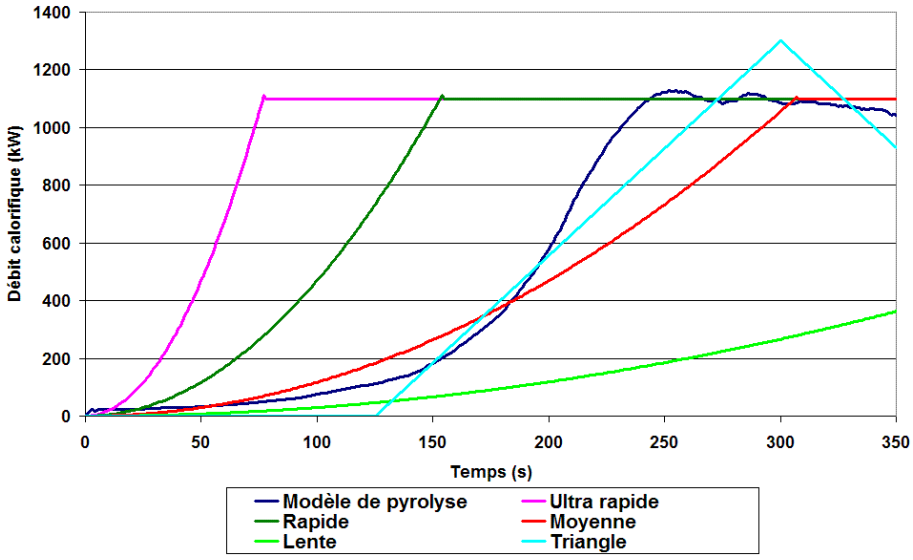
[26] Le coefficient α_c peut prendre les valeurs suivantes :
- Une courbe ultra rapide correspond par exemple aux feux de paille ou encore d'alcool : α_c=187,60 W.s^{-2}
- Une courbe rapide correspond par exemple aux feux de meubles rembourrés : α_c 46,90 W/s^{-2}
- Une courbe moyenne correspond par exemple aux feux de bois : α_c=11,72 W/s^{-2}
- Une courbe lente correspond aux feux très lents : α_c=2,96 W/s^{-2}

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Le calcul du débit calorifique imposé sur le palier de stabilisation est généralement basé sur une vitesse surfacique critique de combustion ou un débit calorifique surfacique. La décroissance commence lorsqu'une majorité du combustible a été consommée (généralement de 70 à 80 % de la masse initiale de combustible).

D'autres corrélations existent pour estimer le débit calorifique. Pour les meubles rembourrés, Babrauskas propose par exemple une approximation triangulaire de ce débit [BABRAUSKAS 1985, 1992] (cf. graphique 236).

Cependant, il n'est pas toujours facile pour l'utilisateur de choisir parmi l'ensemble des corrélations celle qui correspond le mieux à la source calorifique à représenter. Il ne dispose également pas toujours des données expérimentales suffisantes. C'est pourquoi, il parait parfois plus judicieux de calculer le débit calorifique avec FDS en utilisant un modèle de pyrolyse, en particulier celui mis au point à partir des travaux d'Atreya [ATREYA 1984], et par la suite amélioré par Ritchie et al. [RITCHIE 1997]. Pour l'utiliser, les propriétés du matériau à modéliser, comme sa masse volumique, son enthalpie de combustion, sa température d'inflammation, etc. [McGRATTAN 2006], sont imposées comme données d'entrée. FDS calcule ensuite par lui-même le débit calorifique résultant de la combustion en phase gazeuse des matériaux pyrolysés.



236. *Débit calorifique obtenu par la simulation de la combustion d'un matelas comparé aux courbes en αt^2 de la NFPA et à la courbe triangulaire [BABRAUSKAS 1985]*

L'usage d'un modèle de pyrolyse permet d'obtenir des évolutions de débits calorifiques plus complexes et moins schématiques que celles obtenues avec des corrélations. Par exemple, sur le graphique 236 sont tracés les débits calorifiques de la combustion d'un matelas fournis par FDS. Pour l'un des cas, le modèle de pyrolyse est utilisé ; la stratégie de simulation pour l'obtenir est décrite par la suite au paragraphe 5.1.2. Pour quatre autres cas, les débits imposés comme données d'entrées sont calculés à partir des courbes NFPA. Pour la phase de croissance, chacun des quatre cas utilise l'une des valeurs du coefficient α. Le débit du palier est déterminé en reliant l'enthalpie de combustion, le débit surfacique critique de perte de masse et la surface maximale du matelas susceptible d'être enflammée. La phase de décroissance considérée comme linéaire débute lorsque les deux tiers environ de la masse du combustible ont été consommés. La dernière courbe utilise l'approximation triangulaire de Babrauskas. Il est alors possible de remarquer que, malgré la simplicité de la corrélation de Babrauskas et l'absence de stabilisation du débit calorifique, son utilisation donne une valeur proche de celle calculée avec le modèle de pyrolyse. Pour les courbes NFPA, le coefficient α généralement associé dans la littérature aux meubles rembourrés correspond à une croissance rapide. Or, par rapport au calcul avec le modèle de pyrolyse, une courbe de croissance moyenne semble mieux adaptée pour les 180 premières secondes environ. Une croissance rapide est ensuite plus proche du débit calorifique calculé par le modèle de pyrolyse. Cet exemple illustre les difficultés que l'utilisateur rencontre lorsqu'il doit choisir parmi l'une des corrélations existantes celle qu'il utilisera comme donnée d'entrée de FDS pour calculer le débit calorifique.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Au regard des résultats reportés sur le graphique 236, en particulier les différences observées au niveau de la vitesse de croissance, il parait intéressant d'évaluer les résultats fournis par un calcul FDS utilisant le modèle de pyrolyse car cela permet de :

- Réduire l'influence directe de l'utilisateur sur le débit calorifique. Lorsque des corrélations sur la croissance du foyer sont utilisées, cette dernière est imposée par la corrélation choisie. À l'opposé, les choix sur les données matériaux utilisées par le modèle de pyrolyse ont également un impact sur le débit de pyrolyse, mais il est indirect sur la vitesse de croissance.
- Lorsque le modèle de pyrolyse est utilisé, l'environnement de l'incendie agit sur le débit massique de pyrolyse et par conséquent le débit calorifique. La quantité d'oxygène disponible, la température des matériaux, le rayonnement des parois, etc. modifient le débit calorifique. Ce n'est pas le cas lorsqu'un débit calorifique est spécifié directement comme donnée d'entrée : le débit massique de combustible est toujours identique à celui imposé quel que soit l'environnement de l'incendie. Il peut donc être supposé que le modèle de pyrolyse tend à reproduire plus précisément le développement de l'incendie et donc son évolution temporelle. Par contre, il faut se rappeler que les résultats obtenus avec le modèle de pyrolyse sont très sensibles aux valeurs choisies pour les données d'entrée.

Le but de ce paragraphe n'est pas de démontrer que le modèle de pyrolyse de FDS reproduit correctement et en détails la physique de la combustion des matériaux, mais d'étudier si le modèle de pyrolyse peut être utilisé afin de simuler convenablement le développement d'un incendie. Il a été vu précédemment (voir le chapitre 3) que les résultats calculés en utilisant ce modèle de pyrolyse sont très sensibles à la finesse du maillage ainsi qu'à la puissance du brûleur utilisé pour initier la combustion. Dans la suite de ce paragraphe, deux expériences vont être simulées pour étudier la propagation d'un foyer. Le maillage et le débit calorifique du brûleur d'allumage seront identiques sur ces simulations. Le combustible de ces deux expériences est un matelas en mousse polyuréthane. Il a été choisi car, pour les incendies étudiés par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police, il est très fréquent de découvrir que l'origine d'un feu se situe sur un élément de mobilier constitué de mousse d'ameublement, comme par exemple sur un lit, un canapé ou encore un fauteuil. Les incendies étudiés dans le cadre de cette thèse rentrent d'ailleurs, en majorité, dans cette catégorie. Il paraît donc important, pour la reconstitution numérique de ces sinistres, de s'attacher à reproduire correctement l'allumage de ces foyers ainsi que leur développement lors des premiers instants suivant l'allumage.

La validation du modèle de pyrolyse implémenté dans FDS ne peut pas être faite directement sur le débit calorifique. En effet, aucune installation expérimentale qui aurait permis de le mesurer à l'échelle 1 n'était disponible. Pour les mêmes raisons, il n'a pas été possible de travailler sur la perte de masse de la mousse. C'est la vitesse de propagation des flammes sur le matelas mesurée dans des essais à l'aide de thermocouples judicieusement placés qui sert à vérifier la précision des résultats du modèle de pyrolyse. La démarche envisagée pour évaluer le modèle de pyrolyse est donc une comparaison des vitesses moyennes simulées de propagation du front de flamme à celles obtenues expérimentalement. Comme cela a été montré au chapitre 2, le débit calorifique dépend en partie de la surface en flamme du matelas. Étudier la vitesse de propagation revient donc à étudier l'augmentation de la surface en flamme du matelas et donc l'un des paramètres influençant l'augmentation de débit calorifique. L'étude utilisant les vitesses de propagation se focalise donc sur la phase de croissance du débit calorifique mais occulte celle où le foyer est pleinement développé sur la totalité de la surface du matelas ainsi que la décroissance.

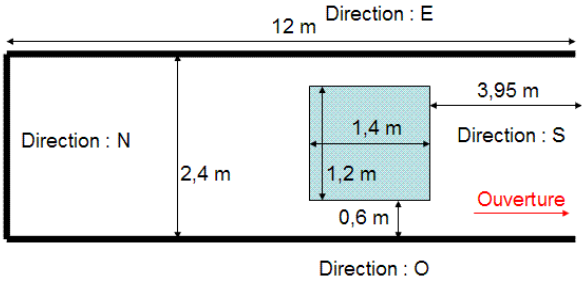
La comparaison des vitesses moyennes simulées de propagation du front de flamme à celles obtenues expérimentalement est réalisée en deux étapes. La première est faite sur une configuration simple. Les données matériaux utilisées par le modèle de pyrolyse sont mesurées ou issues de la bibliographie. Si les valeurs des vitesses moyennes de propagation du front de flamme simulées sont trop éloignées de l'essai, les données matériaux sont corrigées afin de minimiser les erreurs. Dans la deuxième étape, le modèle de pyrolyse de FDS est évalué sur un second cas de géométrie plus complexe avec ces données matériaux optimisées.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.1.1 Expérience dans un caisson de transport maritime

Il a été choisi de réaliser la première étape dans des conditions a priori favorables pour le code de calcul c'est-à-dire un volume correctement ventilé de façon à ce que la combustion soit contrôlée par le combustible sur l'ensemble de l'essai. Un matelas en mousse polyuréthane a été disposé, comme indiqué sur le schéma 238, à l'intérieur d'un caisson de transport maritime (cf. photo 237) sur un support en bois aggloméré élevant le matelas à 20 cm du sol. Les deux portes à l'avant du caisson sont maintenues ouvertes sur l'ensemble de l'essai de façon à ce que la ventilation soit maximale. C'est l'unique ouverture du dispositif expérimental. Les dimensions horizontales du caisson de 2,5 m de haut sont également portées sur le schéma 238.

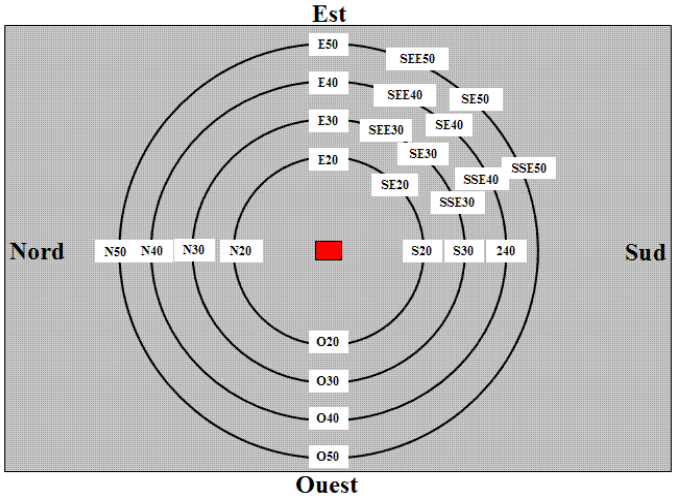
237. *Vue extérieure du caisson de transport maritime utilisé pour la combustion d'un matelas*



238. *Emplacement et dimensions du matelas dans le caisson de transport maritime*

Le matelas de polyuréthane de 16 cm d'épaisseur est allumé par sa face supérieure à l'aide de deux allume-feux cubiques d'environ 10 g chacun. Cette source a été choisie car c'est une méthode d'allumage assez reproductible. Elle a aussi l'avantage de dégager une quantité relativement élevée d'énergie par unité de surface qui permet un allumage rapide par la face supérieure du matelas. Elle correspond donc une sollicitation thermique intense et très localisée reproduisant les premiers instants des incendies qui intéressent les travaux de ce mémoire.

L'objectif de cette expérience est d'étudier le développement du feu en mesurant les vitesses de propagation des flammes à la surface du matelas. Pour cela, des thermocouples sont fixés à l'intérieur du matelas en passant par sa face inférieure après avoir traversé le support en bois aggloméré. Ils sont disposés à 2 cm sous la face supérieure du matelas afin que le rayonnement des flammes ne perturbe pas la mesure de température tant que les thermocouples sont à l'intérieur de la mousse. Vingt-six thermocouples sont divisés en sept groupes alignés dans des directions différentes comme cela est schématisé sur la figure 239. Ils sont placés sur quatre cercles concentriques centrés sur le milieu du matelas. Les rayons de ces cercles mesurent 20, 30, 40 et 50 cm. La surface rouge sur la figure 239 représente la zone d'allumage sur laquelle sont placés les allume-feux.



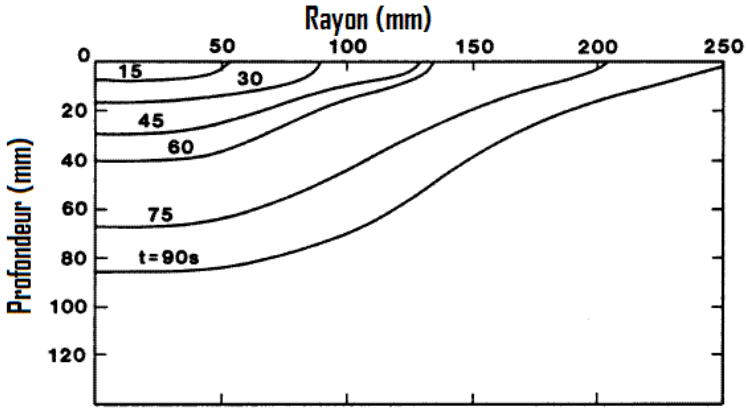
239. *Vue de dessus de la répartition des thermocouples dans le matelas*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Avec des matériaux tels qu'une mousse polyuréthane haute densité, il est observé expérimentalement que la propagation est un phénomène tridimensionnel. Pendant la combustion, le polyuréthane se décompose selon trois mécanismes. Le premier est la formation gazeuse d'isocyanate qui se repolymérise éventuellement en phase gazeuse et se condense. Du polyol est également créé dans une phase liquide et il continue parfois à se décomposer [BEYLER 2002] (voir au chapitre 2 le schéma des changements physiques et chimiques au cours de la décomposition thermique). Ainsi, lors de la combustion du matériau, un creusement de la mousse apparaît sous les flammes et le creux ainsi formé contient, dans une phase liquide, le polyol. Lorsque les flammes se propagent à la surface du matériau, le creux grandit en profondeur et en largeur. Par conséquent, il est légitime de se demander si une distribution bidimensionnelle des thermocouples dans un plan parallèle à 2 cm sous la face supérieure du matelas est suffisante pour capturer la propagation des flammes. La structure des flammes est complexe et elles deviennent distribuées au-dessus du matelas après approximativement 90 s (voir les photos 240 et 241). La base des flammes n'est alors plus située uniquement sur le côté du creux. Sur le graphique 242, l'évolution circulaire et en profondeur en fonction du temps du front de pyrolyse est tracée pour une mousse en polyuréthane allumée en son centre [BABRAUSKAS 1985]. La combustion du matelas y est clairement identifiée comme un phénomène tridimensionnel. De plus, le poids des allume-feux n'étant pas négligeable, ils ont tendances à s'enfoncer dans la mousse en feux en accentuant ainsi l'aspect tridimensionnel de la propagation. Par conséquent, l'agencement des thermocouples ne capture qu'une propagation périphérique à la surface du matelas. Dans la suite de ce paragraphe, c'est donc uniquement cette propagation bidimensionnelle périphérique qui est étudiée pour savoir si FDS la reproduit correctement.

240. *Vues du matelas 90 et 150 secondes après l'allumage*

241. *Détails de la propagation des flammes*



242. *Contours de la zone de pyrolyse d'une mousse polyuréthane allumée en son centre en fonction du temps [BABRAUSKAS 1985]*

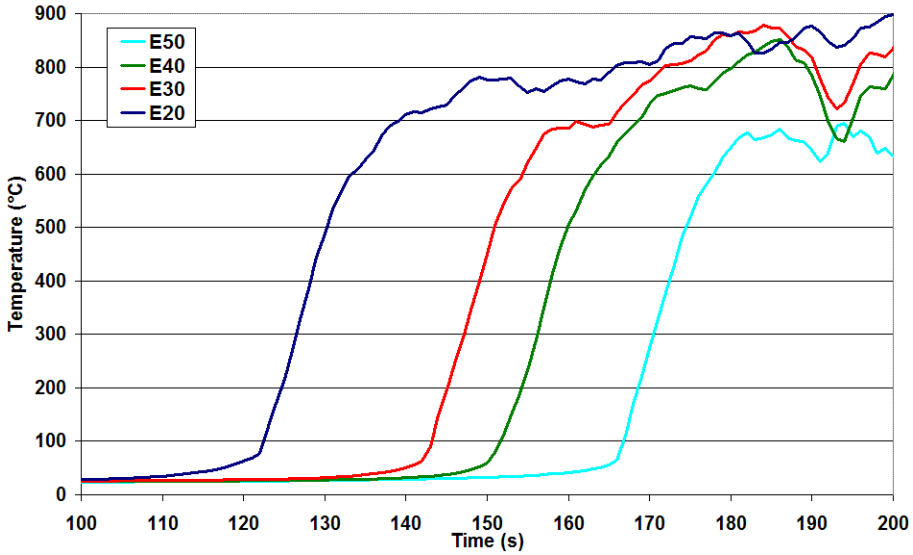
Lors de l'expérience, il a été observé que :

- Après l'allumage, les flammes se propagent relativement lentement et peu de fumées sont dégagées au cours de la première minute d'essai.
- Les fumées commencent ensuite à être visibles dans le panache lorsque les flammes se propagent plus rapidement.

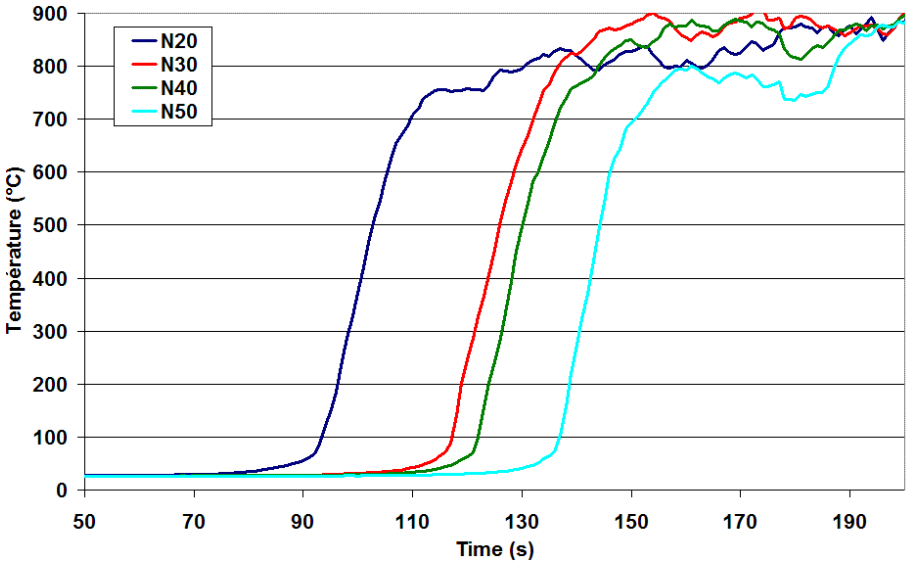
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

- Au début de l'essai, les fumées s'échappent par l'ouverture. Mais, lorsque le feu se développe, une couche de fumées se forme d'abord dans le fond du caisson de transport maritime puis sur toute sa longueur.
- La propagation à la surface du matelas ne semble pas toujours être constante mais plutôt se faire à-coups probablement liés à la fréquence de pulsation des flammes
- Pendant la phase de décroissance du foyer, l'ensemble du matelas a été consommé et le support en aggloméré de bois est seulement carbonisé sur sa face supérieure.

Les températures mesurées dans les directions Est (E) et Nord (N)[27] sont tracées respectivement sur les graphiques 243 et 244. Les pentes des courbes de températures dans la phase de croissance entre 100 et 500 °C y sont identiques pour chaque point de mesure. Ces pentes dépendent de la réponse du thermocouple à une sollicitation thermique et en particulier de leur inertie. Une température de 200°C est choisie arbitrairement entre 100 et 500°C pour déterminer le temps que les flammes mettent pour se propager d'un point de mesure à un autre.



243. *Températures mesurées dans la direction Est (E)*



244. *Températures mesurées dans la direction Nord (N)*

Les valeurs des vitesses moyennes de propagation du front de flamme (cf. tableau 245) mettent en avant un développement du feu sur la surface supérieure du matelas qui n'est pas symétrique. Les

[27] Les températures dans les autres directions sont disponibles en annexes. Leurs allures dans chaque direction sont similaires à celles tracées dans ce paragraphe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

vitesses dans la direction N, à l'opposée de l'ouverture du caisson, sont supérieures d'environ 25%. Le comportement de la propagation des flammes sur un échantillon horizontal peut être prédit par un simple bilan d'énergie à la surface du matériau. En théorie, la vitesse de propagation à la surface d'un matériau homogène est par conséquent identique selon toutes les directions. Les mécanismes contrôlant une propagation sur un échantillon horizontal sont différents de ceux pour un matériau vertical pour lequel ce sont majoritairement le rayonnement des flammes et la convection des gaz de combustion qui sont prépondérants. Cela est une conséquence de la proximité de la flamme avec la paroi verticale et du piégeage des gaz de combustion entre la flamme et le combustible. Pour des propagations horizontales ou vers le bas, la flamme et les gaz de combustions s'élèvent au contraire loin de la surface combustible. Dans la configuration expérimentale d'un matelas brûlant dans un caisson, les effets de convection créent un mouvement d'air frais dissymétrique car l'apport se fait majoritairement de l'ouverture vers le matelas. Ce mouvement d'air a pour conséquence d'incliner légèrement la flamme vers le fond du caisson. La configuration expérimentale dans la direction N peut alors être assimilée à une propagation dans le sens d'un écoulement forcé, proche d'une configuration verticale, pour laquelle les vitesses de propagation des flammes sont plus élevées que dans la direction opposée à l'écoulement. Dans les six autres directions, les vitesses moyennes de propagation du front de flamme sont presque identiques et augmentent de 0,15 à 0,30 cm/s pour des distances comprises entre 20 à 50 cm du centre du matelas. La vitesse moyenne de propagation du front de flamme dépend de la température du matériau. La valeur de la vitesse serait stable sur l'ensemble de l'essai si le rayonnement des flammes vers le matelas ainsi que la conduction thermique étaient constants au cours de l'expérience. Mais, quand le feu se propage, la surface de flamme, c'est-à-dire sa hauteur et le diamètre de la source, augmente et, par conséquent, son rayonnement en direction du matelas augmente également. Ceci est une explication de l'augmentation linéaire de la vitesse moyenne de propagation du front de flamme lorsque le front s'éloigne du point d'allumage.

Les vitesses moyennes de propagation du front de flamme dans les directions latérales E et O sont très proches, surtout sur les quarante premiers centimètres. Cette symétrie peut être considérée comme un indicateur de la bonne qualité des résultats de cette expérience.

Distance/Direction	N (cm/s)	O (cm/s)	S (cm/s)	E (cm/s)	SE (cm/s)	SSE (cm/s)	SEE (cm/s)
20 cm	0,21	0,16	0,15	0,16	0,15		
30 cm	0,25	0,20	0,20	0,21	0,20	0,18	0,20
40 cm	0,32	0,24	0,23	0,25	0,24	0,23	0,26
50 cm	0,36	0,28		0,30	0,28	0,27	0,28

245. *Vitesse moyenne de propagation du front de flamme obtenues expérimentalement dans cinq directions et à quatre distances du centre du matelas*

Les vitesses mesurées dans les directions N, S, E, O, et SE vont être utilisées dans la suite de ce paragraphe pour comparer les résultats expérimentaux avec ceux simulées.

Une description analytique du processus de développement d'un foyer a été menée dans la référence [BABRAUSKAS 1979]. Le modèle pris en compte considère que la propagation initiale du foyer peut être exprimée comme une augmentation de la surface de ce foyer. D'après l'auteur de l'étude, cela est une approximation raisonnable pour de larges surfaces, comme des chaises en matériau rembourré, ou un ensemble d'éléments combustibles, progressivement concernés par l'incendie. Dans ce genre de processus, il est souvent observé que la vitesse à laquelle de nouveaux matériaux commencent à participer à l'incendie est proportionnelle à la quantité brûlant déjà. Cela s'exprime par la relation (61).

$$\frac{dA_{foy}}{dt} = \alpha A_{foy} \qquad (61).$$

En intégrant cette relation de base, l'évolution en fonction du temps de la surface A_{foy} participant à l'incendie est obtenue et s'exprime selon la relation (62) où c_1 et c_2 sont des constantes empiriques.

$$A_{foy}(t) = c_1 e^{c_2 t} \qquad (62).$$

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Il a été trouvé pour de nombreux matériaux que la constante c_2 varie entre 0,003 et 0,03 s^{-1} [FRIEDMAN 1978, HUGGET 1977, PAPE 1977, MIZUNO 1984]. Des valeurs, spécifiques à divers matériaux, sont récapitulées dans la référence [BABRAUSKAS 1979].

Cela est appliqué à l'expérience de la combustion du matelas dans le caisson. La propagation des flammes est supposée circulaire comme cela est généralement observé expérimentalement lors des premières minutes de l'incendie si l'apport en oxygène est identique dans chaque direction. La surface peut alors s'exprimer en fonction du rayon du foyer r_{foy} selon la relation (63). r_{foy} est plus précisément la distance entre le centre du cercle et le périmètre de la surface circulaire de flamme.

$$A_{foy}(t) = \pi r_{foy}(t)^2 \qquad (63).$$

En utilisant l'expression de la surface en fonction du temps donnée par la relation (63), la vitesse v et le rayon r_{foy} s'expriment alors selon les relations (64) et (65).

$$v(t) = \frac{c_1 c_2 e^{c_2 t}}{2\pi r(t)} = \frac{c_2 A_{foy}(t)}{2\pi r(t)} = \frac{c_2}{2} r_{foy}(t) \qquad (64).$$

$$r_{foy}(t) = \sqrt{\frac{c_1}{\pi}} e^{\frac{c_2}{2}t} = r_0 e^{\frac{c_2}{2}t} \qquad (65).$$

Ces relations ne sont pas valables lors des premières dizaines de secondes de propagation du foyer [BABRAUSKAS 1979]. Il est alors supposé, comme cela a été montré dans une étude précédente [MIZUNO 1981], que le rayon du foyer augmente linéairement en fonction du temps sur les premiers instants de la propagation.

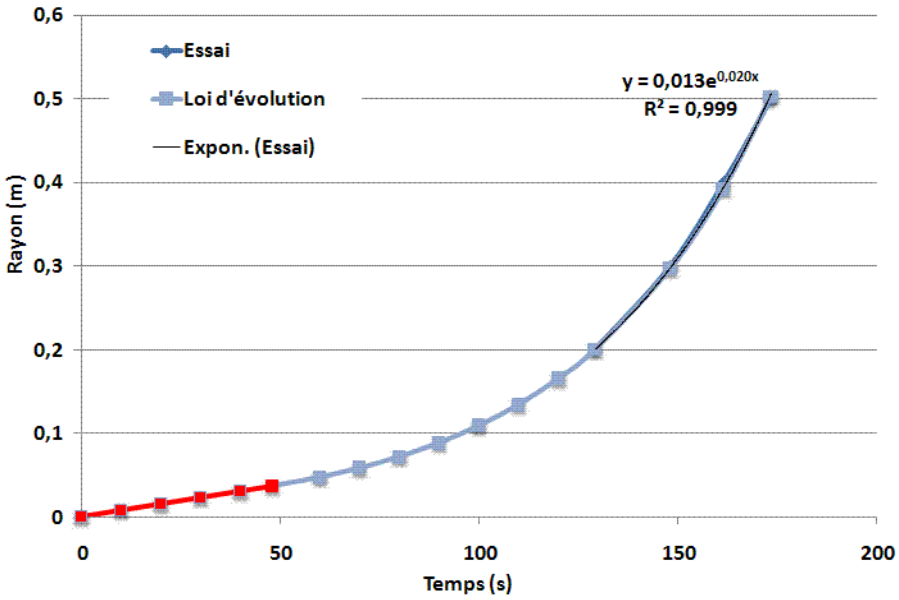
Ces relations sont appliquées sur la moyenne des valeurs expérimentales mesurées dans les directions autres que Nord lors de l'essai de propagation du foyer sur le matelas disposé dans le caisson. La loi suivante d'évolution de rayon r en fonction du temps est déduite :

$$\begin{cases} r_{foy}(t) = 7{,}7 \times 10^{-4} t \quad pour\ t < 48s & (66). \\ r_{foy}(t) = 1{,}36 \times 10^{-2} e^{0{,}0208t} \quad pour\ t \geq 48s & (67). \end{cases}$$

Dans la loi de propagation qui vient d'être établie pour une mousse de polyuréthane, les valeurs des coefficients c_1, c_2 et r_0 prennent respectivement des valeurs égales à 0,058 m², 0,041 s^{-1} et 0,0136 m.
La valeur de c_2 est très proche de celles proposées par Mizuno et al. [MIZUNO 1981] égales à 0,052 et 0,042 s^{-1} pour deux matelas en mousse, sans tissus, mesurant respectivement 0,5 x 0,5 m^2 pour 0,14 m d'épaisseur et 0,9 x 0,9 m^2 pour 0,12 m d'épaisseur.
La valeur de r_0, égale à 0,0136 m, est, quant à elle, plus de deux fois inférieure à celles avancées par Mizuno et al. qui les trouve égales à 0,035 m et 0,04 m selon la taille de l'échantillon testé. Les différences s'expliquent à la fois par les tailles des échantillons, les caractéristiques physiques des mousses et les puissances d'allumage qui changent d'un essai à l'autre.

La loi proposée précédemment est tracée dans le graphique 246. Dans celui-ci, la partie linéaire, c'est-à-dire pour des temps inférieurs à 48 s, est surlignée en rouge.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



246. *Évolution en fonction du temps de la position du front de flamme pour l'expérience, pour la corrélation issue de l'expérience et pour la loi établie à partir des mesures*

L'existence de deux régimes pourrait se justifier par un changement dans les mécanismes qui régissent la propagation. En effet, après 48 s de propagation, la surface enflammée mesure, lorsque que la loi est appliquée, moins de 5 cm de rayon. Il est donc envisagé que la convection et conduction jouent un rôle non négligeable dans les phénomènes de propagation pour des surfaces de flamme de rayon inférieur à 5 cm. Cela ne serait plus le cas pour des rayons supérieurs à 5 cm où le rayonnement thermique des flammes deviendrait le phénomène prépondérant contrôlant la propagation.
Il sera intéressant de vérifier ces hypothèses lors de futures expériences pour lesquelles la surface de la source utilisée pour initier la propagation devra être la plus petite possible pour perturber le moins possible la propagation.

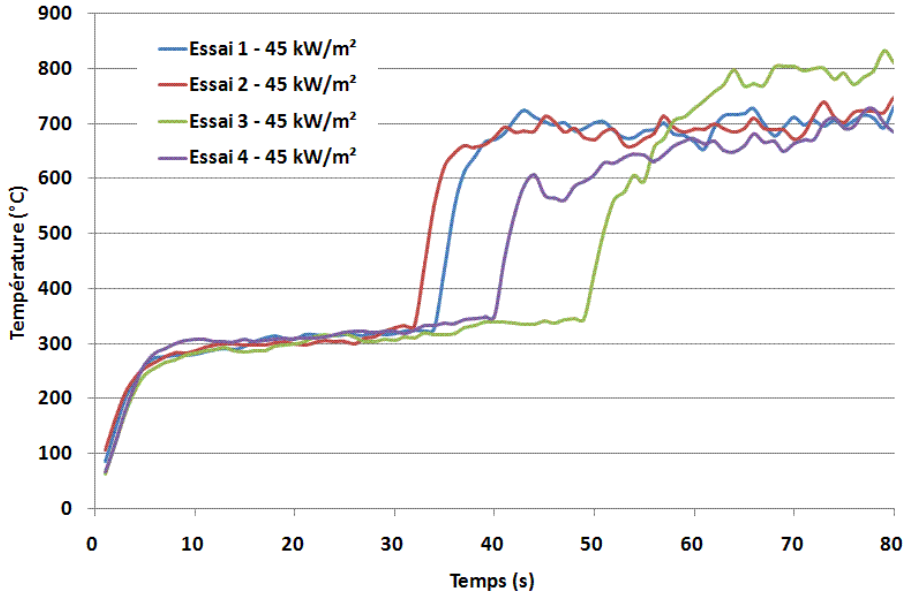
5.1.2 Simulation de l'expérience dans le caisson de transport maritime

Pour simuler, en utilisant le modèle de pyrolyse, l'expérience faite dans le caisson de transport maritime, certaines données d'entrée ont besoin d'être connues. Des essais préalables au cône calorimètre ont été réalisés sur la mousse polyuréthane afin de caractériser la température d'auto-inflammation non pilotée et l'enthalpie de combustion du matériau.
Des échantillons ont été exposés à des flux incidents compris entre 37 et 50 kW/m^2. Le flux critique d'auto-inflammation non-pilotée est de 39 kW/m^2. Au cours des essais, trois thermocouples sont placés à 1 mm environ au-dessus de l'échantillon afin de mesurer la température des gaz de pyrolyse juste avant l'inflammation. La moyenne de ces trois températures est tracée dans le graphique 247 pour quatre échantillons exposés à un flux de 45 kW/m^2. Pendant les 10 premières secondes, les températures augmentent rapidement lorsque les volets de protection du cône calorimètre sont enlevés au début de l'essai et que le matériau et les thermocouples sont exposés subitement au rayonnement. Lors de cette phase, l'inertie du thermocouple a une forte influence sur la dynamique des températures mesurées. La taille des thermocouples a également de l'importance car, selon son diamètre, il captera plus ou moins de rayonnement en provenance de la résistance chauffante. La température atteint ensuite une valeur d'environ 300 °C qui augmente lentement jusqu'à la valeur d'auto-inflammation du matériau. L'auto-inflammation se traduit par les brusques augmentations de température observées entre 30 et 50 s selon l'essai. La température avant l'auto-inflammation est celle des gaz de pyrolyse du matériau et il est considéré qu'elle est égale à celle de la surface du matériau car les thermocouples sont proches de l'échantillon. Avec cette méthode de mesure, l'une des difficultés pour ce type de matériau est d'arriver à maintenir les thermocouples dans les gaz de pyrolyse car la mousse se rétracte très vite dès qu'elle est soumise au rayonnement thermique des

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

résistances chauffantes. Sur ces quatre essais, une température d'auto-inflammation non-pilotée de 340 ± 10 °C est mesurée.

Il n'est pas possible d'affirmer ou d'infirmer que la température d'auto-inflammation non-pilotée du matériau est indépendante du flux radiatif imposé par la résistance chauffante du cône calorimètre. Au contraire, la température d'auto-inflammation non-pilotée mesurée par les thermocouples situés au-dessus de l'échantillon varie clairement avec le flux radiatif. Si un bilan thermique est effectué au niveau de la soudure du thermocouple, une augmentation du rayonnement se traduit par une augmentation de la température mesurée. Cependant, d'après les divers essais effectués, la variation de température est rarement supérieure à 20 °C pour la gamme de flux utilisée pour caractériser ce matériau[28] .

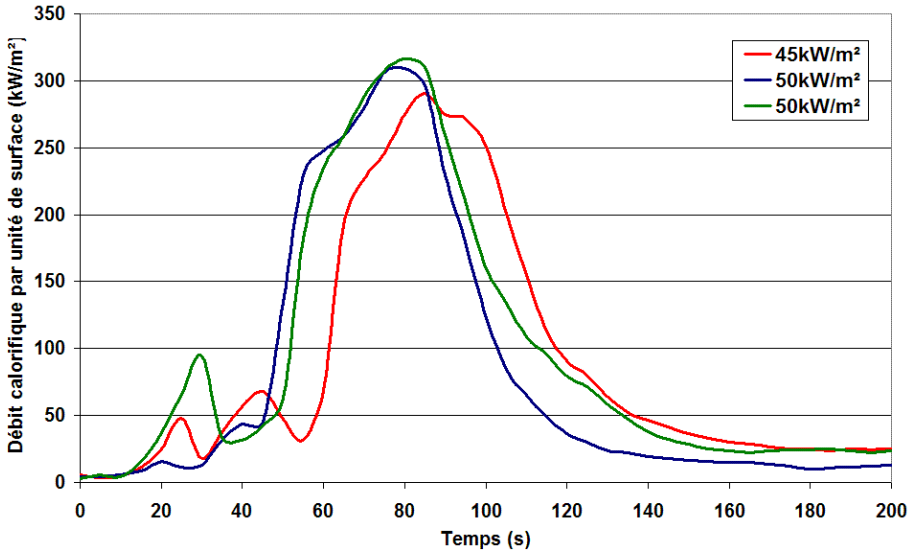


247. *Températures moyennées sur les trois thermocouples placés à 1 mm au-dessus de l'échantillon lors de quatre essais au cône calorimètre à un flux thermique incident de 45 kW/m²*

Le débit calorifique par unité de surface de la mousse polyuréthane a été mesuré avec le cône calorimètre sur trois essais à 45 kW.m^{-2} et trois autres à 50 kW.m^{-2}. Les courbes obtenues pour trois de ces essais sont tracées dans le graphique 248. L'enthalpie de combustion est déduite de ces mesures en intégrant par rapport au temps le débit calorifique par unité de surface entre le début du test et l'extinction des flammes et en ramenant le tout à la masse de l'échantillon. Il est important de noter ici que, pour ce matériau et pour les flux de 45 et 50 kW.m^{-2}, l'extinction des flammes se produit approximativement au même temps, c'est-à-dire lorsque l'ensemble du combustible est consommé. Une enthalpie de combustion de 25 250 kJ.kg^{-1} est ainsi obtenue pour la mousse de polyuréthane à partir des trois essais à 45 et 50 kW.m^{-2}.

[28] Flux variant de 37 à 50 kW/m^2 pour la caractérisation de ce matériau.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



248. *Débit calorifique par unité de surface mesuré avec le cône calorimètre pour trois échantillons*

Dans les travaux de recherches sur la propagation des flammes, la distinction est toujours faite entre les deux hypothèses simplificatrices consistant à considérer un matériau comme thermiquement fin ou alors thermiquement épais. Un matériau thermiquement épais se différencie généralement d'un thermiquement fin par le gradient thermique qu'il présente dans son épaisseur lorsqu'il est chauffé. Selon la référence [BABRAUSKAS 1985], pour les matériaux thermiquement épais, une faible fraction de sa masse est consommée durant la propagation des flammes ; ensuite, la surface qui brûle régresse parallèlement à son plan d'origine. Pour le cas thermiquement fin, le combustible régresse perpendiculairement à son plan d'origine. Le graphique 242 présenté précédemment montre une propagation à la fois dans la profondeur du matelas et sur sa face initialement allumée. Le matelas ne se comporte donc ni tout à fait comme un matériau thermiquement fin, ni comme un matériau thermiquement épais. Son comportement est cependant plus proche du thermiquement épais, c'est pourquoi une conductivité thermique égale à 0,1 $W.m^{-1}.K^{-1}$ est définie pour le polyuréthane utilisé dans les simulations afin qu'une variation de température soit calculée dans la profondeur du matelas. Ne pas définir de conductivité thermique dans FDS force le code à considérer le matériau comme thermiquement fin.
Les autres caractéristiques physiques et thermiques utilisées dans les simulations sont déterminées à partir de bases de données ou de mesures simples comme la masse volumique (voir le tableau 249). Les parois latérales du caisson ainsi que son sol et son plafond sont constitués d'acier.

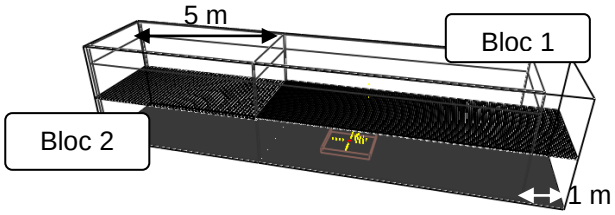
Débit massique maximal	0,034 $kg.m^{-2}.s^{-1}$
Chaleur spécifique	0,3225 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
Masse volumique	40,1 $kg.m^{-3}$
Température d'inflammation	340°C
Enthalpie de combustion	25 250 $kJ.kg^{-1}$
Enthalpie de vaporisation	1 500 $kJ.kg^{-1}$

249. *Caractéristiques du polyuréthane utilisées dans la simulation*

Le brûleur utilisé dans la simulation pour initier la propagation du feu est une surface carrée de 10 cm de côté et un débit calorifique surfacique de 2 222 kW/m^2 y est imposé. L'influence de la puissance de ce brûleur sur la dynamique de l'incendie a été présentée au chapitre 3. Dans ces simulations, un débit calorifique de 22 kW correspond, à quelques kilowatts près, à la valeur minimale pour arriver à propager l'incendie. Comme le feu est contrôlé par le combustible et que les conditions aux limites restent les mêmes sur l'ensemble du calcul, le choix de la valeur de ce débit calorifique n'a pas d'influence sur les températures simulées. Il est possible d'affirmer d'après les résultats obtenus au paragraphe 1 que, si un débit calorifique supérieur est imposé au brûleur d'allumage, la propagation va débuter plus tôt qu'un cas ayant un débit calorifique inférieur mais l'intervalle de temps séparant l'augmentation de température aux thermocouples placés entre 20 et 50 cm va être identique. Il y aura un décalage temporel identique de l'ensemble des courbes de températures comme cela l'a déjà été montré au chapitre 3.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Le maillage du domaine de calcul est constitué de deux blocs (voir l'image 250). Le bloc 1, contenant le matelas, est maillé avec des cellules cubiques de 5 cm de côté. Ce maillage s'étend 1 m à l'extérieur du caisson afin de prendre en compte correctement, sans qu'il ne soit influencé par la condition aux limites imposée, l'échange de matière par l'ouverture. Le bloc 2 est composé de cellules cubiques de 10 cm de côté. Il s'étend sur 5 m de longueur à partir du fond du caisson. Le bloc 2 a été maillé plus grossièrement car la dynamique de l'écoulement dans cette partie du caisson a moins d'influence sur la combustion du matelas que le bloc 1. En effet, dans le bloc 1, il est important d'avoir un maillage assez fin pour reproduire correctement les échanges de matière par l'ouverture du caisson ainsi que les échanges thermiques au niveau du matelas.
Le maillage du bloc 1 a un R^* égal à 0,05. Cette valeur est en adéquation avec ce qui a été présenté au chapitre 3 afin que la hauteur de flamme et la température et la vitesse dans le panache et le jet sous-plafond soient correctement simulées. Un maillage optimal serait obtenu avec des cellules de 7 cm. Cependant, comme les thermocouples sont disposés sur des cercles concentriques espacés de 10 cm, il a été choisi de raffiner le maillage au niveau du matelas dans le but d'avoir au moins deux cellules entre chaque cercle. Cela peut paraître limité pour la comparaison des mesures avec les simulations de n'utiliser que deux cellules pour mailler l'espace entre les cercles de thermocouples.



250. *Vue extérieure du maillage de caisson de transport maritime*

Dans un premier temps, la température d'inflammation imposée dans FDS pour le polyuréthane est celle mesurée, c'est à dire 340 °C. Lorsque cette valeur est combinée avec les autres caractéristiques de la mousse définies dans le tableau 249, aucune propagation des flammes n'est observée sur la face supérieure du matelas.
La température d'inflammation du polyuréthane est alors changée dans le but d'observer une propagation du front de flamme sans changer ni le maillage ni les autres caractéristiques du matériau. Une relation (voir l'équation (68)) pour exprimer la vitesse de propagation du front de flamme peut être obtenue en réalisant un bilan d'énergie à la surface du combustible [ZHOU 1992].

$$\rho V_f Ah\delta = q''l \qquad (68).$$

Dans cette équation (68), V_f est la vitesse de propagation des flammes, ρ la masse volumique du combustible, δ l'épaisseur de la couche de pyrolyse, l est la longueur de la région exposée au flux de chaleur, q'' est l'énergie transférée à la surface par unité de surface et de temps et Ah est l'augmentation critique d'enthalpie par unité de masse de combustible nécessaire pour que l'inflammation se produise. Cette dernière valeur peut être considérée comme linéairement dépendante à la température d'inflammation. Par conséquent, si la température d'inflammation décroît, Ah diminue également et la vitesse de propagation des flammes augmente alors. Ainsi, pour arriver à simuler une propagation du front de flamme, il faut diminuer la température d'inflammation du polyuréthane dans les simulations.

Deux nouvelles températures sont maintenant considérées[29] : 305 et 280 °C. Aucune de ces deux valeurs n'est inclue dans les incertitudes expérimentales de la température d'auto-inflammation non-pilotée mesurée au cône calorimètre. Les vitesses de propagation du front de flamme simulées avec ces deux nouvelles températures sont listées dans les tableaux 251 et 252. La même température que lors de l'analyse des résultats expérimentaux est choisie pour déterminer le temps que les flammes mettent pour se propager d'un point de mesure à un autre, c'est-à-dire 200°C. Les vitesses de propagation du front de flamme ne sont pas très sensibles à la valeur de la température utilisée pour les calculer tant que ce critère seuil de température se situe dans la phase où l'augmentation de

[29] Plusieurs autres températures ont été testées mais seuls les résultats obtenus avec 305 et 280 °C seront présentés dans ce document. Les autres configurations n'apportent pas d'informations supplémentaires.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

température en fonction du temps est maximale. Ainsi, pour un critère de 280 °C, les vitesses de propagation du front de flamme sont inférieures de 0,01 à 0,02 cm/s par rapport à celles déterminées avec une température de 200 °C.

- Par rapport à l'expérience, la dissymétrie dans les directions N/S est moins visible pour les deux simulations. Les vitesses dans la direction N ne sont jamais 25 % supérieures à celles simulées dans la direction S et même O, E et SE comme cela est observé expérimentalement. Par rapport aux vitesses simulées dans la direction N, celles dans la direction S sont inférieures d'environ 16 % sur le premier cercle et 6 % sur les deux autres cercles (30 et 40 cm) pour la température de 305 °C et de 16 % sur le premier cercle et 7,5 % sur les deux autres cercles pour la température de 280 °C.
- Pour une température d'inflammation de 305 °C, les vitesses sont sous-estimées dans chaque direction par rapport aux résultats expérimentaux. Cette température de 305 °C est encore trop élevée pour obtenir un accord acceptable entre les résultats expérimentaux et numériques.
- Au contraire, les vitesses de propagation du front de flamme simulées sont plus proches des mesures expérimentales lorsqu'une température de 280 °C est utilisée pour la température d'inflammation du polyuréthane. Pour des distances radiales supérieures ou égales à 30 cm, la moyenne des erreurs relatives est inférieure à 6%.

Distance/Direction	N (cm/s)	O (cm/s)	S (cm/s)	E (cm/s)	SE (cm/s)
20 cm	0,19	0,16	0,16	0,16	0,15
30 cm	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16
40 cm	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
50 cm	0,21	0,20		0,20	0,20

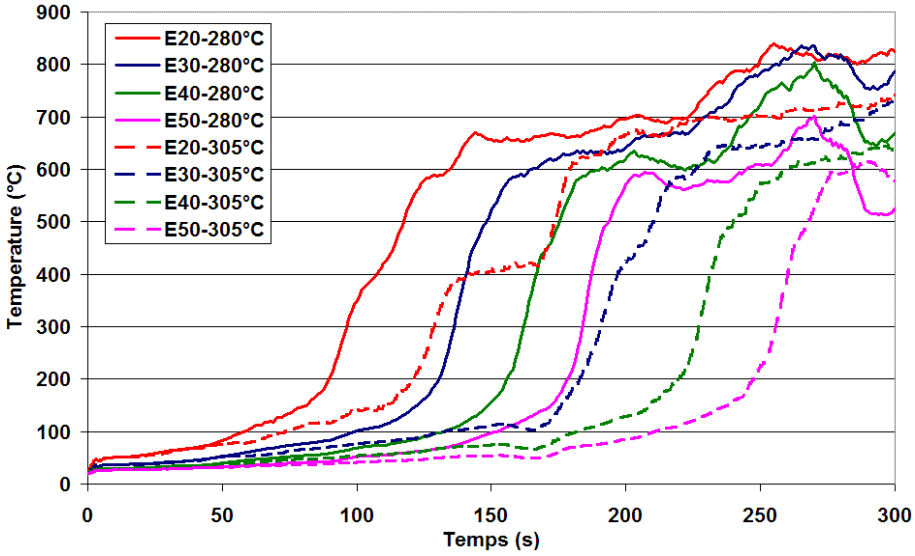
251. *Vitesses de propagation du front de flamme obtenues avec FDS pour une température d'inflammation de 305°C*

Distance/Direction	N (cm/s)	O (cm/s)	S (cm/s)	E (cm/s)	SE (cm/s)
20 cm	0,25	0,22	0,21	0,22	0,20
30 cm	0,25	0,23	0,22	0,23	0,22
40 cm	0,27	0,25	0,25	0,25	0,24
50 cm	0,29	0,28		0,28	0,27

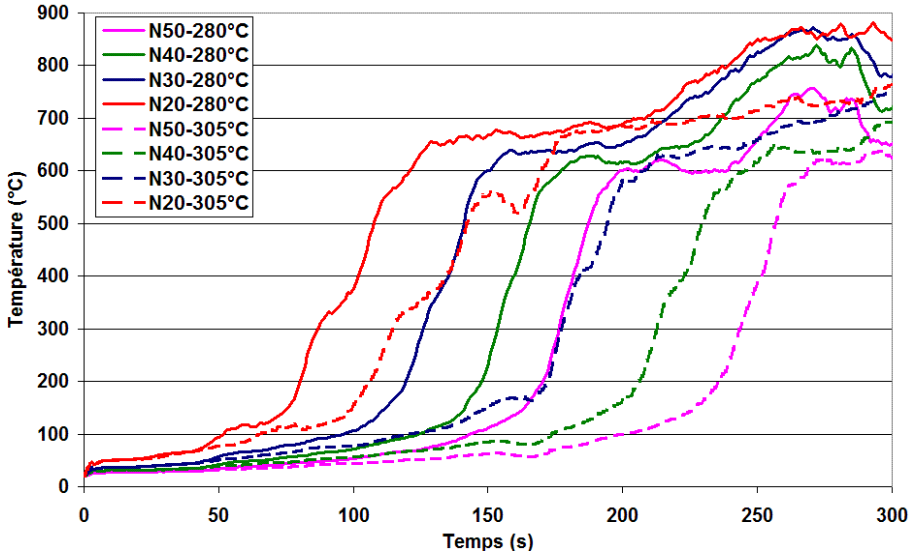
252. *Vitesses de propagation du front de flamme obtenues avec FDS pour une température d'inflammation de 280°C*

Les simulations montrent une forte sensibilité à la température d'inflammation (T_{igni}) de la vitesse de propagation du front de flamme (voir les graphiques 253 et 254). L'augmentation de température du cas T_{igni}=305 °C est retardé selon la distance au centre de 25 s à 70 s par rapport à l'autre cas T_{igni}=280 °C. Il est important de noter que ce retard est identique quelle que soit la direction choisie : N/S, E/O, etc..

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



253. *Températures dans la direction E pour les simulations utilisant des températures d'inflammation de 280 et 305°C*



254. *Températures dans la direction N pour les simulations utilisant des températures d'inflammation de 280 et 305°C*

Cette première étude expérimentale a eu pour but de déterminer les meilleures caractéristiques matériaux à utiliser pour modéliser la propagation d'un front de flamme à la surface d'un matelas en mousse polyuréthane. Une diminution de la température d'inflammation de la mousse définie dans FDS augmente la vitesse de propagation du front de flamme. Sur toutes les températures testées (seuls les cas utilisant des températures de 340, 305 et 280 °C sont présentés dans ce paragraphe), c'est la valeur la plus faible de 280 °C qui donne la meilleure adéquation entre les vitesses de propagation expérimentales et simulées. Cette température a été déterminée pour un essai ayant une configuration géométrique simple et pendant lequel la combustion est contrôlée par le combustible. Pour être complet, les caractéristiques matériaux, en particulier la valeur optimisée de 280 °C, doivent être testées sur un autre cas plus complexe, ce qui sera fait dans le paragraphe suivant.

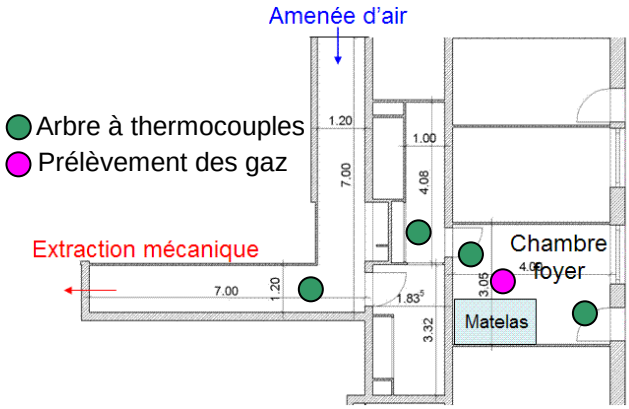
Cette étude a mis en avant la difficulté d'utiliser directement les données obtenues à l'aide d'essais au cône calorimètre. Une erreur sur la mesure de l'enthalpie de combustion est faite en considérant que l'énergie dégagée pour un kilogramme d'oxygène consommé est égale à 13 100 kJ/kg_{O2}. La valeur avancée dans la littérature [SFPE 2002] pour le polyuréthane est de 13 160 kJ/kg_{O2}. L'erreur due à la valeur du facteur de Thornton utilisée pour la mesure du débit calorifique et le calcul de l'enthalpie de combustion est donc acceptable dans le cas du polyuréthane. La température d'auto-inflammation du matériau mesurée lors de cet essai est plus discutable. Cette donnée matériau ne peut être utilisée telle quelle dans une étude si un essai de calage de la propagation des flammes à la surface du

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

matériau n'est pas réalisé au préalable. Les résultats de ce paragraphe ont débouché sur des travaux de recherche visant à améliorer la méthode de mesure des températures d'auto-inflammation des matériaux lors d'essais au cône calorimètre

5.1.3 Expérience dans un appartement

Une seconde expérience a été réalisée afin d'évaluer la propagation du front de flamme dans une configuration plus complexe et plus réaliste que précédemment. Un matelas a été placé dans le coin d'une pièce d'un appartement (voir l'image 255). Cette pièce communique vers un premier couloir, celui de l'appartement, puis vers une circulation en forme de L équipée d'un système de désenfumage asservi à une détection de fumée. L'entrée d'air frais est naturelle et se situe en partie basse d'une première extrémité de la circulation, entre 0,2 et 0,8 m de haut. À l'autre bout, l'extraction mécanique est disposée en partie moyenne entre 1,2 et 1,80 m de haut et elle a un débit d'extraction de 3 600 m^3/h. Les portes de la chambre et de l'appartement sont maintenues ouvertes sur la totalité de l'essai. Toutes les autres portes (non indiquées sur le plan) et toutes les fenêtres sont maintenues fermées.



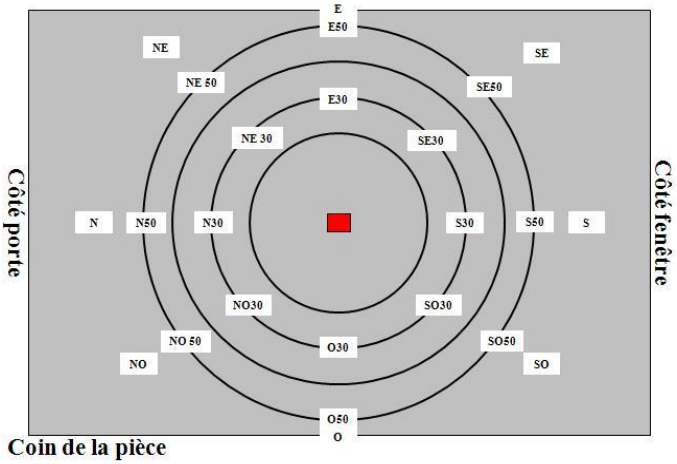
255. *Plan du niveau où se tient l'expérience*

Aucune charge calorifique n'est placée dans le couloir de l'appartement ou dans la circulation désenfumée. Dans la chambre foyer, un matelas en mousse polyuréthane est posé sur un support en aggloméré de bois et deux demi palettes. Le bloc de mousse est légèrement plus grand (1,4 x 2,0 x 0,16 m^3) que celui de l'essai précédent mais le matériau a des caractéristiques physiques identiques. Deux blocs de mousses sont placés à la tête du lit pour jouer le rôle d'oreillers (voir la photo 256). La charge calorifique est complétée par un sol entièrement couvert de moquette en polyester, des plaques de contreplaqué fixées sur les murs, un système informatique complet (clavier, unité centrale et écran) agencé sur un meuble également en contreplaqué et une chaise en mousse polyuréthane sur un support en acier.

256. *Charge calorifique disposée dans la chambre foyer*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Le dispositif de mesure au niveau du matelas est moins fourni sur cet essai que dans le précédent. Mais pour l'instrumentation du matelas, la même méthode expérimentale a été suivie. Seize thermocouples ont été placés dans le bloc de mousse en polyuréthane, sur deux cercles concentriques de rayon 30 et 50 cm (voir le schéma 257). Les cercles sont centrés sur le milieu de la face supérieure du matelas. Le dispositif de mesure thermique est complété par des thermocouples fixés sur des arbres à des hauteurs de 220, 180, 140 et 100 cm. Un arbre est installé dans le fond de la chambre près de la fenêtre, un second à l'entrée de la chambre, un troisième dans le couloir de l'appartement et un dernier dans la circulation désenfumée (voir l'image 255). Enfin, des gaz sont prélevés à proximité du lit dans la chambre foyer à 1,5 m du sol (voir l'image 255). Les concentrations en dioxygène, monoxyde et dioxyde de carbone sont mesurées.



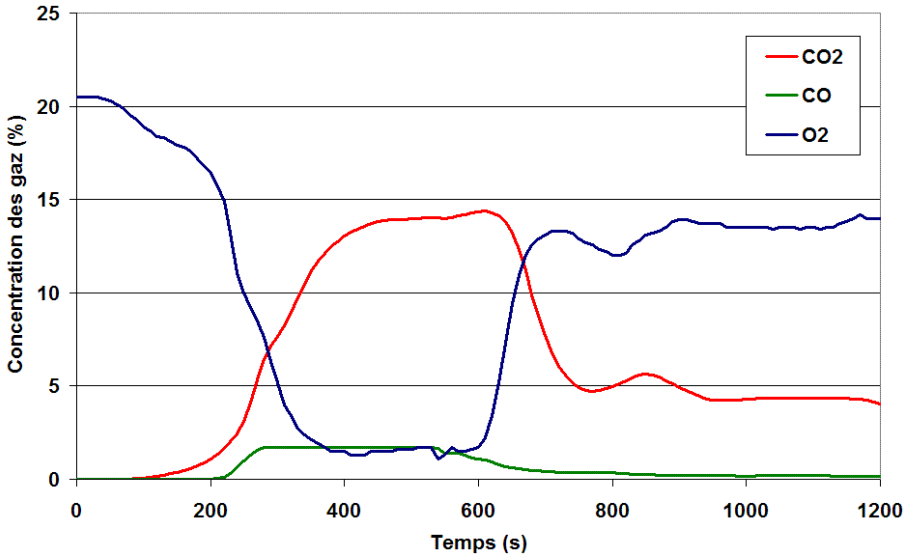
257. *Vue de dessus de la disposition des thermocouples dans le matelas (en rouge : la zone d'allumage, en gris : le matelas)*

258. *Photo du foyer 110 s après l'allumage : les flammes se propagent au coussin*

Le matelas est allumé au milieu de sa face supérieure (surface rouge du schéma 257) à l'aide de la flamme nue d'un chalumeau à gaz de petite taille. Au début de l'essai, les flammes restent localisées dans la zone centrale du matelas. Après environ 110 s, elles se propagent en direction du coin de la pièce (NO sur le schéma 257) et enflamment les cousins placés à la tête du lit (voir la photo 258). Une inflammation subite et très localisée des fumées se produit 165 s après l'allumage. Cela a pour effet de projeter du liquide enflammé dans la direction S. Peu de temps après, la propagation du front de flamme s'accélère et un embrasement généralisé se produit dans la pièce. Pendant cet essai, la propagation du front de flamme n'est pas symétrique car le feu se propage plus rapidement vers le coin de la pièce, c'est-à-dire la direction NO.

La concentration en oxygène décroît rapidement après l'allumage (voir le graphique 259). L'oxygénation du foyer est par conséquent différente de l'expérience précédente dans le caisson de transport maritime où la combustion était, durant l'essai, toujours contrôlée par le combustible. Ici, lorsque le matelas est placé dans une pièce dont l'apport d'air se fait sur la première dizaine de minute uniquement par la porte, le régime de combustion devient rapidement sous-ventilé après 230 s environ. Par contre, pour des temps nettement inférieurs, la combustion est considérée comme bien ventilée et les vitesses de propagation peuvent être comparées à celles du cas précédent.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



259. *Concentration en dioxygène, monoxyde[30] et dioxyde de carbone à 1,5 m dans la pièce foyer*

Les flammes se propagent de façon homogène sur les cent premières secondes. À 30 cm du centre du matelas, toutes les vitesses moyennes de propagation du front de flamme hormis celles dans la direction NE sont comprises entre 0,20 et 0,22 cm/s (voir le tableau 260 et les graphiques 261 et 262). La propagation est plus hétérogène à 50 cm du centre du matelas. Les flammes se propagent plus rapidement dans la direction NO avec une vitesse de 0,29 cm/s comparée aux 0,24 à 0,26 cm/s dans les autres directions : la propagation n'est plus symétrique.
Les températures mesurées à 30 cm sur cet essai sont très proches de celles obtenues avec le matelas placé dans le caisson de transport maritime. Pour les deux essais, la dynamique de l'écoulement et le régime de combustion semblent similaires pendant les 150 premières secondes environ.

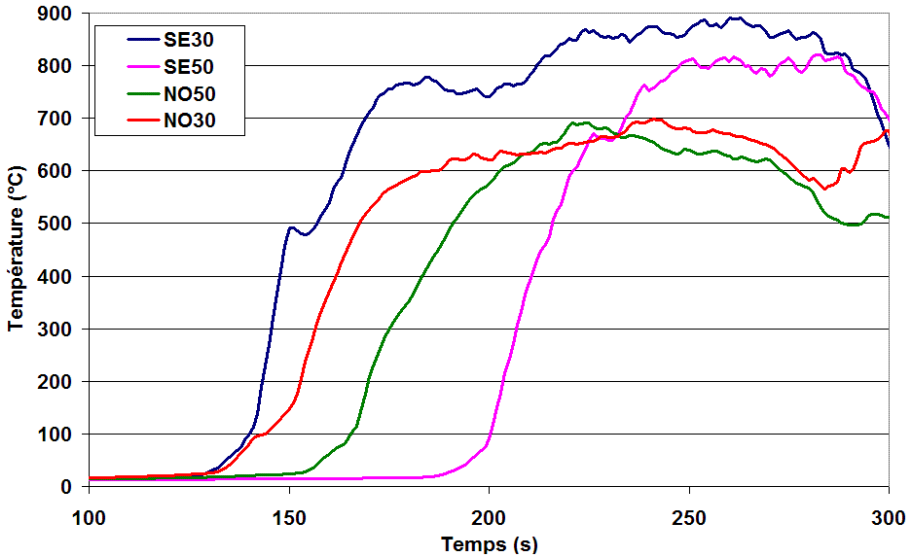
Ce n'est plus le cas à 50 cm du centre du matelas. Les valeurs mesurées dans la pièce de l'appartement se situent dans l'intervalle [0,24 cm/s ; 0,29 cm/s] alors que, pour le caisson de transport maritime, elles sont comprises dans l'intervalle [0,27 cm/s ; 0,36 cm/s]. Cela correspond à un écart de 13 % sur les valeurs moyennes. Il est considéré que c'est une différence dans la ventilation du feu qui est la cause des différences observées sur la propagation non symétrique des flammes et les écarts sur les vitesses moyennes de propagation. La forme des flammes est modifiée par le mouvement d'air à travers la porte et par la proximité des parois et du coin. Comme le montrent les graphiques 261 et 262, les thermocouples à 50 cm ont été soumis aux effets directs de la flamme à partir de 150 s ce qui correspond bien au début de la transition vers la combustion sous-ventilée comme cela est confirmé sur la figure 259. À partir de 150 s environ, la ventilation de la combustion du matelas dans l'appartement a commencée à être limitée ce qui explique les valeurs plus faibles de propagation qui ont été observées pour un rayon de 50 cm.

Distance / Direction	N (cm/s)	NE (cm/s)	E (cm/s)	SE (cm/s)	S (cm/s)	SO (cm/s)	O (cm/s)	NO (cm/s)
30 cm	0,22	0,18	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,20
50 cm	0,24	0,24	0,24	0,25	0,27	0,26	0,26	0,29

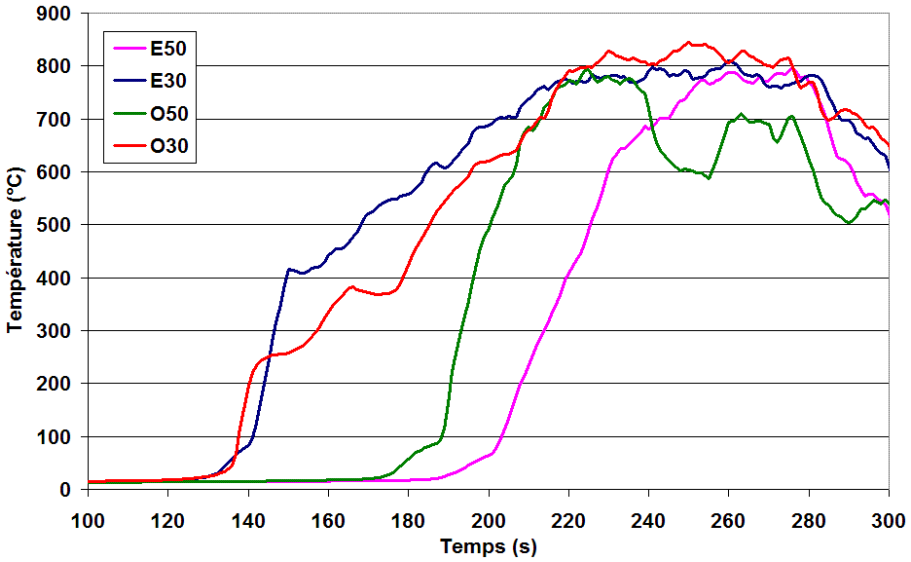
260. *Vitesses moyennes expérimentales de propagation du front de flamme (cm/s) mesurées dans huit directions et à deux distances du centre du matelas*

[30] Il est à noter que la gamme de mesure de l'analyseur de monoxyde de carbone est de 0 à 1 %. Les concentrations de 1% jusqu'à 1,7% sont données à titre informatif.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



261. *Températures mesurées dans les directions SE et NO*



262. *Températures mesurées dans les directions E et O*

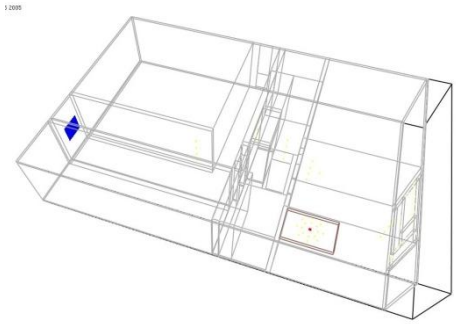
5.1.4 Simulation de l'expérience dans l'appartement

Pour la simulation de cette expérience, les caractéristiques utilisées pour définir la mousse de polyuréthane sont celles données au paragraphe 5.1.2 et en particulier la température d'inflammation de 280 °C. C'est l'unique combustible de la simulation. D'après les enregistrements vidéo de l'expérience, seul le matelas brûle pendant les premières minutes de l'incendie. Le feu se propage ensuite aux coussins en tête du matelas et au contreplaqué fixé sur le mur jouxtant le lit. Le support en aggloméré de bois ainsi que les deux demi-palettes placées sous le matelas ne commencent à brûler que lorsque toute la mousse est consommée.

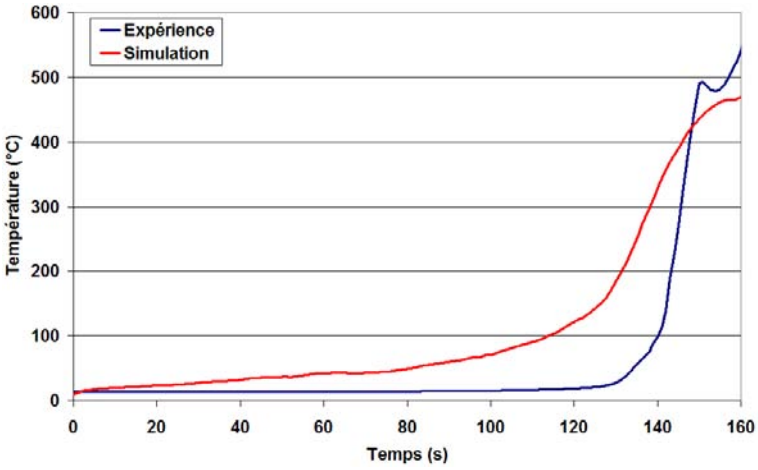
Le maillage utilisé dans la zone du matelas pour la simulation de l'appartement se doit d'être identique à celui des simulations pour le caisson de transport maritime. Les cellules ont par conséquent 5 cm de côté au niveau du matelas et 10 cm dans le reste du domaine. L'allumage est effectué pendant 400 s grâce à un brûleur équivalent à celui de la simulation dans le caisson de transport maritime (la surface rouge sur l'image 263 représente la zone d'allumage).
Le déclenchement du système de désenfumage dans la simulation (voir la surface bleue sur l'image 263) est effectué 120 s après l'allumage du foyer comme cela a été observé lors de l'essai. Ce temps imposé pour la simulation n'est peut-être pas sans conséquences sur les résultats de la simulation.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En effet, la dynamique de l'incendie simulé n'est pas forcément identique à l'expérience. L'extraction dans la circulation peut par exemple démarrer dans la simulation quand 5 % de la surface du matelas est en flamme alors, qu'au même instant, seulement 2,5 % l'est lors de l'essai[31]. En comparant les températures simulée et expérimentale au point de mesure placé à 30 cm du centre dans la direction SE, l'écart dans l'avancement de la propagation est visible lorsque la ventilation est déclenchée (voir le graphique 264). En effet, 120 s après l'allumage les températures calculées ont déjà commencé à augmenter jusqu'à 110 °C alors qu'elles sont toujours de 15 °C dans l'expérience.



263. *Vue de la modélisation de l'expérience dans l'appartement*



264. *Températures expérimentale et simulée dans la direction SE à 30 cm du centre du matelas*

Il est important de remarquer dans cette simulation que la propagation des flammes cesse après 200 s (voir les graphiques 266, 267, 268 et 269) alors que la totalité de la masse du matelas n'est pas encore consommée. Les températures et le débit calorifique décroissent rapidement à partir de 180 s. Entre 200 et 400 s, seules des petites flammes sont localisées légèrement au nord du centre du matelas et à proximité du brûleur d'inflammation. Cela est visible sur le graphique 268 puisque, après la chute des températures entre 180 et 240 s, seules celles dans la direction N oscillent entre 100 et 420 °C alors que, dans la direction S, elles se stabilisent autour de 50 °C. Après 400 s, lorsque le brûleur d'inflammation cesse de dégager de l'énergie, les flammes disparaissent très rapidement en une quarantaine de secondes.

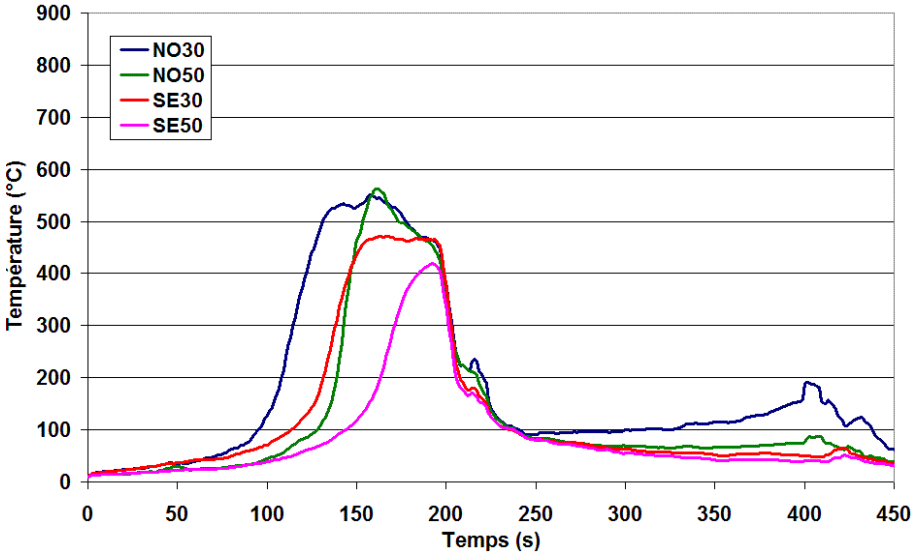
Par rapport à l'expérience, la tendance des flammes à se propager majoritairement dans la direction NO, c'est-à-dire vers le coin de la pièce dans lequel est disposé le matelas, est plus marquée dans la simulation et cela dès la distance de 30 cm. Alors qu'expérimentalement à 30 cm (voir le tableau 265), les vitesses sont de l'ordre de 0,21 cm/s avec une variation de ± 0,01 cm/s en fonction de la direction (exceptée dans la direction NE) ce qui est synonyme d'une propagation quasi-symétrique, les vitesses sont beaucoup plus hétérogènes dans la simulation puisqu'elles sont égales à 0,26 ± 0,03 cm/s. Globalement, les vitesses moyennes de propagation du front de flamme simulées à 30 et 50 cm du centre du matelas (cf. tableau 265) sont surestimées par rapport à l'expérience respectivement de 17 et 23 %. Sur les deux cents premières secondes, l'accord entre la propagation expérimentale et numérique du front de flamme n'est pas ici aussi bon que dans l'essai effectué dans le caisson de transport maritime. Après 200 s, il devient même encore moins bon.

Distance / Direction	N (cm/s)	NE (cm/s)	E (cm/s)	SE (cm/s)	S (cm/s)	SO (cm/s)	O (cm/s)	NO (cm/s)
30 cm	0,29	0,25	0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,28
50 cm	0,36	0,34	0,32	0,31	0,31	0,32	0,35	0,36

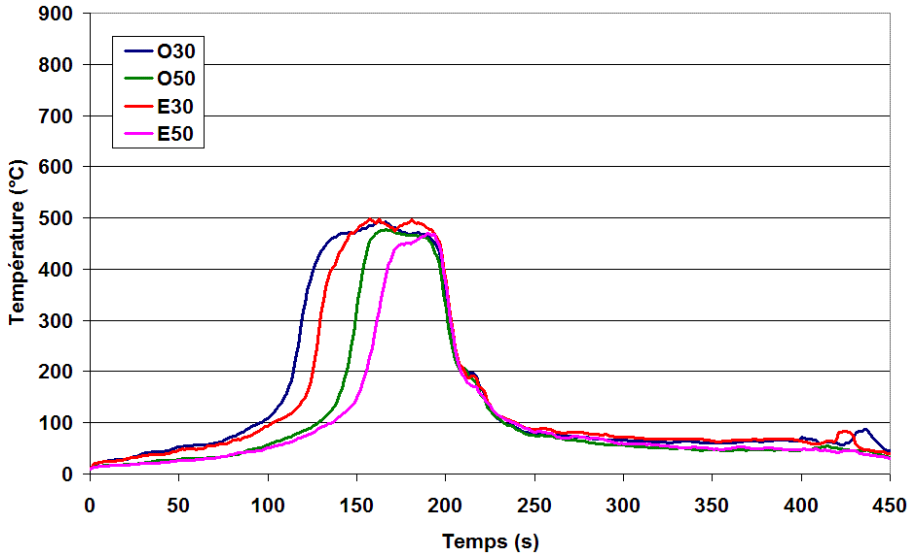
265. *Vitesse moyenne de propagation du front de flamme dans huit directions*

[31] Ces valeurs sont choisies au hasard pour illustrer le propos

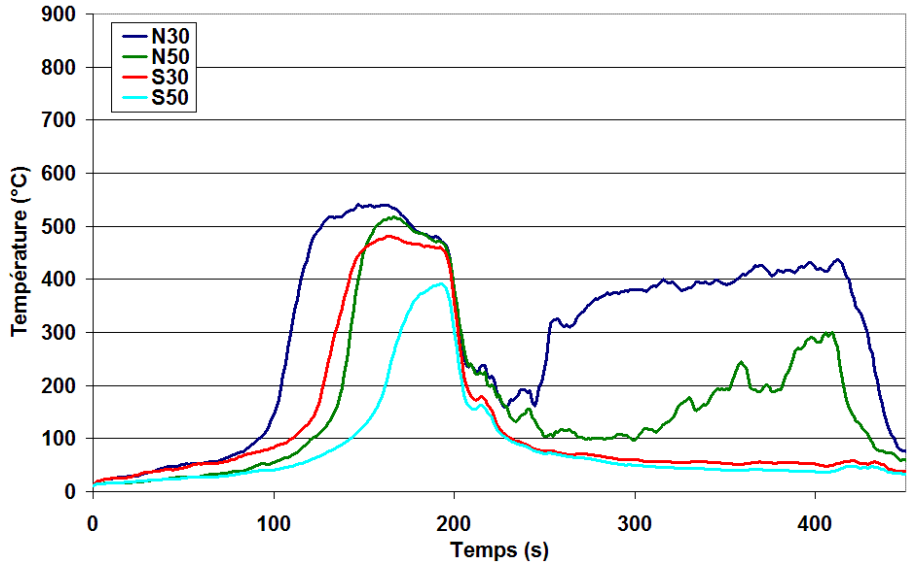
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



266. *Températures simulées (°C) dans les directions SE et NO de l'appartement*

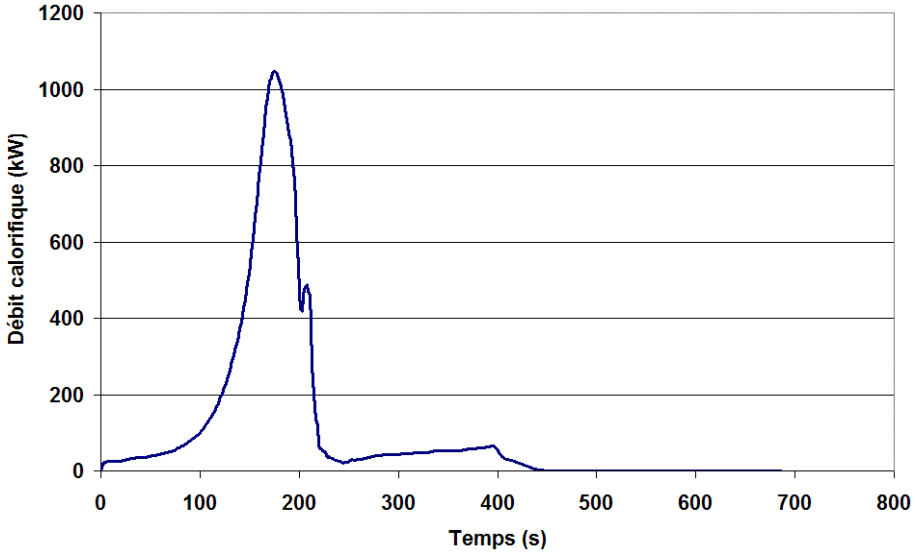


267. *Températures simulées (°C) dans les directions E et O de l'appartement*



268. *Températures simulées (°C) dans les directions N et S de l'appartement*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



269. *Débit calorifique (kW) dégagé dans le domaine de calcul*

Pour synthétiser, les vitesses de propagation obtenues dans la simulation de l'appartement sont :

- surestimées par rapport à l'expérience dans l'appartement
- surestimées par rapport aux vitesses simulées dans le caisson.

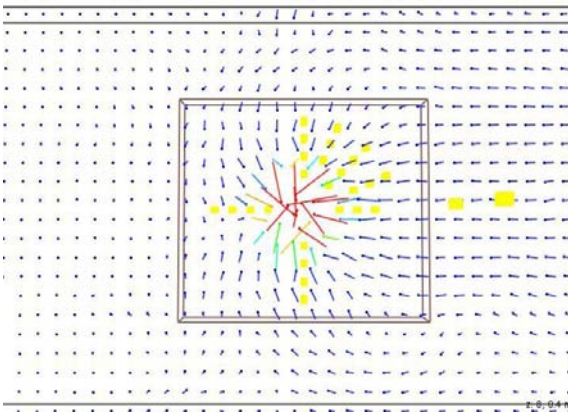
Alors que, expérimentalement :

- elles sont du même ordre de grandeur à 30 cm (comprises entre 0,18 et 0,22 cm/s)
- la vitesse dans le caisson est supérieure de 15 % à celle de l'appartement à 50 cm

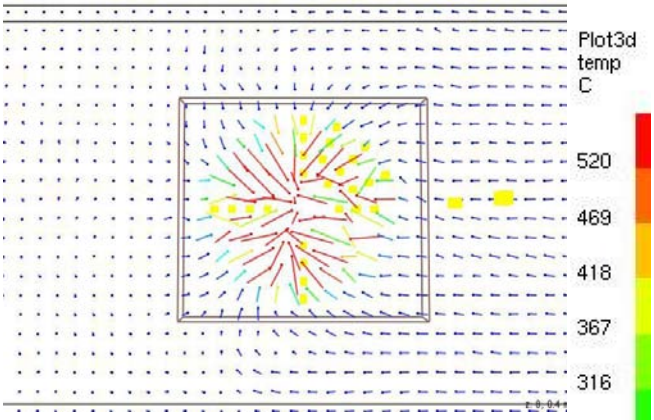
Ceci s'explique par l'environnement expérimental qui est différent entre les deux expériences. En effet, lorsque les flammes arrivent à 50 cm sur la surface du matelas, la combustion commence à être sous ventilée dans l'appartement.

La surestimation par la simulation est donc la conséquence d'un phénomène dont l'influence est minime dans le cas du caisson de transport maritime mais qui est accentuée dans la configuration de l'appartement. Comme la propagation vers le coin de la pièce de l'appartement est très visible dans la simulation, l'une des causes envisagées est un effet cheminée créé par le mouvement des fluides en direction du coin dans lequel le matelas est disposé. Sur les images 270 et 271 sont tracés les vecteurs vitesses 5 cm au-dessus du matelas dans la simulation du caisson de transport maritime. Les vitesses sont majoritairement dirigées vers le centre du matelas. Ce n'est pas le cas sur les vues 272 et 273 de l'appartement où les vitesses sont dirigées en direction du coin. Cela illustre l'effet cheminé évoqué précédemment. La seconde explication envisagée mais qui parait cependant moins probable est, dans le cas de l'appartement, un rayonnement supérieur en direction du matelas et en particulier de la part des murs situés à proximité. Cela est conjugué, pour surestimer le débit de pyrolyse de la mousse ainsi que la vitesse moyenne de propagation du front de flamme, à la proximité de l'angle formé par les murs qui modifie la forme des flammes et auxquels s'ajoutent également les incertitudes dans les coefficients d'absorption et la température des flammes.

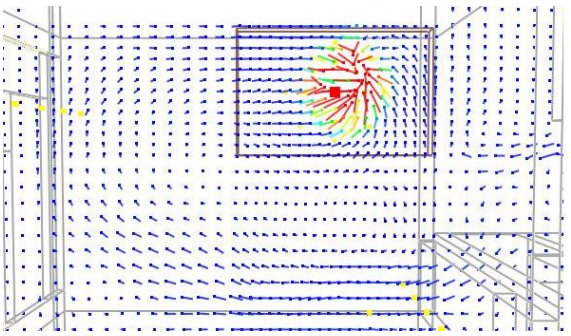
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



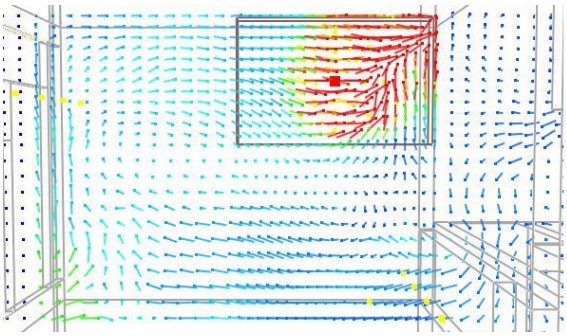
270. *Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 130 s dans le caisson de transport maritime*



271. *Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 190 s dans le caisson de transport maritime*

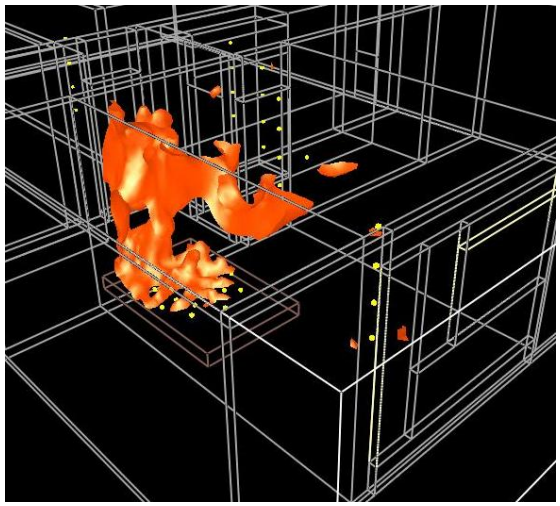


272. *Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 150 s dans l'appartement*

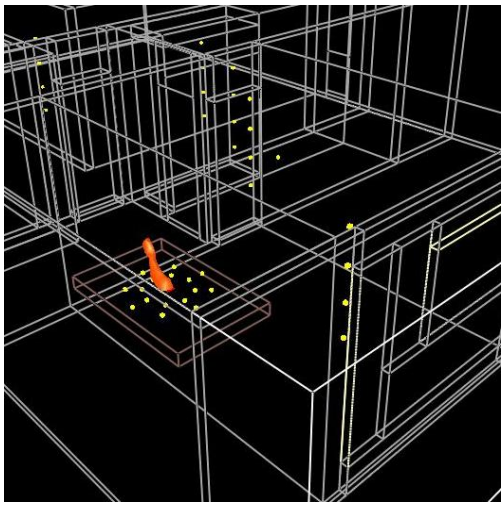


273. *Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 190 s dans l'appartement*

Après 200 s de simulation, la propagation cesse alors que le front de flamme se propageait plus rapidement que dans la simulation du caisson de transport maritime et les deux expériences. La combustion est ensuite localisée pendant près de 230 s dans une très petite zone au nord du brûleur d'allumage (voir les images 274 et 275).



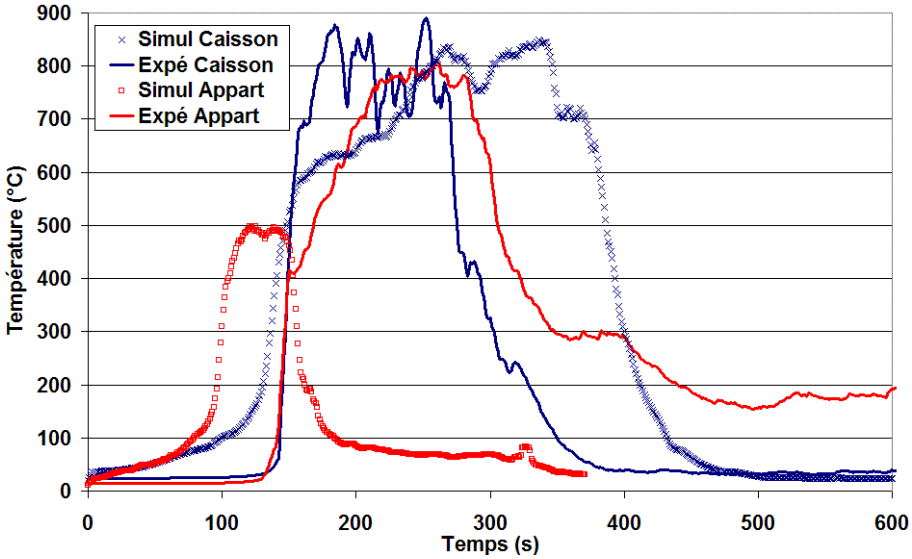
274. *Isosurface de fraction de mélange à la stœchiométrie à 190 s*



275. *Isosurface de fraction de mélange à la stœchiométrie à 260 s*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

En étudiant les courbes de température à 30 cm dans la direction E pour la simulation et l'expérience dans le caisson et l'appartement (voir le graphique 276), une différence très nette apparaît dans les températures maximales atteintes. Alors que ces dernières sont comprises entre 800 et 890 °C pour l'expérience, la simulation dans le caisson de transport maritime et l'expérience dans l'appartement, seulement 500 °C sont atteints au maximum dans la simulation de l'appartement. Cette sous-estimation de la température est symptomatique de l'arrêt de la propagation du front de flamme sur le matelas. Toutes les températures simulées au niveau du matelas ainsi que dans la pièce sont également inférieures aux valeurs expérimentales. L'énergie dégagée lors de la combustion est donc sous-estimée. Dans ces conditions où l'amenée d'air est uniquement faite par la porte, et où le foyer devient vite sous-ventilé, le modèle de combustion de FDS ne simule pas correctement le dégagement d'énergie dans le domaine de calcul.



276. *Températures à 30 cm du centre du matelas dans la direction E pour l'expérience et la simulation du caisson de transport maritime et de l'appartement*

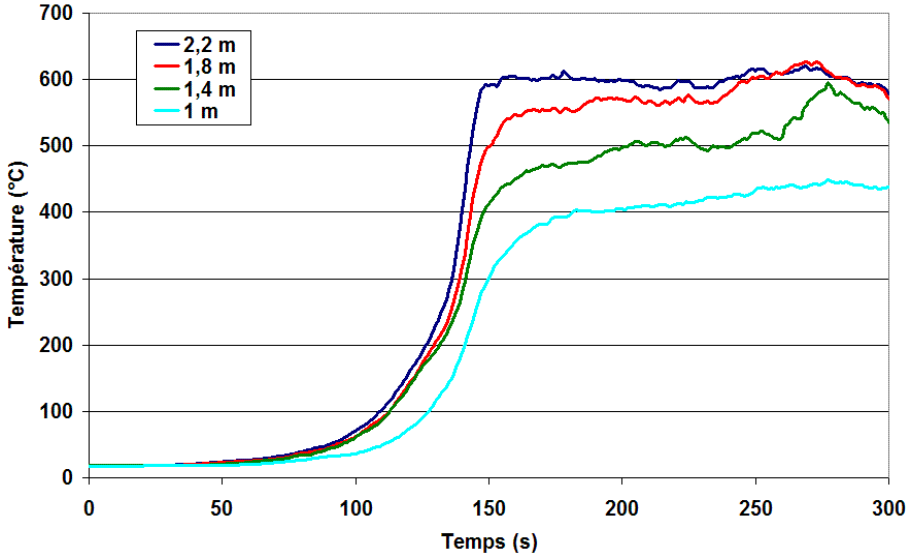
En conclusion, cette seconde configuration expérimentale dans un appartement met donc en évidence les faiblesses du modèle de pyrolyse pour simuler la propagation du front de flamme à la surface du matelas en polyuréthane. La vitesse moyenne de propagation du front de flamme est surestimée par rapport à l'expérimentation. Même si les vitesses simulées sont correctes sur la première configuration, dans une démarche d'investigation post-incendie, cela pourrait engendrer des erreurs sur les aspects temporels des évènements. La seconde faiblesse qui est apparue est celle du modèle de combustion de FDS lorsque les conditions deviennent sous-ventilées. Toutes les températures dans le domaine de calcul sont alors sous-évaluées et cela peut provoquer des mauvaises interprétations dans les dégradations de points de comparaison comme cela va être exposé dans le paragraphe suivant.

5.1.5 Sollicitation thermique d'hypothétiques points de comparaison disposés dans l'appartement

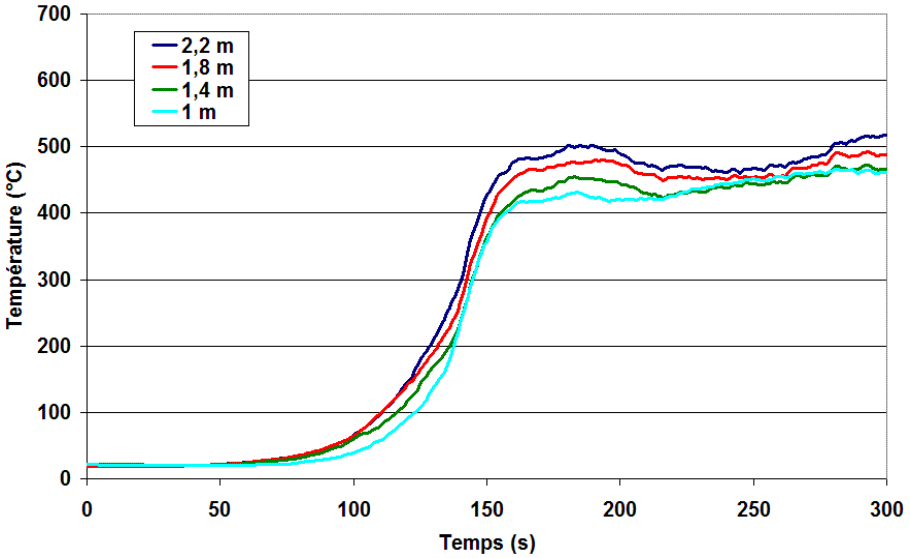
Lors de l'essai dans l'appartement, aucun appareil électrique n'a été disposé dans le couloir de l'appartement ou la circulation désenfumée comme cela a été fait lors des expériences présentées dans le chapitre 4. Cependant, il est intéressant de comparer les sollicitations thermiques qu'auraient subies ces éléments s'ils avaient été présents. Ainsi seules les 180 premières secondes de l'essai sont étudiées car l'unique combustible défini dans la simulation est le polyuréthane et, lors de l'expérience, d'autres matériaux brûlent après ce délai.
Les températures sur les arbres à thermocouples à l'entrée et au fond de la chambre sont tracées dans les graphiques 277 et 278 pour l'expérience et 279 et 280 pour la simulation. Expérimentalement, les températures sont comprises entre 400 °C à 1 m et 600 °C à 2,2 m et entre 200 °C à 1 m et 400 °C pour la simulation. En utilisant les dégradations constatées sur les éléments exposés au chapitre 4, si cette sollicitation était maintenue suffisamment longtemps dans la

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

simulation, une carbonisation en profondeur aurait été observée expérimentalement et une carbonisation superficielle avec FDS. Il en est de même pour des éléments qui auraient été implantés dans le couloir de l'appartement (voir les graphiques 281 pour l'expérience et 286 pour la simulation). Dans la circulation désenfumée, aucune dégradation n'aurait été constatée car les températures maximales ne sont pas assez élevées pour endommager les matériaux. Un dépôt de suie aurait éventuellement été observé selon la position du point de mesure.

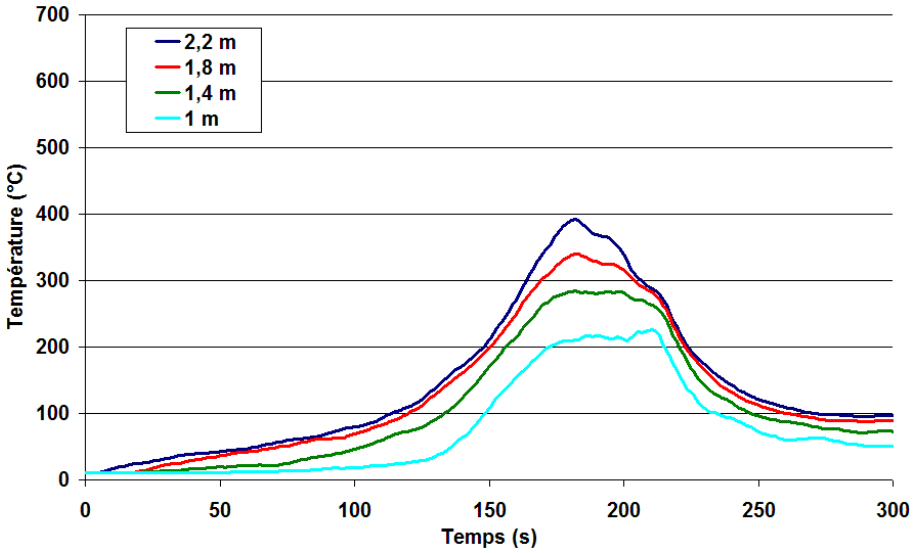


277. *Températures mesurées à l'entrée de la chambre*

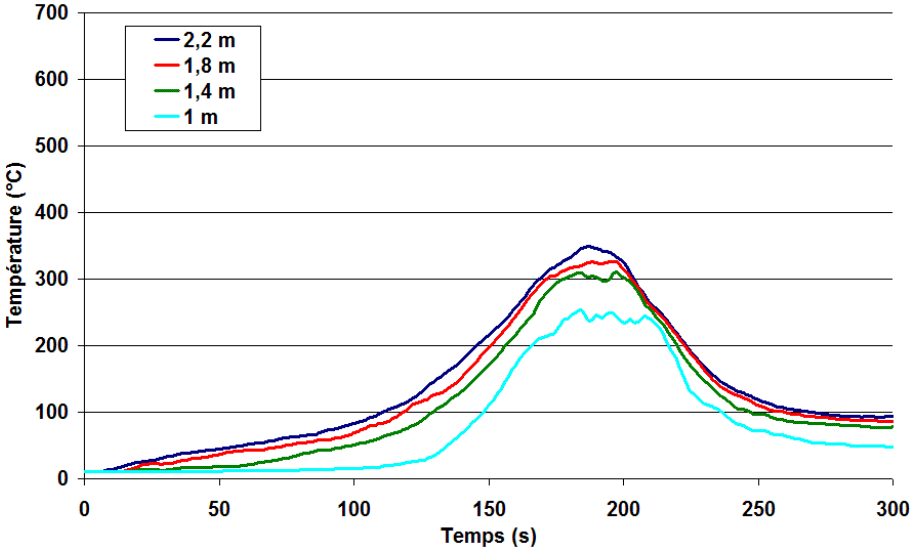


278. *Températures mesurées au fond de la chambre*

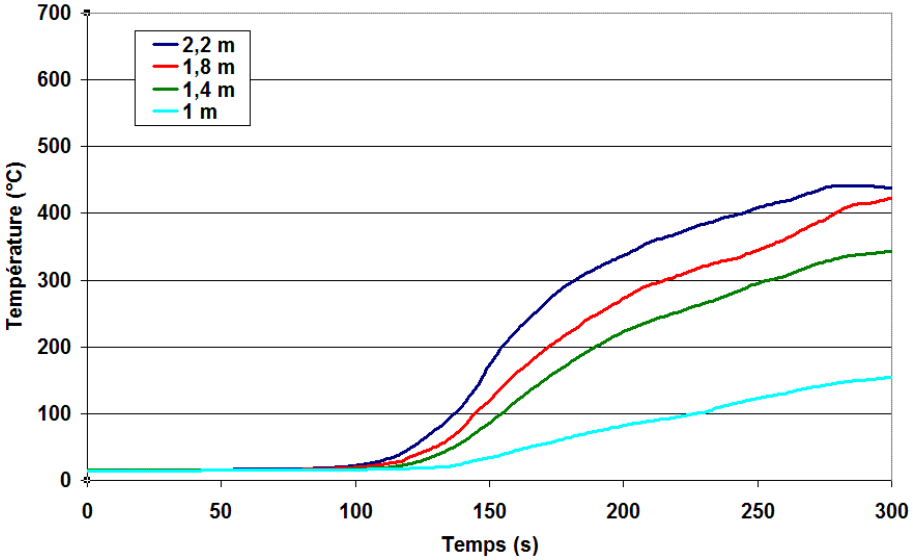
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



279. *Températures simulées à l'entrée de la chambre*

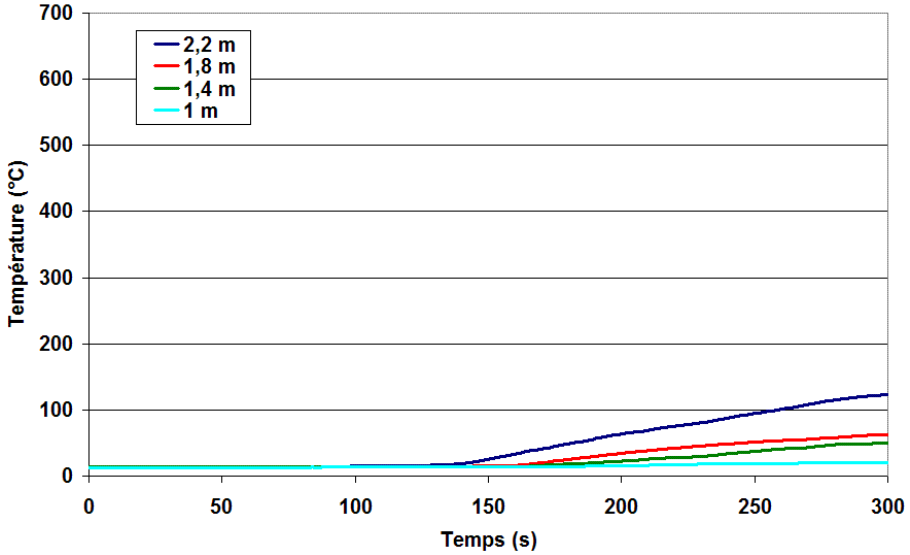


280. *Températures simulées au fond de la chambre*

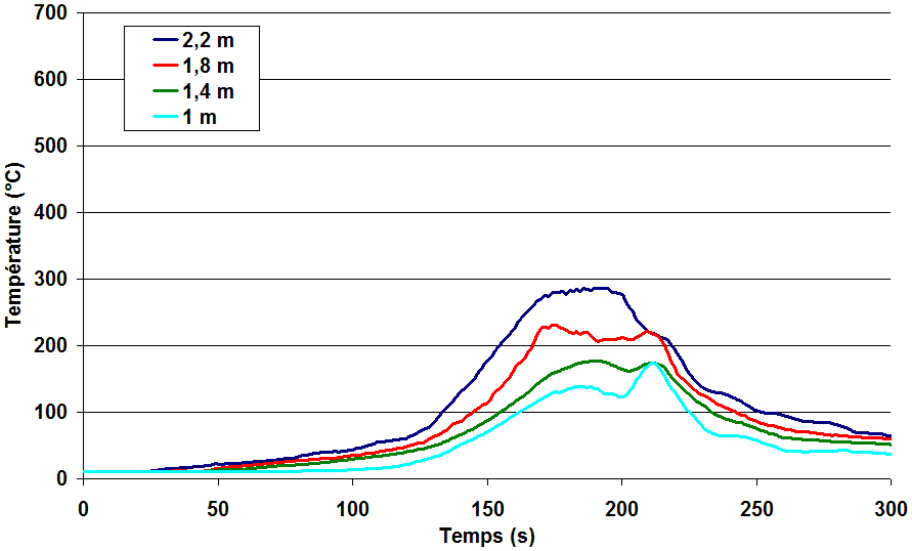


281. *Températures mesurées dans le couloir de l'appartement*

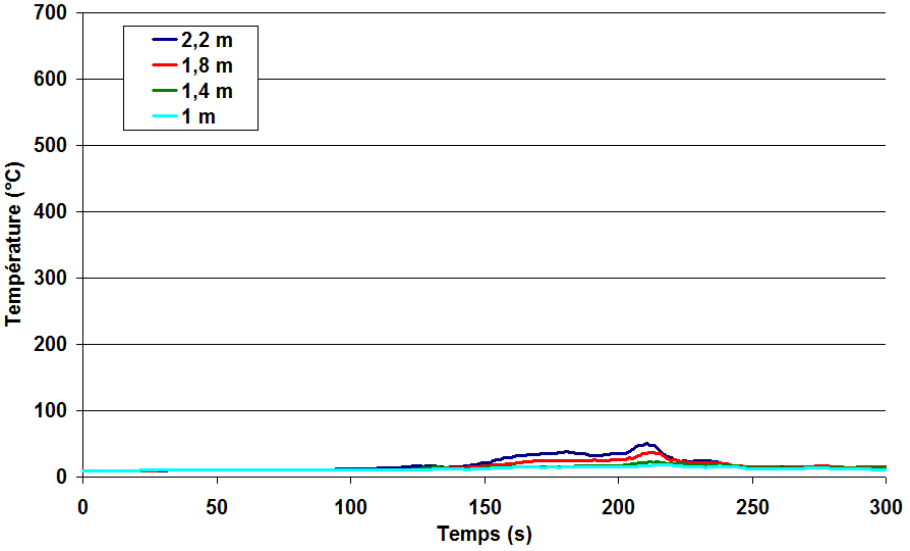
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



284. *Températures mesurées dans la circulation désenfumée*



286. *Températures simulées dans le couloir de l'appartement*



289. *Températures simulées dans la circulation désenfumée*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Sur ce cas d'application, l'interprétation des résultats de la simulation dans un but d'investigation aurait été biaisée par les erreurs faites sur les températures maximales atteintes dans la chambre et le couloir de l'appartement. De plus, comme les flammes ne se propagent pas sur le matelas dans la simulation, disposer d'autres matériaux combustibles comme du contreplaqué sur le mur n'aurait pas été utile car sa température d'inflammation est supérieure aux températures atteintes sur les parois. Les températures maximales dans le domaine de calcul ne seraient donc pas, dans tous les cas, maintenues sur des temps d'exposition assez longs pour obtenir des sollicitations thermiques identiques à celles qui auraient été observées.

5.1.6 Conclusions

La combustion d'un matelas en mousse polyuréthane dans deux configurations expérimentales différentes a été étudiée afin d'évaluer le modèle de pyrolyse de FDS. Il a été montré que, en modifiant la température d'inflammation du polyuréthane définie dans les calculs, une bonne adéquation est obtenue entre les vitesses expérimentales simulées et mesurées lorsque la combustion est contrôlée par le combustible. En conditions sous-ventilées, la vitesse simulée de propagation du front de flamme à la surface du matelas ne concorde plus avec l'expérience si des caractéristiques physiques identiques pour les deux cas sont conservées pour le polyuréthane.
Ces constatations indiquent clairement certaines limites du modèle de combustion de FDS. En l'attente d'amélioration, des précautions doivent donc être prises dans la définition des données matériaux lorsque le modèle de pyrolyse est utilisé et en particulier si la combustion est sous-ventilée. L'idéal pour vérifier que les bonnes données matériaux sont utilisées est de valider à différentes échelles les valeurs choisies.

Ces essais ont également permis de mettre en avant des temps et des vitesses caractéristiques de propagation de flamme sur un matelas. Il est donc possible de connaître, grâce à la simulation, le temps qu'un élément en mousse met pour être totalement enflammé et voire même totalement consommé. Ces temps sont parfois importants à exploiter dans le cadre d'investigations.

5.2 Investigations sur l'incendie d'un appartement

L'objectif de ces travaux est de déterminer ce que peut apporter à l'investigation l'utilisation de modèles numériques. Les études précédentes menées sur la combustion d'un matelas ne sont qu'un aspect de cette aide apportée dans l'étude d'un cas réel. Il manque en effet dans cette démarche l'étape de comparaison des simulations avec l'expertise humaine d'une scène d'incendie. C'est cette comparaison qui est effectuée dans ce paragraphe 5.2. Après une description détaillée de la scène d'incendie, le scénario le plus probable retenu après enquête sera présenté. Quatre scénarios seront ensuite simulés et comparés selon les méthodes décrites aux chapitres 3 et 4.

5.2.1 Scène d'incendie

5.2.1.1 Description du bâtiment

Le bâtiment construit en 1972 se compose d'un corps central et de deux ailes constituées d'un rez-de-chaussée haut et d'un rez-de-chaussée bas comprenant 62 appartements (appartement ou 2 pièces) sur un sous-sol à usage de réserves et locaux techniques.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

291. *Vue extérieure du bâtiment et de l'appartement sinistré au rez-de-chaussée haut*

L'établissement dispose des équipements techniques suivants :

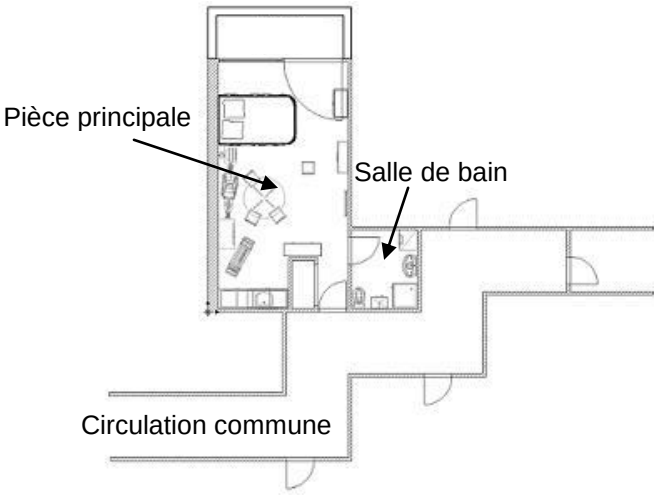
- Un éclairage de sécurité réalisé au moyen de blocs autonomes ;
- Un équipement d'alarme composé d'un matériel central (E.C.S.) disposé dans le bureau de la directrice. Les déclencheurs manuels et les détecteurs automatiques d'incendie sont raccordés sur ce tableau. Les déclencheurs manuels sont disposés dans les locaux communs et les détecteurs automatiques d'incendie dans les circulations horizontales des niveaux desservant les logements et dans le bâtiment central. Il n'existe pas de diffusion de l'alarme générale dans l'établissement. Seuls deux reports de l'alarme restreinte sont installés dans le logement du gardien et dans le logement de fonction.

Selon la réglementation incendie, l'immeuble est classable en logement-foyer pour la partie habitation et en établissement recevant du public pour les locaux communs.

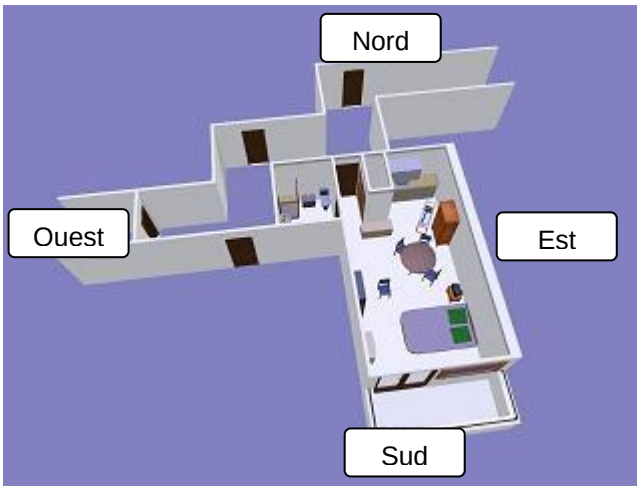
5.2.1.2 Description des locaux touchés par l'incendie

Un appartement et une partie de la circulation horizontale commune (voir les plans 292 et 293) ont été touchés par l'incendie. L'appartement est constitué d'une pièce principale de 30 m^2 environ et d'une salle de bain de 5 m^2. La pièce principale est équipée, sur son côté nord, d'un coin cuisine dont le plan de travail comporte un évier sur son côté ouest et deux plaques chauffantes électriques sur son côté est (voir l'image 296). Au centre de la pièce principale se trouvent une table ronde en bois ainsi que quatre chaises en bois dont l'assise et le dossier sont recouverts de tissus et de mousse d'ameublement. Entre le coin cuisine et la table sont placés un séchoir à linge et une armoire en contreplaqué. Un lit deux places est placé du côté sud de la pièce principale et, près de la tête du lit, il y a une table de nuit en bois sur laquelle est posée une télévision. En face du lit, une armoire est adossée contre le mur ouest de la pièce principale. Un balai et un aspirateur sont appuyés contre le meuble. Une double porte fenêtre ainsi que deux fenêtres coulissantes communiquent avec un balcon sur le côté sud de l'appartement. Les fenêtres équipées d'un double vitrage ont une armature en métal. La partie de la paroi extérieure côté sud, sous les fenêtres coulissantes, est construite en bois. L'éclairage de la pièce principale se fait à l'aide de deux lustres à cinq ampoules à incandescence, l'un situé entre le lit et la table ronde et l'autre près de la porte d'entrée, d'un lampadaire halogène positionné à proximité du lit et enfin d'un luminaire à une ampoule à incandescence suspendu dans le coin cuisine. La salle de bain est équipée d'un WC, d'un bac de douche, d'un lavabo surplombé d'un miroir et d'une machine à laver. La circulation horizontale commune de 1,8 m de large fait communiquer de nombreux appartements aux dimensions identiques à celles décrites précédemment. Des vasistas y sont positionnés à intervalles réguliers, l'un d'eux se trouve à 3,5 m directement en face de la porte d'entrée de l'appartement. Cette dernière, constituée de bois de 5 cm d'épaisseur environ, a généralement une bonne résistance au feu.
Une victime a été retrouvée entre la table de nuit et la table du coin cuisine à l'emplacement indiqué dans le schéma 292. Il s'agit de l'occupante des lieux, une octogénaire, qui est décédée après avoir inhalé une dose toxique de gaz de combustion.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



292. *Plan en 2D des lieux touchés par le sinistre (parties privée et commune)*



293. *Plan en 3D des lieux touchés par le sinistre (parties privée et commune)*

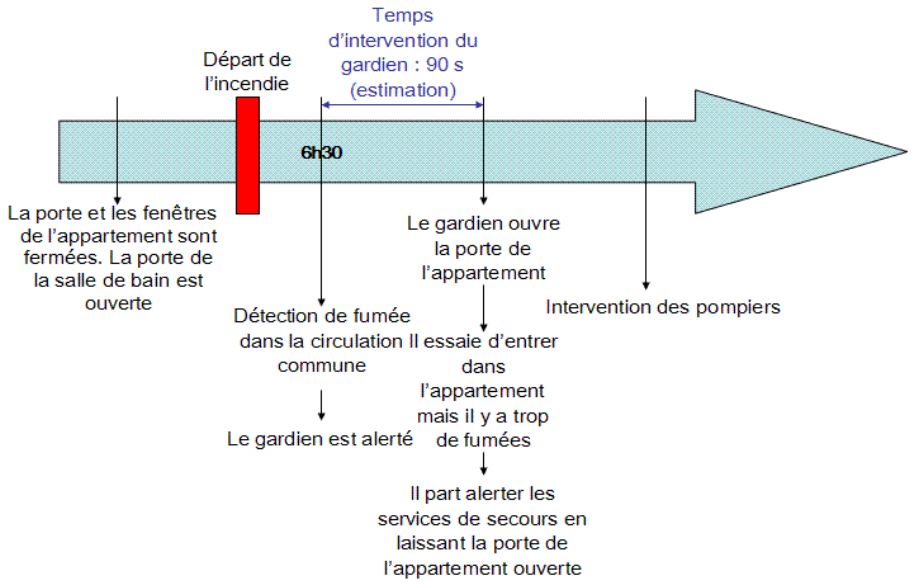
5.2.1.3 Chronologie des faits

Selon les éléments de conclusion de l'enquête [LABORATOIRE CENTRAL DE LA PREFECTURE DE POLICE 2006], l'incendie s'est déclaré dans un appartement situé au rez-de-chaussée haut de l'aile gauche et a provoqué le décès de son occupante.

Le gardien a été alerté à 6h30 par le report d'alarme restreinte après sensibilisation d'un détecteur automatique d'incendie situé dans la circulation desservant les logements. Le gardien s'est rendu immédiatement sur place afin d'identifier l'emplacement du sinistre. Ensuite, il a quitté la chambre pour alerter les secours extérieurs en omettant de refermer la porte du logement. Les fumées ont donc également envahi la circulation horizontale. Ces éléments sont récapitulés sur la figure 294.

Dès leur arrivée, les secours extérieurs ont constaté que :

- les fumées avaient envahi la circulation horizontale commune du rez-de-chaussée haut de l'aile gauche ainsi que le hall servant de salle d'activités ;
- les occupants des appartements mitoyens n'avaient pas évacués mais s'étaient réfugiés sur leurs balcons.

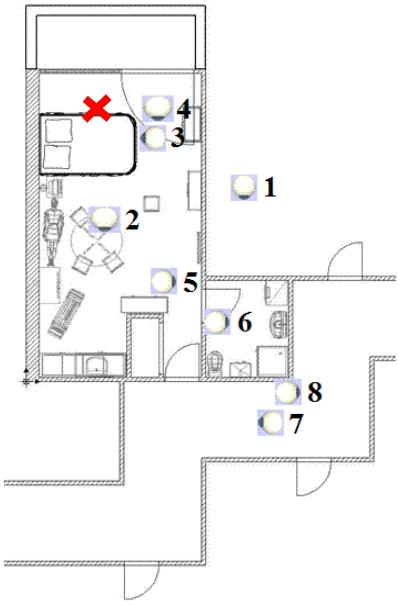


294. *Chronologie supposée de l'incendie*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.1.4 Analyse de la scène d'incendie

Dans ce paragraphe, la scène d'incendie va être analysée en s'appuyant sur huit photos. La direction et le sens des prises de vue sont indiqués par les yeux disposés sur le plan 295.



295. *Direction des photographies indiquée par l'œil – Le chiffre 1 sur le plan correspond à la photo 296, 2 à 297, 3 à 298, 4 à 299, 5 à 300, 6 à 301, 7 à 302 et 8 à 303*

La photo 296 a été prise dans l'appartement voisin de celui qui a été sinistré. Elle montre l'agencement du coin cuisine avant l'incendie. Il faut rappeler que le bâtiment est du type foyer logement. Par conséquent, seuls les équipements généraux sont communs d'un appartement à l'autre, les locataires ont ensuite le droit d'équiper leur logement de tous les mobiliers qu'ils jugent nécessaire et cela sans aucune restriction sur la charge calorifique maximale acceptée. Cette photo permet notamment d'observer la nature des placards de la cuisine, du bois aggloméré recouvert d'une fine couche de bois peint pour donner la couleur blanche. Sur la gauche de la photo, il est important pour la suite de remarquer un interphone, deux interrupteurs pour actionner les stores de l'appartement et un interrupteur double. Ils sont fixés sur l'avancée de mur séparant le coin cuisine de l'entrée de l'appartement. Aucun dispositif de hotte ou de ventilation mécanique contrôlée n'est installé dans le coin cuisine.

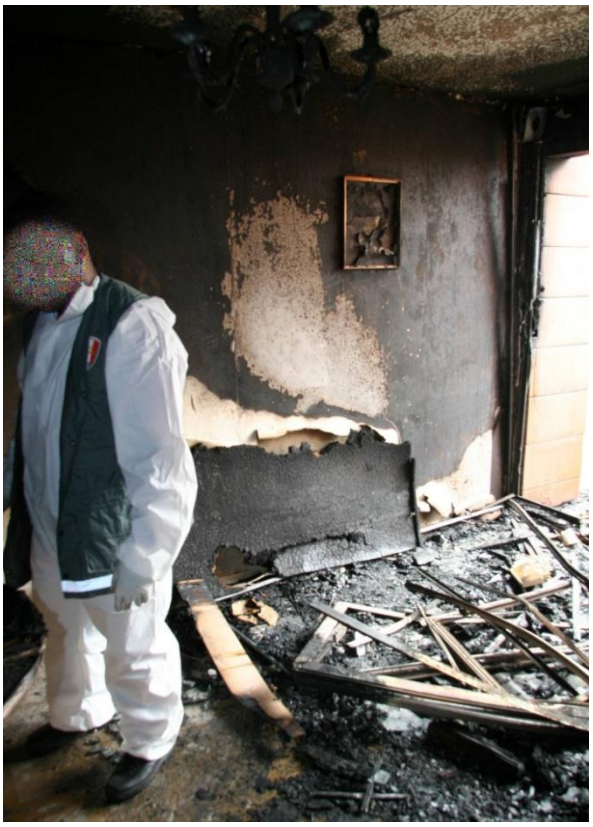
La photo 297 est une vue de l'appartement sinistré prise selon le même angle que celui de la photo 296. Elle permet une comparaison avant/après des éléments communs entre les deux appartements. Ainsi, sur la gauche de la photo, l'interphone, les interrupteurs pour actionner les stores de l'appartement et l'interrupteur double qui sont fixés sur l'avancée de mur ont été dégradés. Les placards au-dessus de l'évier ont été endommagés par l'incendie. Leurs fines couches de bois peint sont carbonisées et se sont décollées du bois aggloméré qui présente également de légères traces de carbonisation sur les parties verticales. Les placards en partie basse sous l'évier ne sont pas dégradés par l'incendie : seul un dépôt de suie est remarqué sur leur moitié supérieure.
Les tissus étendus sur le séchoir (serviette et sous-vêtement en coton et serpillière) ont bruni sous l'effet combiné des suies et de la chaleur des gaz chauds mais aucune trace de combustion n'est observée. La partie supérieure de l'armoire sur la droite de la photo présente de légères traces de combustion, le reste étant uniquement noirci par le dépôt de suie. Le tissu de la partie supérieure du dossier des chaises affiche de légères traces de combustion. Divers éléments plastiques posés sur la table sont déformés ou ont totalement fondu alors que des serviettes en papiers sont complètement carbonisées. Les éléments en verre sont intacts. D'après le dépôt de suie sur les meubles et les parois ainsi que la dégradation de ces mêmes meubles, une stratification des fumées est atteinte à 60 cm du sol dans la pièce principale de l'appartement.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

296. *Vue d'ensemble de la cuisine de l'appartement voisin de l'appartement sinistré*

297. *Vue d'ensemble de la cuisine de l'appartement sinistré*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



298. *Vue de la tête de lit et du mur contre lequel il était disposé*

Sur le centre du bas de la photo, les restes du lit sont visibles. La partie verticale de sa tête est encore pratiquement entière bien que la face opposée au mur (celle qui fait donc face au photographe) soit carbonisée en profondeur. Les deux tiers du montant gauche du lit sont quasiment intacts.

L'enchevêtrement de barres à l'emplacement du lit provient des débris métalliques des armatures des fenêtres. Les pompiers ont brisé les deux fenêtres coulissantes, la paroi en bois sous ces dernières et la double porte fenêtre afin de faciliter l'intervention et l'évacuation des fumées et également dans le but d'écarter un risque de reprise du foyer.

Deux zones beaucoup plus claires sont observables en haut à droite de la photo sur le plafond ainsi qu'au centre sur la paroi verticale. Elles correspondent aux zones les plus chaudes des parois, là où les suies ont été dégradées après leur dépôt. Cela permet d'y situer un foyer primaire ou secondaire de forte intensité. Sur la majorité de la paroi verticale contre laquelle la tête de lit est appuyée, le papier peint s'est consumé et des suies se sont déposées.

Au plafond, le lustre métallique n'est pas déformé mais seulement noirci par les suies. Les cinq douilles électriques du lustre sont fondues sur le même côté (cf. photos en annexes), certainement celui qui faisait face au foyer donc au lit. Il n'est pas possible de savoir avec précision dans quelle direction était dirigé le lustre car sa chaîne de soutien s'est légèrement vrillée sous l'effet de la chaleur.

299. *Vue des mobiliers disposés entre le lit et la cuisine*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Sur la droite de la photo 299, les débris du lit sont encore observables. À gauche de la tête de lit se trouve une table de nuit sur laquelle sont posés les restes d'un téléviseur. Une moitié du côté droit du meuble ainsi que la totalité de la tablette horizontale supérieure et une partie de la face avant sont carbonisés. La profondeur de carbonisation permet d'envisager une sollicitation thermique plus élevée sur le côté droit, adjacent au lit, et de supposer une propagation de la droite vers la gauche de la photo. Le téléviseur est, quant à lui, totalement brûlé. Seuls les matières métalliques et quelques rares circuits imprimés sont retrouvés. Lors de l'intervention des pompiers, l'ensemble constitué par la table de nuit et le téléviseur a été déplacé sur le balcon. Il a ensuite été replacé par les enquêteurs à l'emplacement indiqué par les pompiers et ajusté par rapport aux marques de dépôt de suie au sol. C'est pourquoi, sur la photo, le fil d'antenne qui passe derrière la table de nuit et qui traverse devant la tête de lit est intact. Ce fil était caché derrière la tête de lit au moment du sinistre et a été protégé d'une dégradation due au contact des flammes. Il est en de même pour la protection d'une prise multiple et d'une petite poubelle retrouvées derrière la table de nuit (voir les photos 421 et 424 en annexes).
Au centre du premier plan de la photo se trouve une chaise dont les dégradations sont intéressantes à étudier. Cette dernière a été replacée dans la pièce en fonction des traces de dépôt de suie laissées sur le sol. Le premier détail à remarquer est que les pieds en bois ne sont absolument pas endommagés, le vernis n'étant même pas cloqué alors que le lit situé seulement à quelques dizaines de centimètre a été pratiquement totalement consumé. Cela dénote une sollicitation thermique très faible voire inexistante sur la partie basse de la chaise qui a été protégée du rayonnement thermique des flammes et des fumées. Au contraire, la partie verticale en bois du dossier a commencé à être très légèrement dégradée par l'effet conjugué de la couche de fumée et des flammes provenant de la combustion de l'assise. En effet, le tissu de cette dernière est noirci sur la majorité de sa surface (excepté là où un vêtement était probablement posé) et la mousse est même fortement attaquée sur le côté droit de la chaise. Cela permet donc d'avancer l'hypothèse d'une sollicitation thermique supérieure du côté dirigé vers la tête de lit et d'une légère propagation des flammes de la droite vers la gauche de la photo (direction indiquée par la flèche rouge). Pour le dossier de la chaise, les dégradations sont légèrement inférieures par rapport à celles de l'assise, mais l'hypothèse d'une sollicitation thermique supérieure du côté dirigé vers la tête de lit est confirmée. Le reste de la photo comporte moins d'éléments remarquables exceptée la non-dégradation des pieds en bois de la table et des autres chaises.

300. *Vue de la salle de bain depuis la pièce principale de l'appartement*

301. *Vue de la salle de bain*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les photos 300 et 301 sont une vue extérieure de la salle de bain prise depuis la pièce principale et une vue intérieure. L'hypothèse selon laquelle la porte de la chambre de bain était ouverte pendant l'incendie est fortement probable. Les chaussures en cuir et en plastique, le paillasson et le chausse-pied reposant sur le sol à droite de l'encadrement de porte dans l'entrée de l'appartement n'ont pas été dégradés au cours de l'incendie. La cruche et le récipient en étain sur le radiateur sont intacts. Au sol, à droite du radiateur, une baguette de protection utilisée pour cacher les fils électriques a été déformée et est tombée du plafond. Le fil électrique qu'elle protégeait est celui qui pend à mi-hauteur de la porte de la salle de bain. Les températures des fumées atteintes juste sous le plafond étaient donc de nature à dégrader l'élément plastique de protection. À droite de l'encadrement de la porte, un interrupteur et une prise de courant sont légèrement endommagés.

Comme sur la photo 300, les éléments au sol de la vue 301 sont intacts tout comme les serviettes suspendues à la droite du lavabo. Le rideau de douche, fait de plastique très fin, est tombé suite à la sollicitation thermique. Les dégâts observés sur la machine à laver et en particulier son couvercle sont négligeables. La tablette en plastique sous le miroir est quant à elle complètement déformée.

Sur les photos 300 et 301, aucun foyer n'est constaté.

Les photos 302 et 303 ont été prises dans la circulation horizontale commune. Les dépôts sur les murs témoignent d'une stratification parfaite des fumées sur toute la longueur du couloir jusqu'à ce que leur progression soit stoppée par les portes d'encloisonnement des escaliers. La différence de température entre les fumées et l'air du couloir était suffisante pour que le déversement des fumées d'un local à l'autre n'ait pas d'influence notable sur la stratification. Sur les deux photos, les luminaires sont parfaitement intacts et sont même encore en état de fonctionner. Un puzzle encadré est suspendu sur le mur du fond de la photo 302. Le film plastique plaqué verticalement contre le puzzle est fondu à mi-hauteur du cadre, une dizaine de centimètre au-dessus de la limite inférieure du dépôt de fumée. L'interrupteur et la sonnette à gauche de la porte de l'appartement sinistré sont intacts, tout comme ceux de l'appartement voisin sur la photo 303. Sur cette dernière, le bloc autonome d'éclairage de sécurité est encore en fonctionnement et n'est pas du tout dégradé.

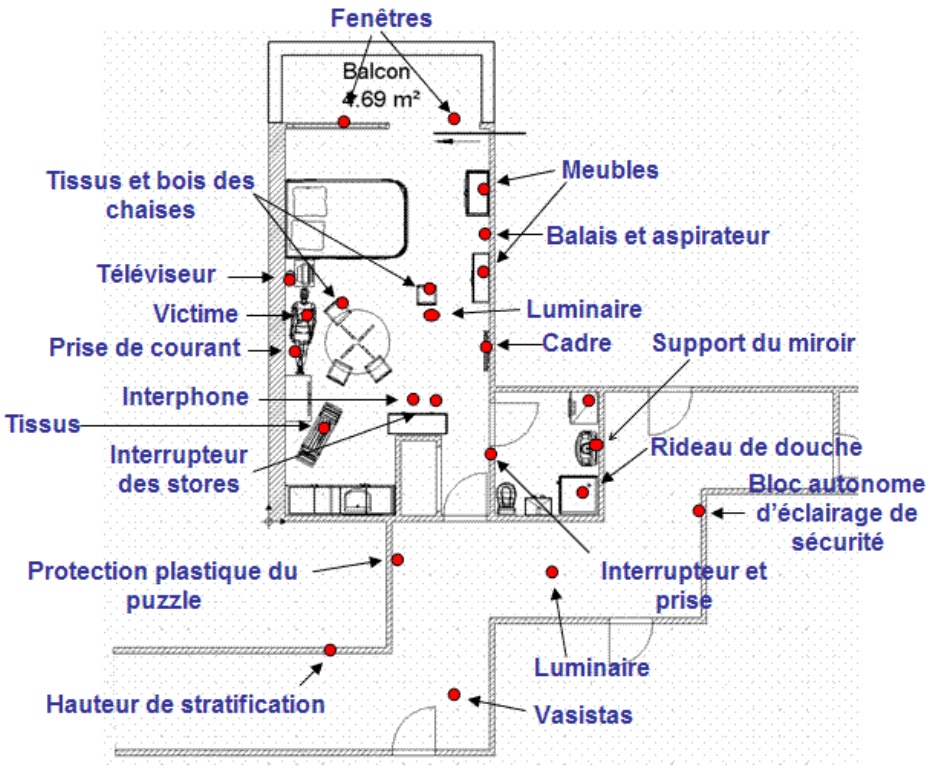
Sur les photos 302 et 303, aucun foyer n'est constaté.

302. *Vue de l'entrée de l'appartement depuis la circulation commune*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

303. *Vue de la circulation commune*

Lors de cette analyse de la scène d'incendie, il n'a pas été indiqué explicitement tous les éléments qui peuvent être utilisés comme points de comparaison entre la simulation et les lieux du sinistre. Ils sont pourtant nombreux. La figure 304 se propose d'en lister une partie. Tous n'y sont pas indiqués, et tous ne seront pas utilisés pour confronter les simulations aux dégradations constatées sur les lieux du sinistre.



304. *Échantillon de points de comparaison envisageables*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.1.5 Scénario retenu après enquête

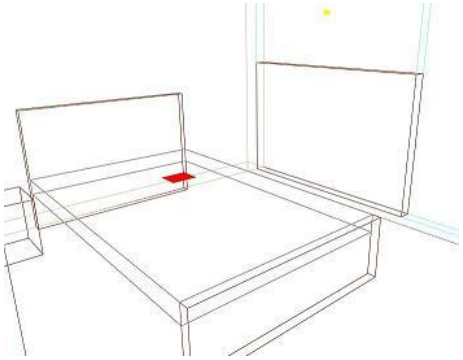
Au regard :

- des dégradations de la literie qui a été totalement consumée mise à part la tête du lit et le montant gauche ;
- des légères dégradations sur la chaise à côté du lit qui témoignent d'une inflammation locale et de courte durée de l'élément ;
- des traces de carbonisation sur la table de nuit et le sens des profondeurs de carbonisation les plus importantes qui sont orientés du lit vers la cuisine ;
- des légères traces de carbonisation sur les meubles du coin cuisine ;
- des dégradations ailleurs dans l'appartement et la circulation horizontale commune qui sont uniquement la conséquence de l'effet des fumées ou du rayonnement ;

les investigateurs ont situé l'origine de l'incendie au niveau de la literie.

De plus, l'incendie a vraisemblablement été causé par la chute d'un lampadaire halogène sur cette literie. En effet, l'examen électrique a mis en évidence la présence d'un perlage caractéristique d'un amorçage d'arc électrique situé au niveau de l'articulation du lampadaire. Ce perlage permet de conclure que le lampadaire était sous tension au moment des faits. Il est envisagé, d'après les témoignages, qu'il était également en fonctionnement [BABRAUSKAS 2003]. La vasque et le pied du lampadaire ont été fortement corrodés et le réflecteur de la vasque a disparu. L'écran de protection a été déformé et porte une goutte de métal fondu, de l'aluminium, sur l'un des étriers de fixation. Le lampadaire halogène a été exposé à de fortes températures, qui ont pu être atteintes uniquement au niveau de la literie, point d'origine de l'incendie. Or, sur la surface extérieure du verre de protection (verre trempé en général) d'un lampadaire, les températures atteignent des valeurs comprises entre 200 °C et 354°C selon les modèles [LETEURTROIS 2005]. Ces températures engendrent un risque d'inflammation quasi instantanée pour tout matériau inflammable léger qui entre en contact avec la surface de ce verre. Les photos prises lors de l'analyse en laboratoire du lampadaire halogène sont disponibles en annexe. L'emplacement approximatif où ont été retrouvés les restes du lampadaire halogène est indiqué par la croix rouge sur le plan 295.

En s'appuyant sur les dégradations observées sur les parois à proximité du lit (voir la photo 298), l'origine du foyer a été située approximativement vers le centre du matelas (voir la surface rouge sur l'image 305).



305. *Vue smokeview de l'emplacement de l'origine supposée de l'incendie*

Cet incendie a été choisi comme cas d'études pour plusieurs raisons. La première est que la chronologie des évènements est partiellement connue, notamment grâce à la sensibilisation de la détection dans la circulation horizontale commune et du témoignage du gardien suite à son intervention. Une inconnue dans le scénario est le temps que les fumées auront mis pour sortir de la chambre et sensibiliser la détection. Cependant, il va être intéressant d'étudier si la modélisation peut amener une réponse à ce point précis. La seconde raison pour avoir choisi cet incendie est que l'hypothèse sur l'origine du sinistre est fortement probable. La cause du sinistre est connue avec un peu moins de certitude, mais cette hypothèse est également très probable. La dernière raison concerne l'état des lieux tels qu'ils ont été retrouvés. En effet, du fait de la présence d'une victime, le

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

déblai effectué par les pompiers a été très restreint. De plus, comme des conditions d'embrasement généralisé n'ont pas été atteintes dans l'appartement, les dégâts sont limités. Il est donc possible de travailler en utilisant les points de comparaison sur une surface de moins de 50 m^2 ce qui est important au regard des temps de calcul.

5.2.2 Reconstitution numérique de divers scénarios d'incendie

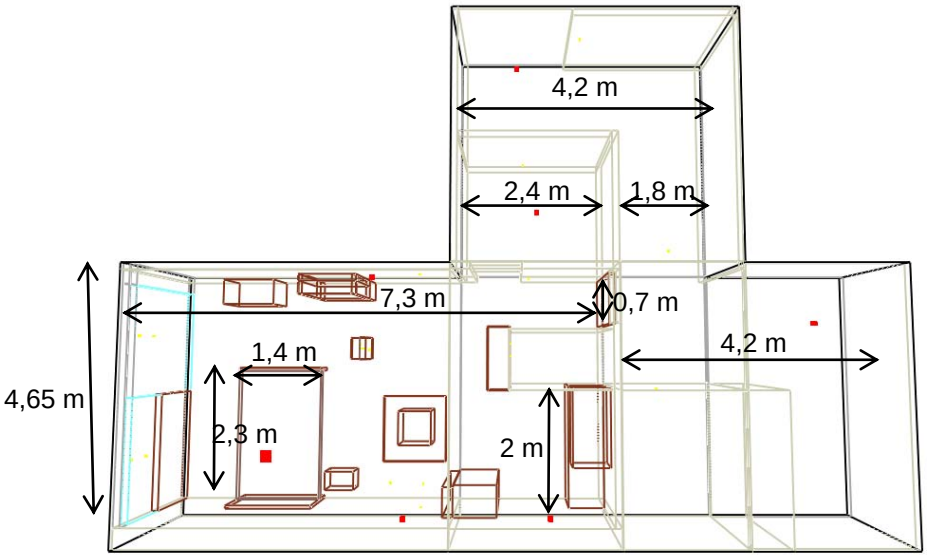
5.2.2.1 Scénarios simulés

Le scénario avancé lors de l'enquête des investigateurs du Laboratoire Central de la Préfecture de Police est la chute d'un luminaire halogène sur la literie. Cette hypothèse a été déterminée avec de grandes certitudes suite à l'observation de la scène d'incendie et l'analyse en laboratoire du luminaire incriminé. Ce paragraphe présente la reconstitution de ce scénario en utilisant FDS. Pour confronter les simulations du développement d'un incendie à des points de comparaison relevés sur le sinistre réel, quatre hypothèses ont été reconstituées :

- Un départ de feu entre le lit et le mur extérieur reconstituant la chute au sol d'un rideau enflammé
- Un départ de feu sur le lit comme cela a été avancé par l'enquête
- Un départ de feu sur le lit en utilisant un accélérant
- Un départ de feu dans la cuisine au niveau des plaques de cuisson

5.2.2.2 Stratégie de simulation

Les dimensions des locaux et des principaux éléments mobiliers sont indiquées sur la figure 306. La hauteur sous plafond est de 2,5 m, la hauteur de porte de 2 m et la hauteur d'allège de la fenêtre de 1,3 m. La face supérieure du matelas est placée à 45 cm du sol.

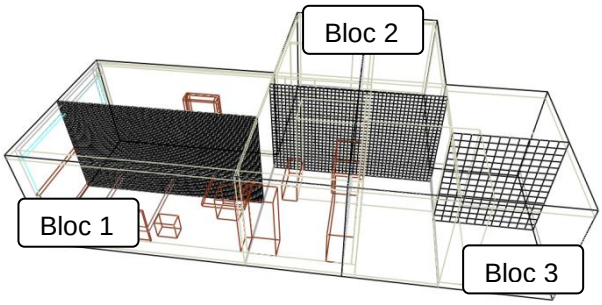


306. *Dimensions des locaux et des principaux éléments mobiliers*

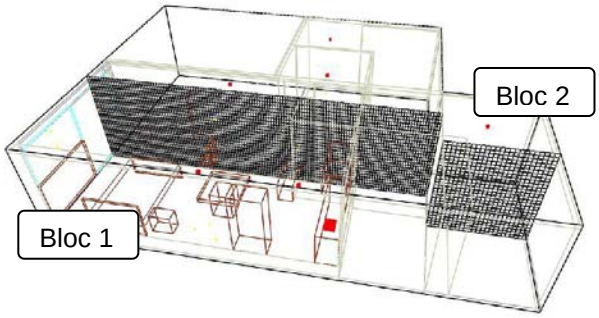
Le maillage est identique pour toutes les simulations sauf celle dont le départ de feu est situé dans la cuisine. Il est constitué de trois blocs (voir l'image 307). Le premier englobe les trois-quarts de la pièce principale de l'appartement. Les cellules de ce bloc mesurent 5 x 3,3 x 5 cm^3 ce qui correspond à un R^* de l'ordre de 0,05. Le bloc 2 maille les volumes constitués par le coin cuisine, la salle de bain et une partie de la circulation horizontale commune. Les cellules de ce bloc mesurent 10 x 10 x 10 cm^3. Et enfin, le bloc 3, qui a des cellules de 20 x 20 x 18 cm^3, maille la dernière partie de la circulation horizontale commune. Ce maillage respecte les conditions établies au chapitre 3 pour ce qui concerne la taille de maille, le rapport de forme des mailles, le saut de taille de maille au passage d'une frontière et la position des frontières. Pour le cas du départ de feu dans la cuisine, le maillage n'est plus

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

constitué que de deux blocs. Le premier maille l'ensemble de l'appartement ainsi qu'une partie du couloir. Il a des cellules de 5 x 7 x 10 cm^3 dans la pièce principale de l'appartement et 10 x 7 x 10 cm^3 dans la salle de bain et le couloir. Le bloc 2 maille la dernière partie du couloir avec des cellules de 10 x 10 x 10 cm^3.



307. *Maillage utilisé pour les simulations des scénarios départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant et après la chute d'un rideau enflammé*



308. *Maillage utilisé pour la simulation du départ de feu dans la cuisine*

Lors de l'enquête, les investigateurs ont déterminé que le détecteur dans le couloir avait été sensibilisé après que les fumées soient passées de l'appartement vers la circulation horizontale commune par les fuites entre la porte d'entrée de l'appartement et son encadrement. Aucune fonction spéciale de FDS4 ne permet de simuler de telles fuites. Ceci peut être considéré comme une limitation de la reconstitution. En effet, l'apport en comburant vers le foyer dépend directement de ces fuites puisque la porte est ouverte 90 s après la sensibilisation de la détection. Le régime de combustion du foyer peut donc être différent selon le moment où la détection est sensibilisée et, par conséquent, la porte ouverte. Pour simuler ces fuites, le choix a été fait de laisser un vide de quelques cellules entre la porte et le mur au-dessus de la porte. Plusieurs configurations de positionnement et de surface du trou ont été testées, certaines menant même à des résultats aberrants. La solution retenue est un trou de 10 cm de hauteur parcourant toute la largeur du sommet de la porte. Cette surface peut paraître élevée pour des fuites au niveau de la porte. Il faut cependant savoir que ce sont les seules fuites prises en compte dans le calcul et que la surface de fuite représente moins de 1% de la surface totale des murs de la pièce.

Le détecteur de fumée est placé dans le couloir à 3 m en face de la porte d'entrée de l'appartement. 90 s après qu'il soit sensibilisé, l'obstruction simulant la porte est enlevée des calculs.

Pour les quatre simulations, les seuls matériaux combustibles considérés sont du bois et de la mousse d'ameublement. Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 309. La table, les meubles et la paroi du mur extérieur ont les caractéristiques définies pour le bois. Ceci est une limitation de la simulation car tous les meubles ne sont pas constitués du même type de bois. Leurs caractéristiques et en particulier la température d'auto-inflammation varient en réalité d'un élément à l'autre. À titre d'exemple, la température d'inflammation d'un contreplaqué est donnée à 368 °C [BABRAUSKAS 2003] alors que, pour un bois, elle varie de 287 à 402 °C selon la nature de l'essence et son histoire (âge, cycle de température, humidité, etc.). La même problématique existe pour la mousse d'ameublement définie pour le matelas et les chaises. Une solution aurait été de prélever et de tester l'ensemble des matériaux mais cette solution est très coûteuse. De plus, il ne restait pas assez de mousse de la literie pour pouvoir effectuer des prélèvements car elle était presque entièrement consumée. Il y avait une quantité de mousse juste suffisante pour arriver à déterminer la nature du matelas (mousse, laine, latex, etc.)

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

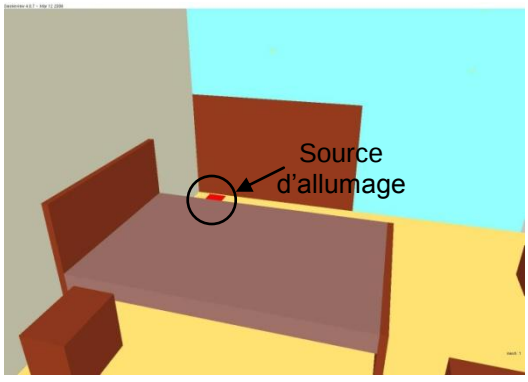
	Mousse d'ameublement	Bois
Masse volumique du matériau vierge (kg.m^{-3})	40	450
Masse volumique de la phase charbon (kg.m^{-3})	/	120
Température d'inflammation (°C)	280	360
Épaisseur (m)	0,1	0,028
Fraction massique d'eau contenue dans le matériau (kg/kg)	0	0,01
Enthalpie de vaporisation (kJ.kg^{-1})	1 500	500
Enthalpie de combustion (kJ.kg^{-1})	30 000	21 544
Capacité thermique massique du matériau vierge (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	0,3225	1,2 à 20 °C 3 à 500 °C
Capacité thermique massique de la phase charbon (kJ.kg^{-1}.K^{-1})	/	0,68 à 20 °C 1,5 à 400 °C 1,8 à 900 °C
Conductivité thermique du matériau vierge (W.m^{-1}.K^{-1})	0,1	0,13 à 20 °C 0,29 à 500 °C
Conductivité thermique de la phase charbon (W.m^{-1}.K^{-1})	/	0,077 à 20 °C 0,16 à 900 °C

309. *Caractéristiques matériaux du bois et le mousse d'ameublement*

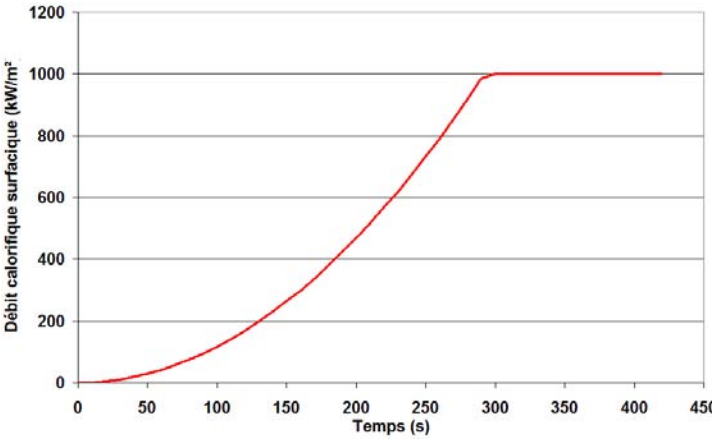
5.2.2.3 Départ de feu après la chute d'un rideau enflammé

L'hypothèse envisagée dans cette simulation est la chute sur le sol d'un rideau enflammé entre le lit et la paroi en bois du mur extérieur (voir la surface rouge sur l'image 310). Ce scénario est fréquemment rencontré lors d'enquêtes post-incendie. Dans la configuration de l'appartement, les rideaux auraient pu être enflammés suite au contact du tissu avec une surface chaude telle que l'ampoule ou le verre de protection d'un luminaire halogène ou suite à une intervention extérieure accidentelle.

Dans les calculs, cette source est modélisée par un brûleur d'une surface carrée de 0,18 m de côté. Le débit calorifique surfacique qui est imposé à ce brûleur est tracé dans le graphique 311. Après une croissance moyenne en at^2 du débit calorifique surfacique, une valeur constante de 1 000 kW.m^{-2} est imposée jusqu'à 420 s. Pour ce scénario, le débit calorifique surfacique imposé après la phase de croissance est la valeur minimale pour atteindre une propagation des flammes à partir du brûleur. Ce choix est justifié par les résultats obtenus au chapitre 3.



310. *Emplacement de la source d'allumage dans la simulation*



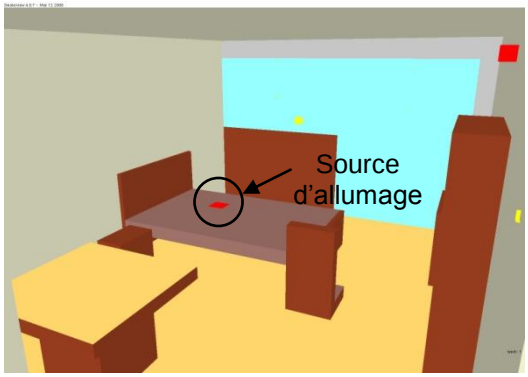
311. *Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

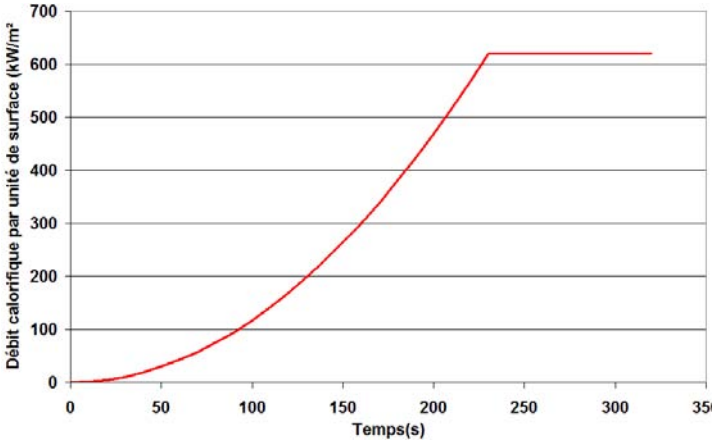
5.2.2.4 Départ de feu sur le lit

Ce scénario est celui qui a été avancée lors de l'investigation post-incendie, c'est-à-dire une inflammation de la literie suite à la chute d'un lampadaire halogène sur la face supérieure du matelas. L'allumage est modélisé par un brûleur d'une surface carrée de 0,2 m de côté située environ au centre du lit (voir l'image 312). Le débit calorifique surfacique imposé à ce brûleur est tracé dans le graphique 313. Après une croissance moyenne en αt^2 du débit calorifique surfacique, une valeur constante de 620 $kW.m^{-2}$ est imposée jusqu'à 320 s.

Pour ce scénario, le débit calorifique surfacique constant imposé après la phase de croissance est la valeur minimale pour atteindre une propagation des flammes à partir du brûleur. Ce choix est justifié par les résultats obtenus au chapitre 3.



312. *Emplacement de la source d'allumage dans la simulation*

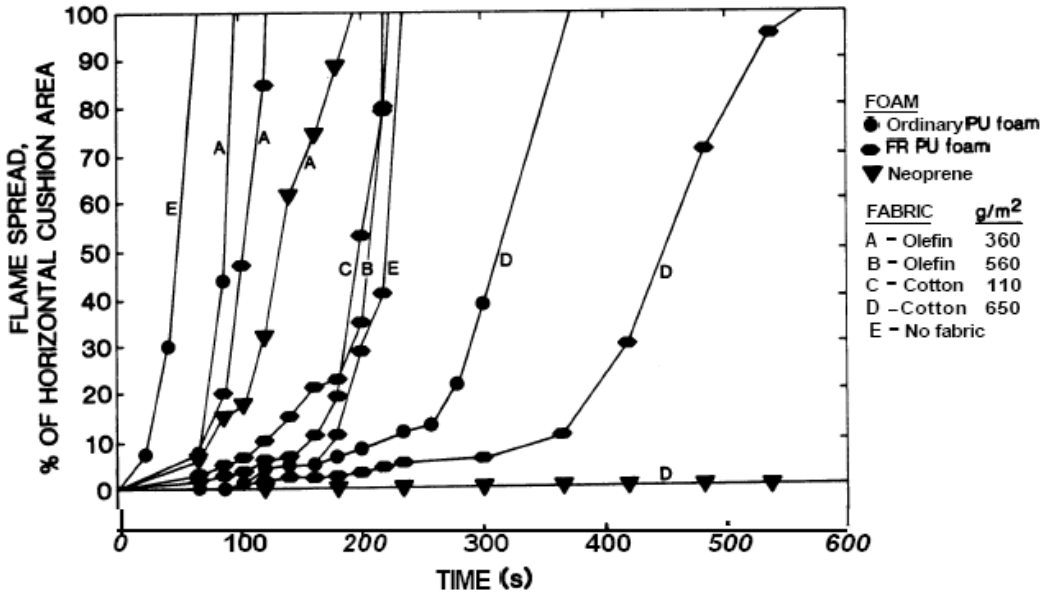


313. *Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage*

De tous les scénarios simulés, celui-ci illustre le mieux les limites de la modélisation d'une source d'allumage. Lorsque le luminaire halogène est renversé sur le lit, l'inflammation de la literie se fait en réalité par conduction de chaleur suite au contact du verre de protection de la lampe avec la mousse ou les draps. Cette phase de transfert thermique par conduction n'est donc pas prise en compte dans la simulation car un débit massique de combustible est imposé directement sur la surface du brûleur. L'inflammation de la surface du brûleur est donc déjà effective dès le début de la simulation et la phase d'échauffement local à partir du luminaire n'est pas considérée.

De plus, le matelas du lit dans la simulation n'est constitué que d'un unique matériau, à savoir la mousse polyuréthane. Les draps, les couvertures ou les couettes ne sont par conséquent pas pris en compte dans les calculs. Cependant, la présence de draps et leurs compositions ont une forte influence sur la vitesse de propagation des flammes à la surface du combustible et donc sur le débit calorifique. Ceci est illustré par le graphique 314 [BABRAUSKAS 1985]. Sur celui-ci, l'ensemble de la surface d'un coussin est enflammé en moins de 100 s pour une mousse PU ordinaire sans revêtement. Lorsque cette mousse est recouverte d'un revêtement en coton de masse surfacique de 110 ou 650 g/m^2, la totalité de la surface est enflammée respectivement après environ 200 ou 375 s. L'évolution temporelle du débit calorifique se trouve donc fortement modifiée selon qu'un revêtement placé sur la mousse soit considéré ou non.

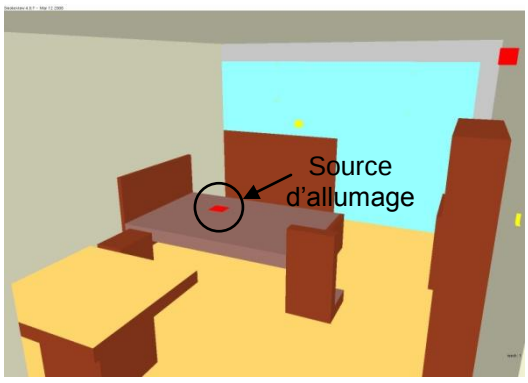
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



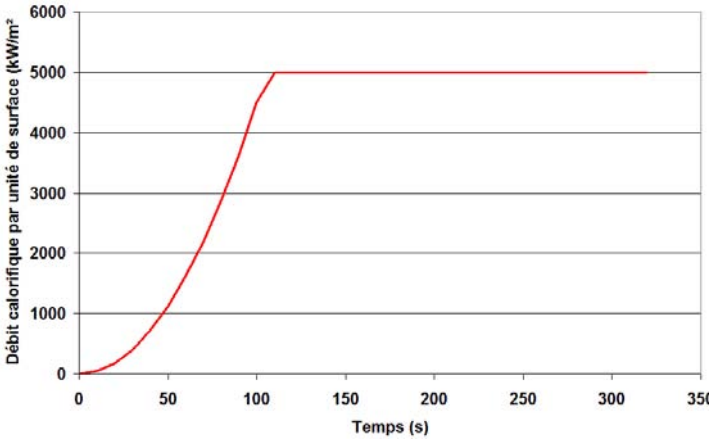
314. *Propagation des flammes sur la surface de l'assise d'un fauteuil avec quatre revêtements de coussin (tissus à base d'alcène de masse surfacique 360 ou 560 g/m^2, de coton de masse surfacique 110 ou 650 g/m^2 et aucun revêtement) pour trois types de mousse (polyuréthane ordinaire, polyuréthane ignifugé et néoprène) [BABRAUSKAS 1985]*

5.2.2.5 Départ de feu sur le lit avec un accélérant

Ce scénario a été testé pour évaluer la capacité des simulations FDS à permettre d'aider un investigateur à privilégier une hypothèse parmi deux scénarios ayant, à un emplacement identique, deux types différents d'allumage. En effet, il est effectué sur le lit au même endroit que pour le scénario précédent (voir l'image 315), mais le débit calorifique surfacique prescrit pour le brûleur est supérieur (voir le graphique 316). Ainsi, après une croissance ultra-rapide en αt^2 du débit calorifique surfacique, une valeur constante de 5 000 kW.m^{-2} est imposée jusqu'à 320 s. La valeur constante du débit calorifique surfacique a été déterminée en considérant qu'environ 1 l d'essence est déversé sur une petite surface du matelas de 0,04 m^2. Cependant, ceci est une approximation car l'essence est ici absorbée par la mousse. Le débit massique surfacique du combustible est donc différent dans cette configuration des valeurs bibliographiques disponibles lorsque l'essence est l'unique combustible et qu'elle est contenue dans un bac. Il en est de même pour la croissance ultra-rapide en αt^2.



315. *Emplacement de la source d'allumage dans la simulation*



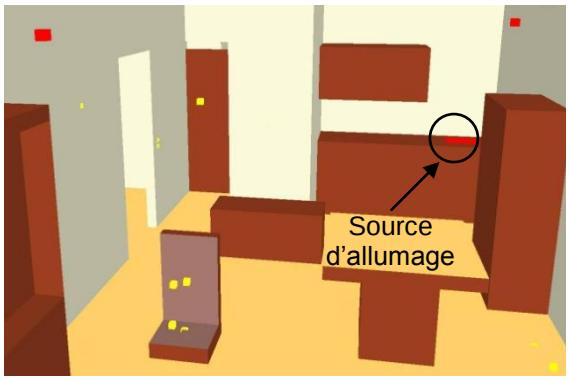
316. *Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

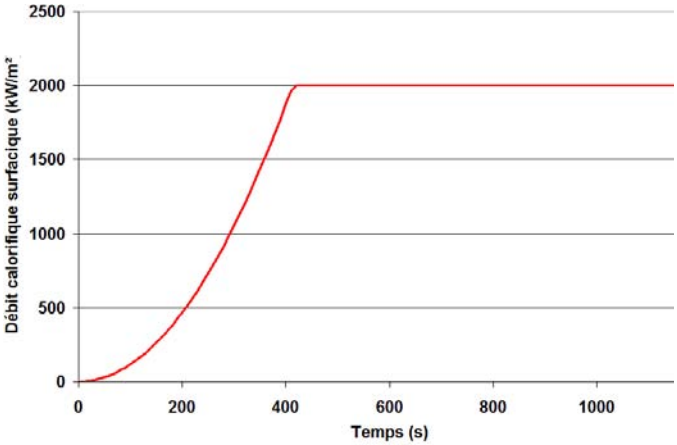
5.2.2.6 Départ de feu dans la cuisine

Les accidents dans les cuisines sont fréquents. Ce dernier cas est donc classiquement rencontré dans les scénarios d'incendies. L'allumage est modélisé par un brûleur de 0,12 m^2 disposé à l'emplacement des plaques de cuisson (voir l'image 317). Le débit calorifique surfacique tracé dans le graphique 318 est imposé sur la surface du brûleur. Après une croissance moyenne en αt^2, le débit calorifique surfacique est stabilisé à une valeur de 2 000 $kW.m^{-2}$ pour un temps de 1 200 s.

Pour ce scénario, le débit calorifique surfacique constant imposé après la phase de croissance est la valeur minimale pour atteindre une propagation des flammes à partir du brûleur. Ce choix est justifié par les résultats obtenus au chapitre 3.



317. *Emplacement de la source d'allumage dans la simulation*



318. *Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage*

5.2.3 Choix du scénario le plus probable

Dans la suite de ce paragraphe, le scénario le plus probable est recherché parmi les quatre proposés en comparant les résultats des simulations aux observations faites sur la scène d'incendie. Pour cette comparaison, plusieurs paramètres sont étudiés : le débit calorifique, la température en plusieurs points, la hauteur de libre de fumée, etc.. Dans la démarche d'utilisation des points de comparaison pour confronter simulations et sinistre, la quantité de valeurs de sollicitation thermique concordantes nécessaires pour qu'un scénario soit validé ou non n'a pas encore été déterminée. Au paragraphe 5.2.1.4, une trentaine de points de comparaison ont été listés. Seule une petite partie est interprétée par la suite pour illustrer la démarche de validation avancée au chapitre 4. Si cette démarche de validation est jugée comme applicable, il restera à déterminer à partir de quels écarts les sollicitations thermiques peuvent être jugées comme concordantes et comment valider un scénario à partir des points de comparaison concordants et divergents.

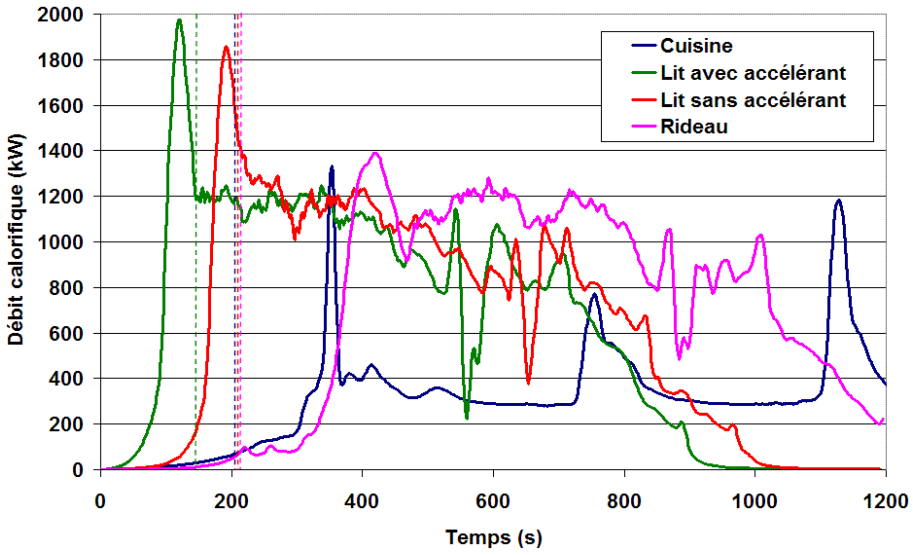
5.2.3.1 Débit calorifique dans le domaine de calcul

Le débit calorifique n'est pas une quantité directement utilisable dans la démarche de validation mettant en œuvre des points de comparaison. Lors de campagnes expérimentales, il peut être mesuré par une méthode basée sur la consommation d'oxygène. Mais si aucun dispositif de mesure n'est installé, il est impossible de comparer cette quantité aux simulations puisque elle ne peut pas être facilement reliée à une sollicitation thermique ou à un point de comparaison. Cependant, le débit calorifique est une quantité qui se révèle utile pour la comparaison de différents scénarios simulés entre eux.

Le débit calorifique est tracé en fonction du temps dans le graphique 319 pour chacun des quatre scénarios évalués. Pour les deux scénarios simulant un départ de feu sur le lit, les courbes sont assez semblables excepté le retard de 70 s du cas n'ayant pas d'accélérant. Le maximum de débit calorifique atteint est également légèrement différent avec 1 975 kW à 122 s pour le cas avec

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

accélérant pour une durée d'incendie[32] de 860 s et 1 840 kW à 194 s pour le cas sans accélérant pour une durée d'incendie de 880 s. Les sollicitations thermiques résultant de ces deux simulations seront donc vraisemblablement très proches. Ce qui différencie ces deux scénarios est la valeur de la puissance imposée au brûleur d'allumage. Les écarts dans les simulations pouvant en résulter ont été évoqués précédemment (cf. chapitre 3). Dans cette configuration, l'ouverture de la porte et donc la ventilation du foyer sont asservies à une détection de fumée. La détection dépend directement de l'évolution du feu, c'est pourquoi il y a si peu de différences entre les deux scénarios de départ sur le dessus du lit avec ou sans accélérant.
Avec le scénario de la chute du rideau enflammé, la propagation du foyer est plus lente que lorsque le départ de feu est situé sur le lit. Le maximum de débit calorifique est obtenu avec 1 400 kW à 423 s pour une durée d'incendie de 1 100 s. L'incendie dure donc plus longtemps pour ce scénario. Lorsque le feu est développé, avant la phase de décroissance, le débit calorifique est de l'ordre de 1 200 kW, comme pour les deux scénarios précédents. Les sollicitations thermiques résultant de cette simulation seront proches de celles des deux scénarios précédents.
Les valeurs de débit calorifique du scénario simulant un départ de feu dans la cuisine sont très différentes des trois autres scénarios. La phase de croissance est très proche de celle du scénario de la chute du rideau enflammé. Cependant, après un maximum de 1 330 kW atteint à 350 s, le débit calorifique diminue très rapidement pour se stabiliser à environ 280 kW. Les deux pics de débit calorifique visibles à 757 et 1 130 s sont synonymes d'inflammations ponctuelles des mobiliers à proximité du foyer et en particulier du sommet de l'armoire placée à côté de la table
.



319. *Débit calorifique dans le domaine de calcul pour les quatre scénarios (les traits verticaux en pointillés marquent l'ouverture de la porte de l'appartement)*

5.2.3.2 Départ sur le lit avec ou sans accélérant

5.2.3.2.1 Températures

Il a été vu dans le paragraphe précédent que les débits calorifiques sont semblables, pour les scénarios dont le départ de feu est localisé sur le lit, excepté un retard de 70 s pour le cas n'ayant pas d'accélérant. C'est pourquoi les températures de ces deux scénarios sont étudiées ensembles dans ce paragraphe.

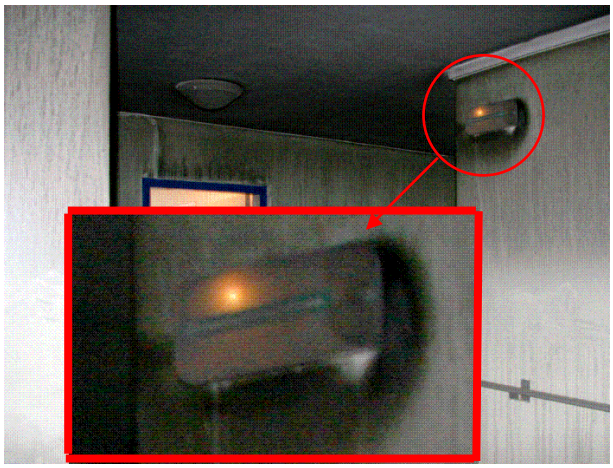
Sept points de comparaison vont tout d'abord être considérés. Quatre s'inscrivent dans la démarche classique présentée au chapitre 4 (interrupteurs, prise de courant, bloc autonome d'éclairage de sécurité).

Le premier point de comparaison étudié est la 'non-déformation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité' (voir la photo 320) disposé dans la circulation horizontale commune à 2,1 m du sol et distant

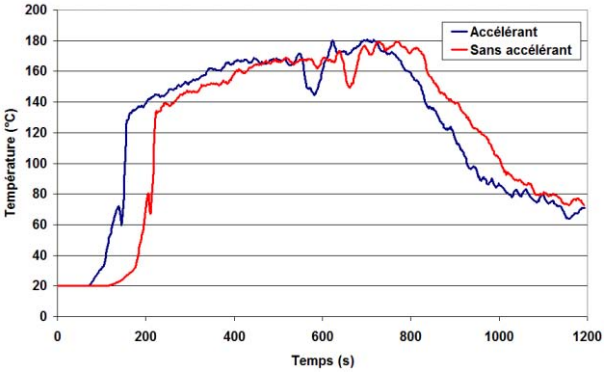
[32] La durée d'incendie est calculée ici à partir du débit calorifique. Lorsqu'il est inférieur à 35 kW c'est-à-dire moins de 2% du débit calorifique total, aucune flamme n'est considérée.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

de 4,2 m de la porte d'entrée de l'appartement sinistré. Le dépôt de suie constaté sur cet élément permet d'en déduire qu'il a été plongé dans la couche de fumée mais que la sollicitation thermique n'a pas été suffisante pour le déformer. Les températures simulées à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité pour les deux scénarios dont l'origine de l'incendie est située sur le lit sont tracées dans le graphique 321. Comme cela avait été avancé dans le paragraphe précédent suite à l'analyse des débits calorifiques, les sollicitations thermiques sont identiques mis à part un décalage temporel de 70 s environ. La sollicitation thermique pourrait être traduite par une exposition à plus de 120 °C pendant 740 s avec un maximum égal à 180 °C.
Lors des essais présentés dans le chapitre 4, tous les blocs autonomes d'éclairage de sécurité soumis expérimentalement à une sollicitation thermique ont été déformés. Aucune sollicitation thermique associée au point de comparaison 'non-déformation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité' n'a été déterminée.
La partie avant d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité est fabriquée à base de polycarbonate. C'est un thermoplastique dont la température de transition vitreuse se situe à environ 150 °C et la température de fusion est comprise entre 220 et 250 °C. La sollicitation thermique simulée est donc concordante avec le point de comparaison 'non-déformation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité'.
Cependant, les supports des blocs autonomes d'éclairage de sécurité sont également généralement constitués d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et de polypropylène (PP). Ce sont deux matériaux thermoplastiques dont la température de transition vitreuse est comprise entre 85 et 125 °C pour le premier et égale à -10 °C pour la seconde et les températures de fusion respectivement de 105 à 120 °C et de 165 °C. La sollicitation thermique obtenue lors des deux simulations est donc susceptible de déformer les deux matériaux puisque les températures maximales sont supérieures de 8 à 37 % à la température de fusion selon le matériau considéré. Pour le PP, une température simulée maximale supérieure de 8 % à la température de fusion est encore acceptable pour considérer que la sollicitation thermique puisse concorder avec le point de comparaison 'non-déformation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité'. Pour l'ABS, 37% sont atteints, ce qui ne permet pas de justifier une concordance entre la sollicitation thermique et le point de comparaison.



320. *Bloc autonome d'éclaire de sécurité disposé dans la circulation horizontale commune*



321. *Températures simulées à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

Dans la circulation horizontale commune, un puzzle est accroché sur le mur directement à droite de la sortie de l'appartement sinistré. Ce puzzle est suspendu à l'aide d'un cadre dont la partie avant est constituée d'un film plastique transparent qui est fondu au-dessus de 1,7 m. Cela constitue le point de comparaison 'dégradation du film protecteur du puzzle'. Il est interprétable de deux façons :

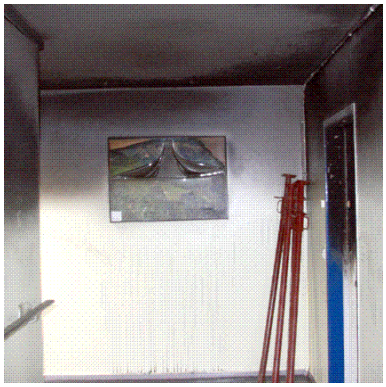
- la sollicitation thermique au-dessus de 1,7 m est suffisante pour faire fondre le film de protection,
- elle ne l'est pas au-dessous de 1,7 m.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

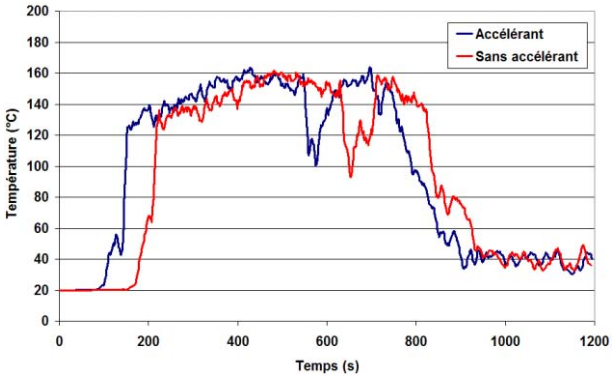
Les températures atteintes à cette hauteur pour les deux scénarios simulés sont tracées dans le graphique 323. Les valeurs des courbes avec ou sans accélérant sont toujours très proches mis à part le décalage temporel de 65 s environ. La sollicitation thermique peut-être exprimée par une température supérieure à 100 °C pendant 620 s avec un maximum de 160 °C.

Le film de protection du puzzle est supposé être du PP. Lors de l'investigation, le matériau n'a pas été prélevé. Il n'a donc pas pu être parfaitement identifié a posteriori. En moyenne, la température de transition vitreuse du PP est de -10 °C, sa température maximale d'utilisation de 100 °C et sa température de fusion de 165 °C. La température maximale d'utilisation n'est pas le paramètre le plus représentatif pour travailler sur les points de comparaison. Cependant, il faut noter qu'à 1,7 m, le film plastique est soumis pendant 620 s à des températures supérieures à cette valeur limite d'utilisation. Toujours à cette même hauteur, la température reste plus de 90 s égale à une valeur oscillant légèrement autour de 160 °C. La sollicitation thermique à 1,7 m pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec et sans accélérant est donc susceptible de mener au point de comparaison 'dégradation du film protecteur du puzzle'.

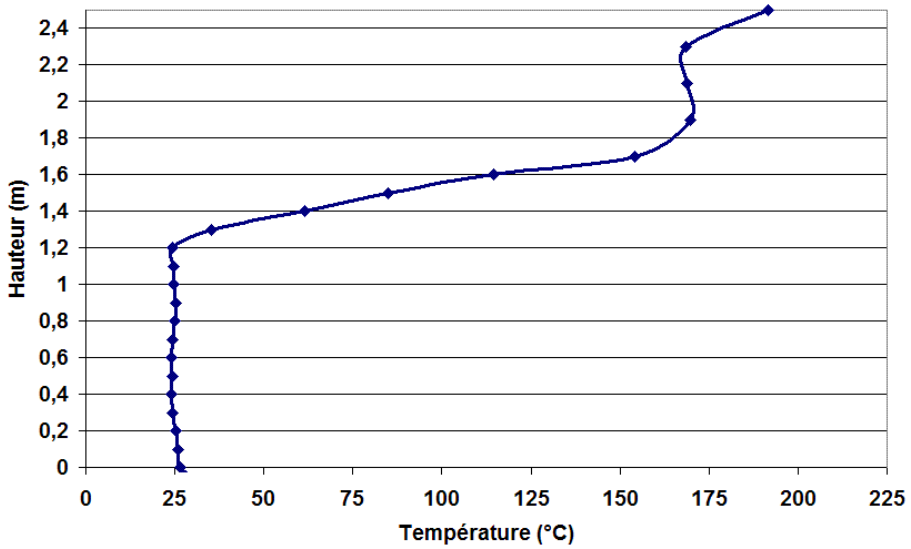
La limite entre la partie dégradée et non-dégradée du film protecteur du puzzle est très nette. Les sollicitations thermiques des simulations des deux scénarios sont susceptibles d'engendrer une délimitation aussi nette. En effet, le gradient de température relativement élevé entre 1,2 et 1,9 m est légèrement supérieur à 20°C/dm (voir le graphique 324). La sollicitation thermique maximale est donc de 160 °C ± 20 °C pendant 90 s selon que l'emplacement étudié soit à 1,7 m ± 0,1 m.



322. *Puzzle disposé dans la circulation horizontale commune à la sortie de l'appartement sinistré*



323. *Température à l'emplacement du puzzle pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

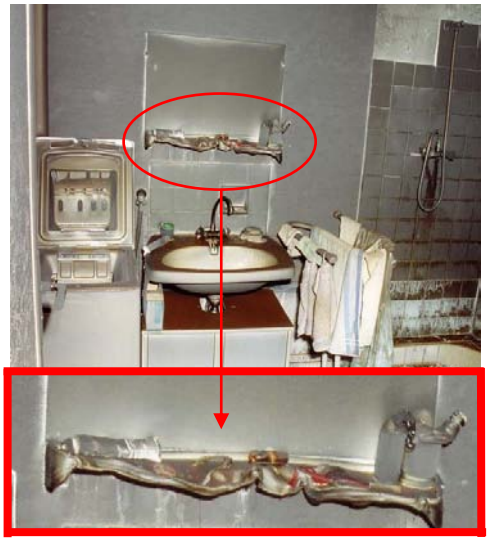


324. *Température à 400 s sur la verticale du centre du puzzle pour le scénario de départ de feu sur le lit avec accélérant*

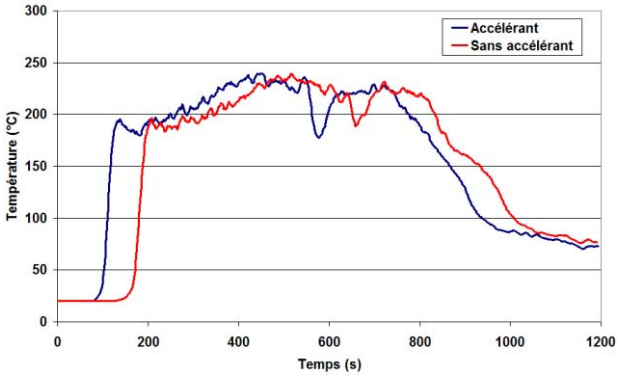
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Le troisième point de comparaison est la ‘dégradation du support du miroir’ (voir la photo 325) situé au-dessus du lavabo de la salle de bain de l’appartement sinistré. Le dépôt de suie au-dessus, au-dessous et sur l’élément montre qu’il a subi une sollicitation de la part des fumées. Cet élément n’a pas été prélevé lors de l’investigation c’est pourquoi il est impossible de déterminer avec précision la nature exacte du matériau qui le constitue ou d’effectuer des tests de comportement lorsqu’il est soumis à une sollicitation thermique. Cependant, il est fort probable que le matériau soit de l’ABS, puisqu’il en a l’aspect et qu’il est couramment répandu dans la fabrication d’accessoires de salle de bain. L’ABS a une température limite d’usage compris entre 70 et 85 °C, une température de transition vitreuse comprise entre 85 et 125 °C, une température de fusion comprise entre 105 et 120 °C et une température d’inflammation comprise entre 400 et 470 °C (voir le chapitre 4).

Une nouvelle fois, les températures obtenues à la suite des simulations des deux scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant sont très proches, excepté le décalage temporel des courbes de 70 s (voir le graphique 326). La sollicitation thermique pour ces deux scénarios se résume à une exposition pendant 670 s à des températures supérieures à 170 °C avec un maximum de 240 °C. Les valeurs de température sont largement inférieures aux températures d’inflammation de l’ABS. Cela est en adéquation avec le point de comparaison ‘dégradation du support du miroir’ qui ne présente pas de traces de combustion. La sollicitation thermique semble cependant trop élevée par rapport à la quantité de matériau déformé et fondu. En effet, le support du miroir est majoritairement déformé et aucune trace d’écoulement de matériau fondu n’est observée. Au regard des dégradations et du temps d’exposition, les températures de la sollicitation thermique semblent donc surestimées.



325. *Support du miroir dans la salle de bain de l’appartement sinistré*



326. *Température à l’emplacement du support du miroir pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

Sur le mur de séparation entre l’entrée de l’appartement et la cuisine sont fixés un interphone, deux interrupteurs actionnant les volets roulants et un interrupteur double commandant le luminaire de la pièce principale. Le dépôt de suie constaté sur le mur de séparation permet de supposer que ces éléments ont été plongés dans la couche de fumée. Le point de comparaison ‘dégradation des matériels électriques’ est donc majoritairement endommagé par l’action de la convection. L’interrupteur repéré par le 1 sur la photo 327 n’est pas exploitable en tant que point de comparaison car une partie de l’interrupteur 2 a fondu et a coulé sur le premier. Cela rend impossible une analyse correcte des dégradations. Les interrupteurs 2 et 3 actionnant les volets roulants sont fondus et présentent ponctuellement des traces de combustion. Ils sont fabriqués en ABS dont les températures caractéristiques de dégradation ont été présentées précédemment. Et enfin l’interphone, lui aussi fabriqué à base d’ABS, est déformé mais sans être fondu et aucune trace de combustion n’est visible sur son boîtier. Des traces de combustion le sont sur certains éléments tels que les fils électriques, les circuits imprimés ou encore la membrane du haut parleur. Au cours de l’incendie, après que le boîtier se soit déformé, il est probablement tombé sur le meuble situé juste en dessous, là où il a été retrouvé lors de l’enquête. À la hauteur du sommet du meuble, l’interphone n’est plus plongé dans la fumée comme en témoigne le dépôt de suie sur les murs. Pour ce dernier élément, la seule question à

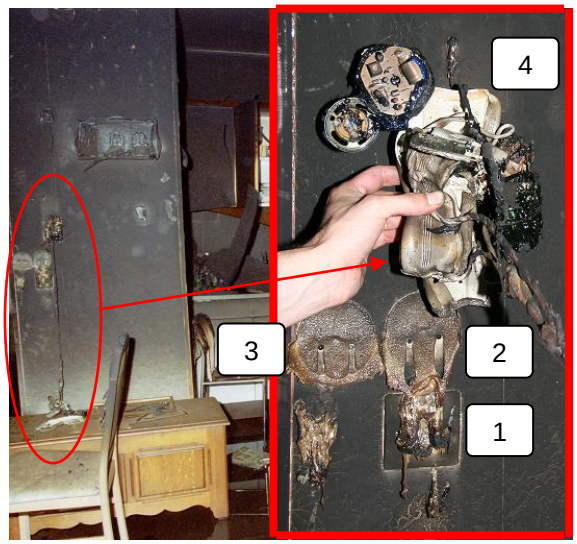
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

laquelle il faut chercher une réponse est de déterminer si la sollicitation thermique est suffisante pour déformer le boîtier de l'interphone.

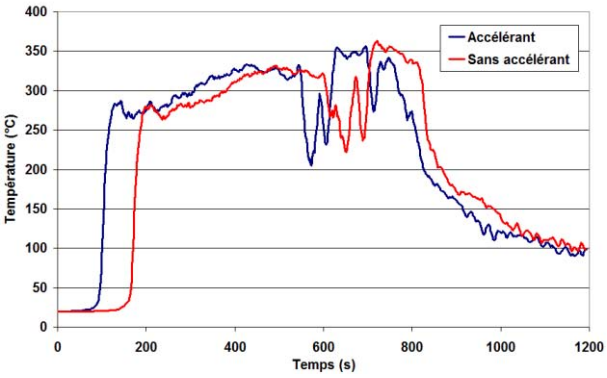
Les températures obtenues à l'emplacement de l'interphone pour les deux scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant sont tracées sur le graphique 328. Une fois encore, les valeurs de températures atteintes sont très proches pour les deux cas mais elles sont décalées de 70 s. La sollicitation thermique se résume à une exposition à des températures supérieures à 200 °C pendant 720 s avec un maximum de 360 °C. Cette sollicitation thermique est suffisante pour justifier la déformation de l'interphone et provoquer sa chute. Les températures au sommet du meuble sur lequel l'élément a été retrouvé sont de l'ordre de 120 °C. Elles sont donc insuffisantes pour enflammer l'ABS mais suffisantes pour que la déformation continue compte tenu du temps d'exposition supérieur à 10 min. À l'emplacement du point de comparaison, la sollicitation thermique est suffisante pour faire fondre les interrupteurs 2 et 3 actionnant les volets roulants. Cependant, le maximum de température de 360 °C pendant un temps d'exposition relativement court, de l'ordre de la minute, parait trop faible pour enflammer ponctuellement l'ABS dont la température d'inflammation est comprise entre 400 et 470 °C.

En résumé :

- la sollicitation thermique des deux scénarios simulés est concordante pour le point de comparaison 'dégradation de l'interphone'.
- La température maximale de la sollicitation thermique est légèrement trop faible pour provoquer l'inflammation de l'ABS constituant les interrupteurs 2 et 3. Mais elle est concordante avec une fonte des deux éléments.



327. *Interphone et interrupteurs (lumières et stores) dans la pièce principale de l'appartement sinistré*



328. *Température à l'emplacement de l'interphone pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

La photo 329 présente un interrupteur et une prise de courant situés dans la pièce principale de l'appartement à la droite de la porte donnant vers la salle de bain. Ces deux éléments ont été dégradés suite à l'action des fumées de l'incendie. Ils sont considérés comme les points de comparaison 'dégradation de l'interrupteur' et 'dégradation de la prise de courant'. Ces deux éléments sont disposés très proches l'un de l'autre, la sollicitation thermique à laquelle ils sont exposés pourrait donc être considérés comme identique. Cependant, dans la simulation des deux scénarios, un écart de 30°C est obtenu entre l'emplacement de l'interrupteur et celui de la prise de courant qui sont distants verticalement de 7 cm (cf. graphique 330). Cet écart de température n'est pas toujours négligeable selon les niveaux de sollicitation thermique c'est pourquoi il est important de différencier l'étude des deux points de comparaison.
Les points de comparaison 'dégradation de l'interrupteur' et 'dégradation de la prise de courant' ont été légèrement endommagés par l'incendie. De la suie s'est déposée sur les éléments qui sont par conséquent noircis, le bouton poussoir de l'interrupteur est à la limite de la déformation et la surface

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

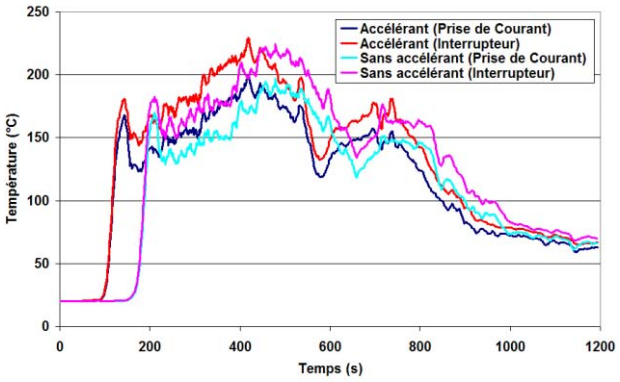
des échantillons est légèrement cloquée par endroits. Ces deux points de comparaison se situent dans la zone dégradation légère du tableau 231 du chapitre 4 entre les interrupteurs[33] 4 et 5. La sollicitation thermique est donc comprise entre :

- une exposition pendant plus de 200 s à des températures supérieures à 110 °C avec un maximum de 170 °C
- une exposition pendant plus de 245 s à des températures supérieures à 250 °C avec un maximum de 340 °C.

Dans le graphique 330 sont tracées les températures obtenues à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant pour les deux scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant. La sollicitation thermique à l'emplacement de l'interrupteur est une exposition pendant 800 s à des températures supérieures à 135 °C avec un maximum de 230 °C. À l'emplacement de la prise de courant, les températures sont supérieures à 120 °C pendant 800 s avec un maximum de 200 °C.

Les niveaux de température des sollicitations thermiques obtenues par simulations sont compris entre ceux des essais des interrupteurs 4 et 5. Cependant, les temps d'expositions des sollicitations thermiques obtenues par simulations sont environ quatre fois supérieurs à ceux des essais. Comme les températures maximales sont proches des températures de déformations des plastiques communs, le temps d'exposition est supposé avoir ici moins d'influence sur l'endommagement du point de comparaison que les niveaux de température des sollicitations thermiques. En conclusion, il est jugé que la sollicitation thermique obtenue par simulation est concordante avec l'endommagement des points de comparaisons 'dégradation de l'interrupteur' et 'dégradation de la prise de courant' de la scène d'incendie.

329. *Prise de courant et interrupteur dans la pièce principale de l'appartement sinistré à la sortie de la salle de bain*



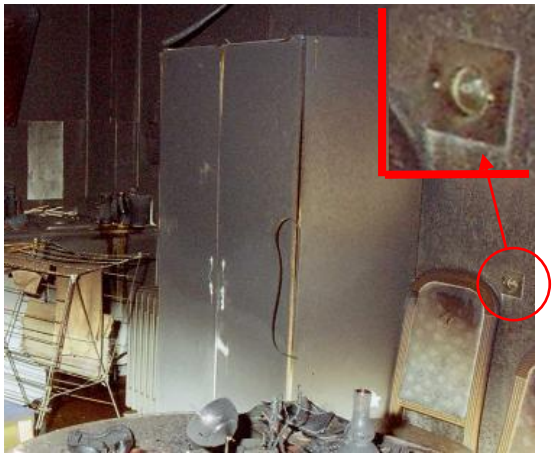
330. *Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

Les dégradations constatées sur la prise de courant placée dans la pièce principale sont identiques à celles de la prise de courant étudiée précédemment et qui est située à la même hauteur sur le mur lui faisant face (voir la photo 331).

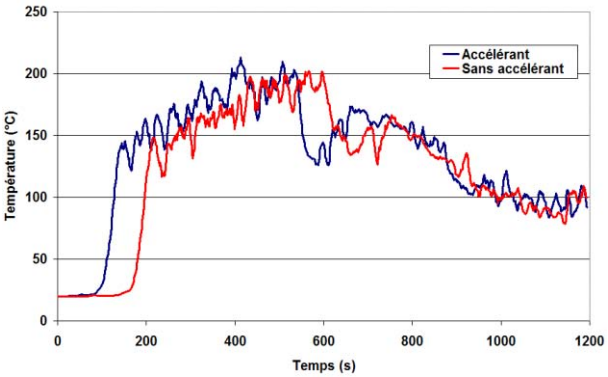
La simulation des deux scénarios donne une sollicitation thermique identique équivalente à une exposition pendant 800 s à des températures supérieures à 120 °C avec un maximum de 210 °C (voir le graphique 332). Cette sollicitation thermique concorde avec le point de comparaison 'dégradation de la prise de courant'.

[33] Les interrupteurs et les prises de courant testés lors des essais du Puy en Velay et ceux retrouvés sur la scène d'incendie étudiée sont fabriqués avec les mêmes matériaux

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



331. *Interrupteur dans la pièce principale de l'appartement sinistré*



332. *Température à l'emplacement de l'interrupteur pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant*

5.2.3.2.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune

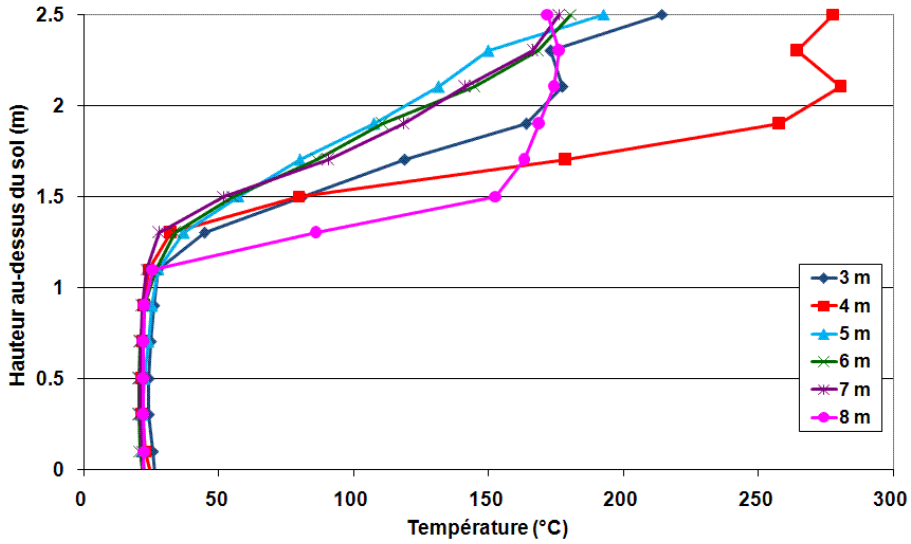
Les témoignages des premiers intervenants recueillis lors de l'enquête permettent d'affirmer qu'il y a eu stratification des fumées dans la circulation horizontale commune après que la porte de l'appartement ait été ouverte par le gardien. Le dépôt de suie constaté sur les murs du couloir laisse supposer que la hauteur libre de fumée est d'environ 1,45 m.

Aucun paramètre de sortie de FDS ne permet d'obtenir directement une hauteur libre de fumée correcte. Plusieurs méthodes de traitement des données sont envisageables. La fraction de mélange, la température ou le coefficient d'extinction peuvent par exemple être étudiés sur une verticale afin de déterminer une hauteur où un changement significatif des valeurs est observé. Cependant, ces quantités sont ensuite comparées à une hauteur mesurée sur site à partir du dépôt de suie sur une paroi. Les quantités ne sont peut-être pas directement comparables. À l'heure actuelle, aucune étude apportant une réponse à cette difficulté n'est connue. Il a été décidé de travailler uniquement avec les températures. Un traitement croisé avec une autre quantité, comme la fraction de mélange par exemple, aurait certainement été plus précis, mais seule la température est disponible en sortie pour ces calculs.

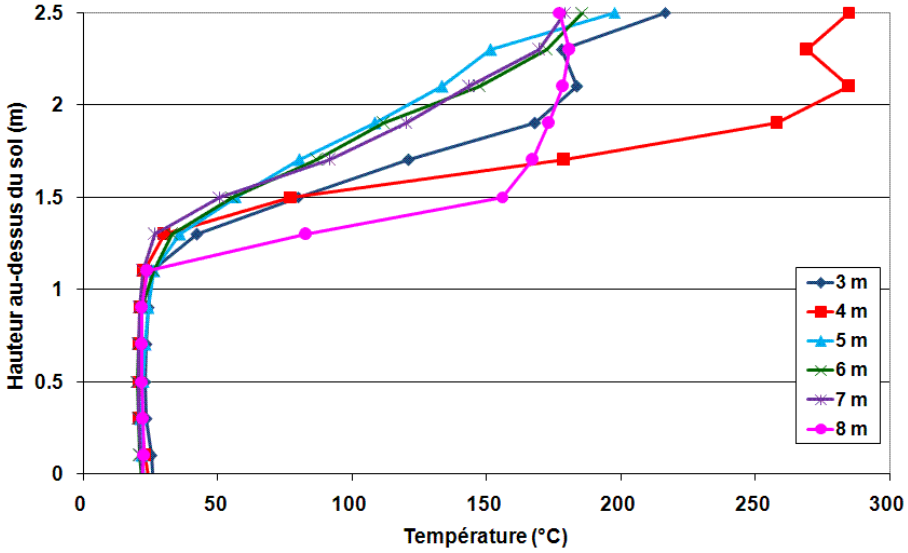
Les températures sont moyennées entre 200 et 800 s au centre du couloir et sont tracées dans les graphiques 333 et 334 pour les deux scénarios de départ de feu sur le lit. Elles sont étudiées à six emplacements indiqués sur le plan 335. Les températures à 4 m sont plus élevées qu'aux autres emplacements car la porte de l'appartement se situe directement en face. Jusqu'à 1,1 m, les températures sont très légèrement supérieures à 20 °C, la valeur qui est définie par défaut dans l'ensemble du domaine de calcul au début des simulations. Il paraît plus juste de s'appuyer majoritairement sur la courbe à 8 m car elle est tracée à l'emplacement le plus proche d'une paroi. Après 1,1 m, la pente de cette courbe diminue rapidement pour augmenter tout aussi rapidement après 1,5 m. Il en est donc déduit que la hauteur libre de fumée se situe approximativement entre ces hauteurs, là où les brusques variations de pente sont observées, c'est-à-dire 1,3 ± 0,2 m.

La hauteur libre de fumée sur les deux simulations est donc inférieure de 10 % par rapport à celle mesurée à partir du dépôt de suie. Cependant, compte tenu des erreurs provenant de la taille de maille de 10 cm de haut dans le couloir et des graphiques qui ne sont tracés verticalement que tous les 20 cm, il est jugé que la concordance est correcte pour le point de comparaison 'hauteur libre de fumée dans la circulation horizontale commune'.

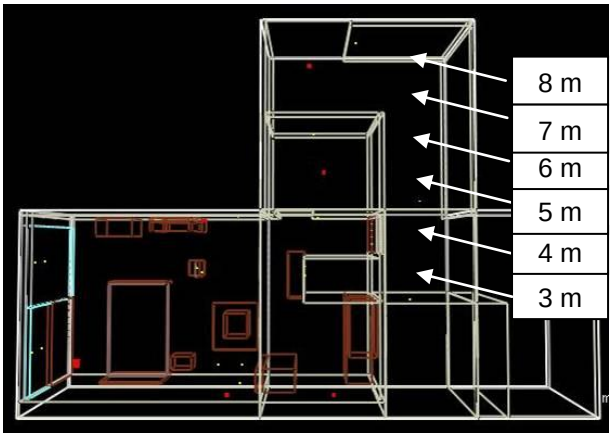
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



333. *Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu sur le lit - Températures moyennées entre 200 et 800 s*



334. *Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu sur le lit avec accélérant – Températures moyennées entre 200 et 800 s*



335. *Emplacement des points de mesure dans le couloir*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.3.3 Départ dans la cuisine

Pour évaluer la validité du scénario envisageant un départ de feu dans la cuisine, les mêmes points de comparaison que pour les deux scénarios précédemment étudiés sont utilisés.

5.2.3.3.1 Températures

À l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité, la sollicitation thermique obtenue n'est jamais supérieure à 100 °C sur les 1 200 s de calcul (voir le graphique 336). La sollicitation thermique moyenne entre 400 et 1 200 s est d'environ 60 °C. Cela est en parfaite adéquation avec le point de comparaison 'non-dégradation du bloc autonome d'éclairage de sécurité' car les températures atteintes sont inférieures aux températures de transition vitreuse et de fusion du PP, du PC et de l'ABS dont l'élément est constitué.

À mi hauteur du puzzle, la température est proche de 20 °C sur l'ensemble de la simulation à l'exception de deux augmentations très ponctuelles de températures (voir le graphique 337). Lors de la première à 360 s, 45 °C sont atteints. La seconde a lieu à 1 135 s avec 65 °C. Cette sollicitation thermique ne concorde pas avec le point de comparaison 'dégradation du film protecteur du puzzle' car les niveaux de températures sont beaucoup trop faibles. À l'emplacement du puzzle, une stratification de l'écoulement est observée. Les températures atteintes au sommet du cadre ne sont toujours pas assez élevées pour concorder avec la sollicitation thermique associée au point de comparaison 'dégradation du film protecteur du puzzle'.

Les températures simulées à l'emplacement du support du miroir sont tracées dans le graphique 338. La sollicitation thermique est une exposition pendant 85 s à des températures supérieures à 85 °C avec un maximum de 128 °C. Les niveaux de températures sont suffisants pour déformer et faire fondre le support du miroir en ABS mais les temps d'exposition sont trop faibles pour concorder avec le point de comparaison 'dégradation du support du miroir'. Les augmentations de températures sont trop ponctuelles pour obtenir des dégradations notables.

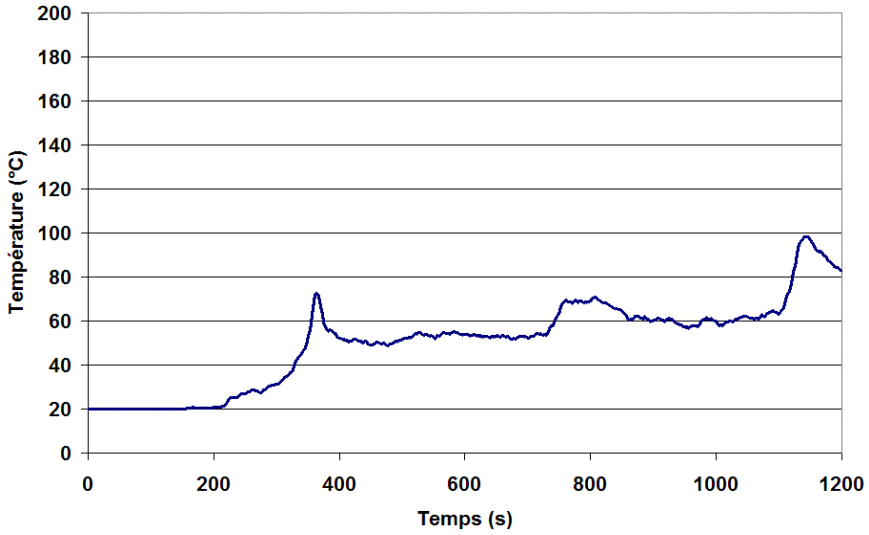
Les températures simulées pour les points de comparaison 'dégradation des matériels électriques' à proximité de l'interphone sont tracées dans le graphique 339. Les sollicitations thermiques peuvent être résumées en trois augmentations ponctuelles de températures :

- Après 350 s de simulation, une exposition à des températures supérieures à 85 °C pendant 30 s secondes avec un maximum de 140 °C,
- 80 s à des températures supérieures à 85 °C avec un maximum de 93 °C, après environ 750 s de simulation,
- Et en fin de simulation, 100 s à des températures supérieures à 85 °C avec un maximum de 190 °C.

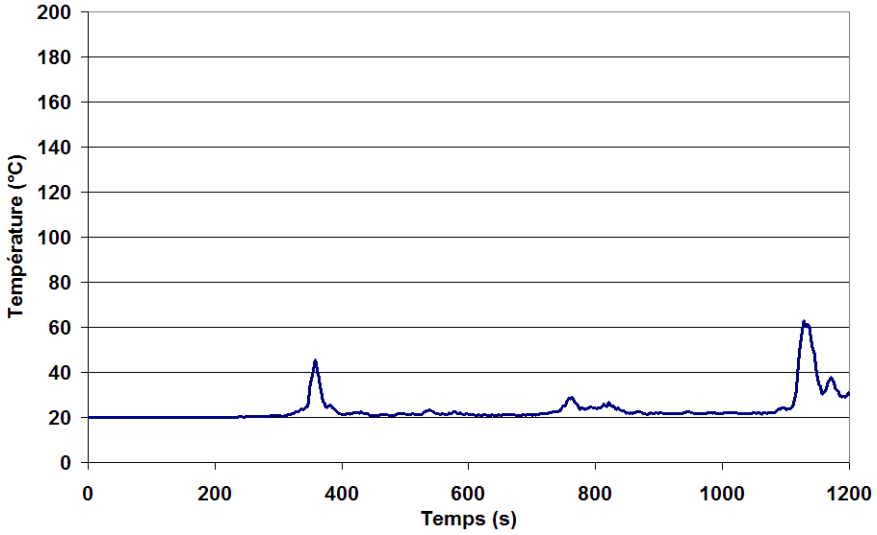
Les températures atteintes sont susceptibles de déformer le boîtier de l'interphone et de faire fondre les interrupteurs actionnant les volets roulants. Les temps d'exposition semblent cependant trop faibles pour engendrer la totalité des déformations constatées. De plus, les températures maximales sont largement inférieures aux températures d'inflammation de l'ABS. Par conséquent, les traces de combustion sur les interrupteurs sont difficilement justifiables. La sollicitation thermique ne concorde pas avec les points de comparaison 'dégradation de l'interphone'.

Dans les graphiques 340 et 341 sont tracées les températures à l'emplacement de l'interrupteur et des prises de courant dans la pièce principale à la sortie de la salle de bain et près du coin cuisine. Sur ce scénario, l'écart est très faible entre les températures atteintes pour l'interrupteur et la prise de courant placés à côté de la porte de la salle de bain. Une unique sollicitation thermique majorante est donc utilisée pour traiter les trois éléments. Elle se résume à une température maximale de 85 °C pendant l'ensemble des 1 200 s de simulation. Avec cette sollicitation thermique, les trois points de comparaison devraient se situer dans la zone dégradation légère du tableau 231 entre les interrupteurs 3 et 4. Les dégradations constatées sur les interrupteurs et les prises de courant lors de l'investigation sur site sont supérieures. Il n'y a donc pas de concordance pour le scénario de départ de feu dans la cuisine pour ces trois points de comparaison.

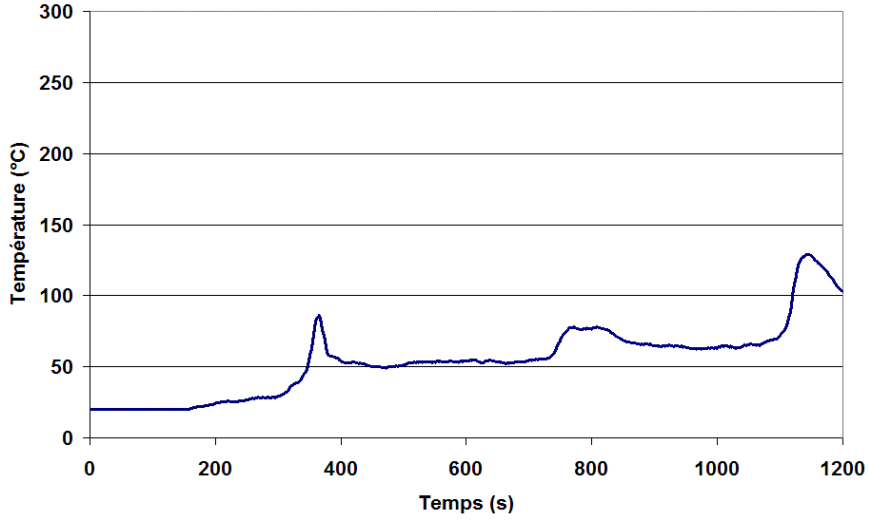
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



336. *Température à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*

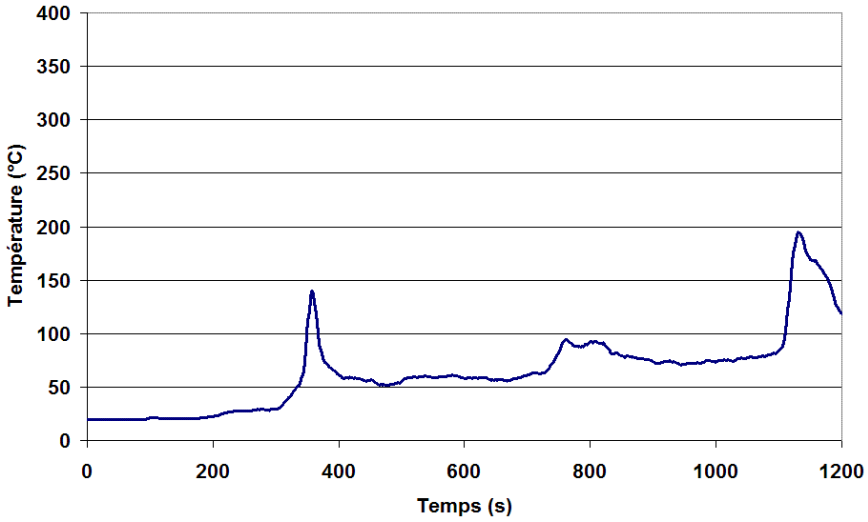


337. *Température à l'emplacement du puzzle pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*

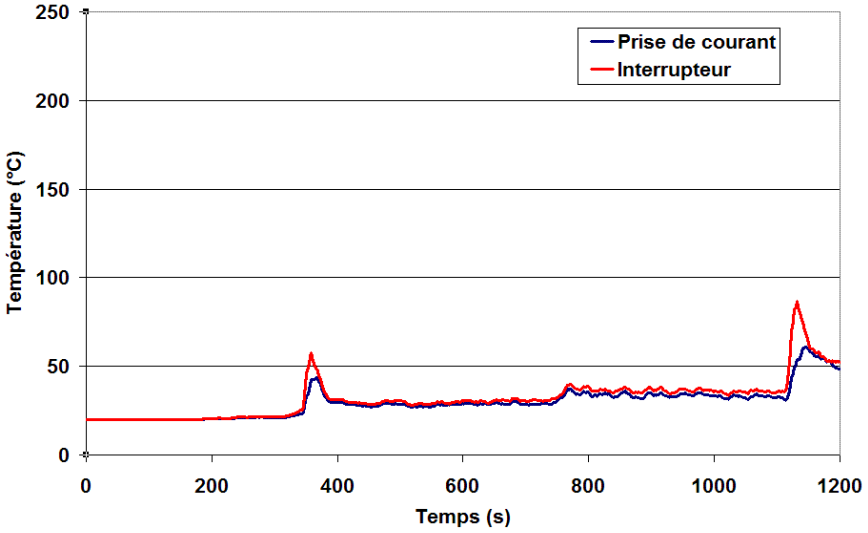


338. *Température à l'emplacement du support du miroir pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*

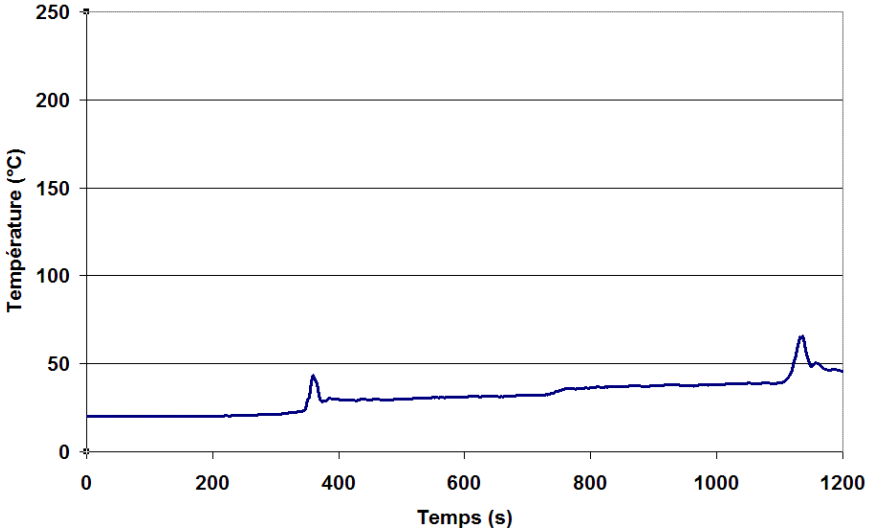
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



339. *Température à l'emplacement de l'interphone pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*



340. *Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant à la sortie de la salle de bain pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*

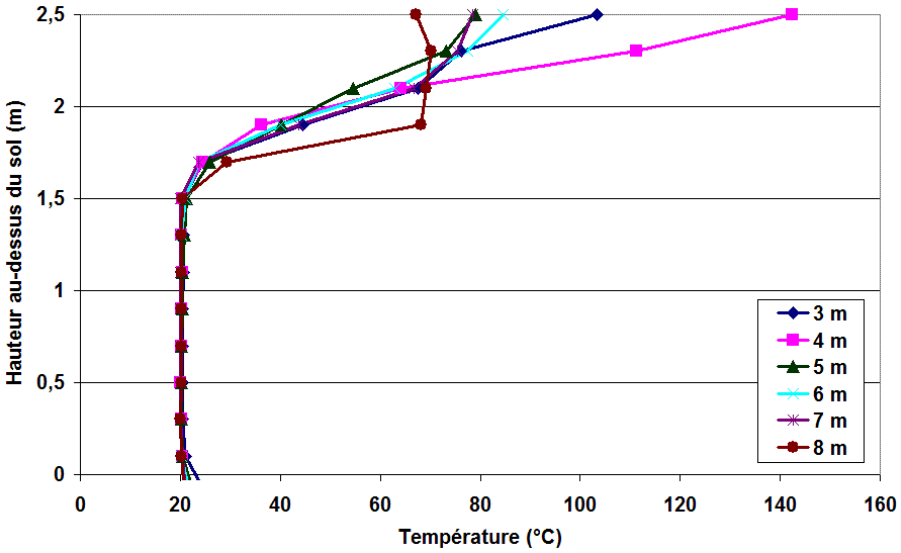


341. *Température à l'emplacement de l'interrupteur près du coin cuisine pour le scénario de départ de feu dans la cuisine*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.3.3.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune

Pour le scénario de départ de feu dans la cuisine, la hauteur libre de fumée est égale à 1,7 m (cf. graphique 342). Elle est surestimée de 20 % par rapport à la mesure du dépôt de suie sur la paroi de la circulation horizontale commune. Cette valeur est légèrement trop surestimée pour juger que la concordance du point de comparaison 'hauteur libre de fumée dans la circulation horizontale commune' soit satisfaisante.



342. *Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de dans la cuisine à 500 s*

5.2.3.4 Départ de feu après la chute d'un rideau enflammé

Pour tester la validité du scénario envisageant un départ de feu après la chute d'un rideau enflammé, les mêmes points de comparaison que pour les trois scénarios précédemment étudiés sont utilisés.

5.2.3.4.1 Températures

Les températures aux emplacements des points de comparaison sont tracées dans les graphiques 343 à 348 pour le scénario de départ de feu après la chute du rideau enflammé. Les sollicitations thermiques pour chaque élément représentent des expositions :

- De plus de 120 °C pendant 800 s avec un maximum égal à 190 °C, pour le bloc autonome d'éclairage de sécurité.
- À des températures supérieures à 100 °C pendant 700 s avec un maximum de 170 °C, pour le film de protection du puzzle,
- Pendant 700 s à des températures supérieures à 170 °C avec un maximum de 250 °C, pour le support du miroir de la salle de bain,
- À des températures supérieures à 200 °C pendant 775 s avec un maximum de 360 °C, pour l'interphone et les deux interrupteurs actionnant les volets roulants,
- Pendant 720 s à des températures supérieures à 135 °C avec un maximum de 215 °C à l'emplacement de l'interrupteur à la sortie de la salle de bain et supérieures à 120 °C pendant 700 s avec un maximum de 190 °C à l'emplacement de la prise de courant à la sortie de la salle de bain,
- Pendant 810 s à des températures supérieures à 120 °C avec un maximum de 215 °C, pour la prise de courant dans la pièce principale.

Ces sollicitations thermiques sont équivalentes à celles des scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant. Pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé, les temps d'exposition sont généralement plus longs d'une trentaine de secondes et les températures maximales

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

atteintes supérieures d'une dizaine de degrés. Cela n'est cependant pas suffisant pour modifier les conclusions obtenues précédemment et qui pourraient être résumées comme :

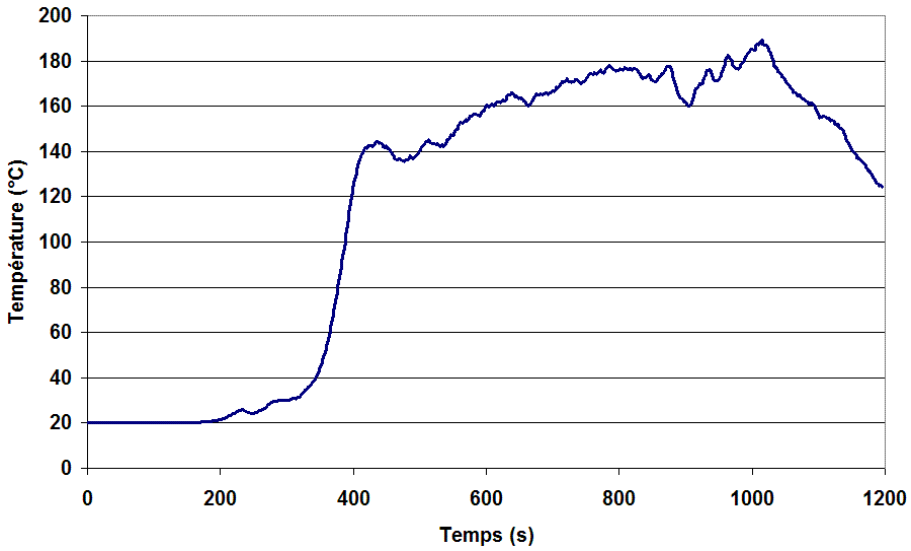
- Les sollicitations thermiques de la simulation du scénario de la chute du rideau enflammé concordent avec les trois points de comparaison 'dégradation de la prise de courant dans la pièce principale', 'dégradation de la prise de courant à la sortie de la salle de bain' et 'dégradation de l'interrupteur à la sortie de la salle de bain'.

- Les températures de la sollicitation thermique semblent surestimées pour le point de comparaison 'dégradation du support du miroir'.

- La sollicitation thermique obtenue par la simulation de ce scénario est concordante pour le point de comparaison 'dégradation de l'interphone'. La température maximale de la sollicitation thermique est légèrement trop faible pour provoquer l'inflammation de l'ABS constituant les interrupteurs 2 et 3 à proximité de l'interphone (voir la photo 327). Mais elle est concordante avec une fonte des deux éléments.

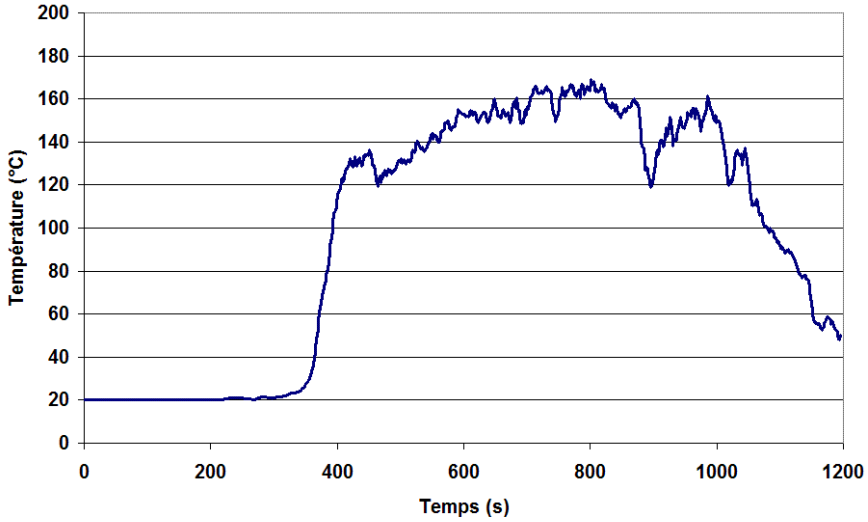
- La sollicitation thermique à 1,7 m est susceptible de mener au point de comparaison 'dégradation du film protecteur du puzzle'. Les sollicitations thermiques des simulations du scénario sont susceptibles de créer une délimitation aussi nette que celle observée entre la partie dégradée et non-dégradée du film protecteur du puzzle.

- La sollicitation thermique simulée est concordante avec le point de comparaison 'non-déformation de la face avant du bloc autonome d'éclairage de sécurité'. Pour le PP constituant le support, la température simulée maximale est légèrement supérieure à la température de fusion du matériau ce qui est encore acceptable pour considérer que la sollicitation thermique puisse concorder avec le point de comparaison 'non-déformation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité'. Pour l'ABS, les températures maximales simulées sont trop en excès par rapport à la température de fusion du matériau et cela ne permet pas de justifier une concordance entre la sollicitation thermique et le point de comparaison.

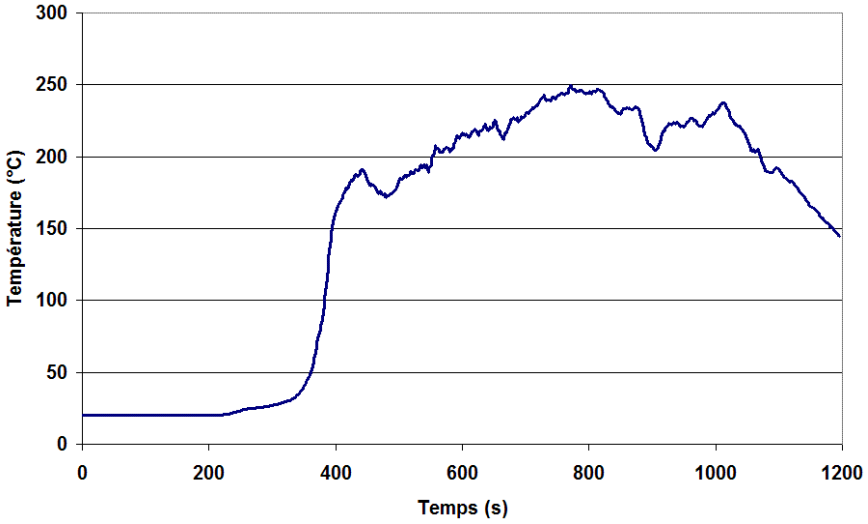


343. *Température à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

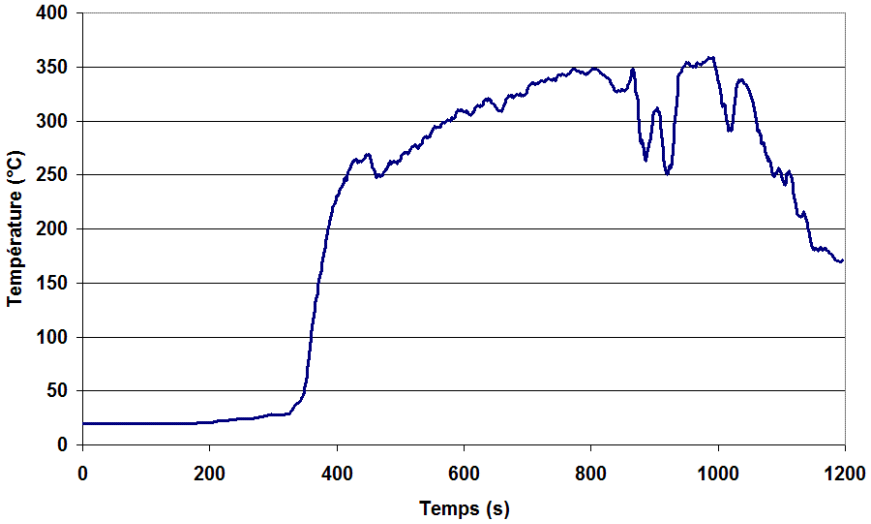
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



344. *Température à l'emplacement du puzzle pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

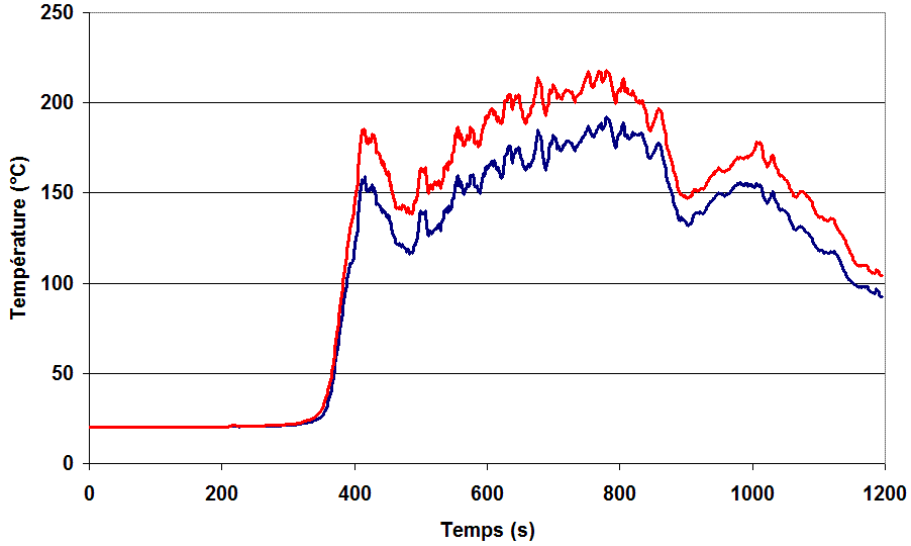


345. *Température à l'emplacement du support du miroir pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

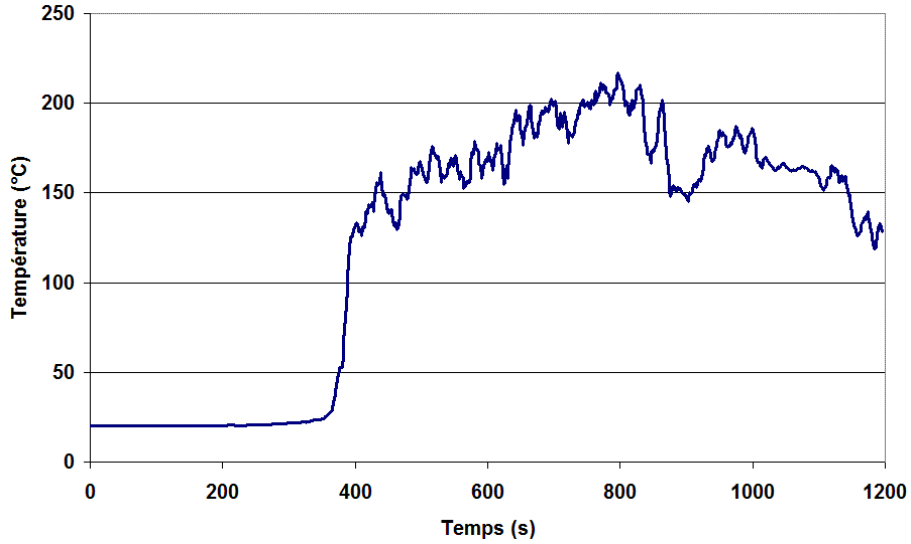


346. *Température à l'emplacement de l'interphone pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



347. *Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant à la sortie de la salle de bain pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

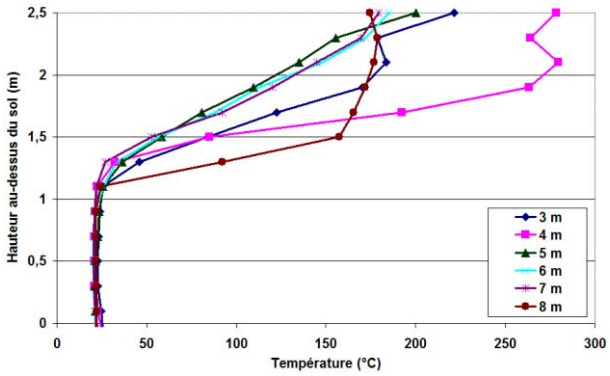


348. *Température à l'emplacement de l'interrupteur près du coin cuisine pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

5.2.3.4.2 Hauteur de libre de fumée dans la circulation horizontale commune

Comme pour les scénarios de départ de feu sur le lit, la hauteur libre de fumée simulée pour le départ de feu suite à la chute d'un rideau enflammé est compris entre 1,1 et 1,5 m. la concordance est ici encore jugée correcte pour le point de comparaison 'hauteur libre de fumée dans la circulation horizontale commune'.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



349. *Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu après la chute du rideau - Températures moyennées entre 400 et 1 000 s*

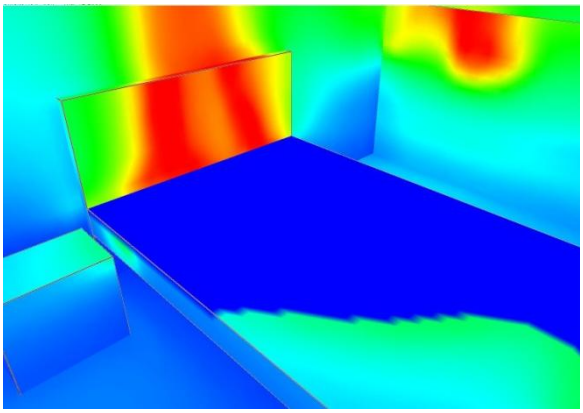
5.2.3.5 Conclusions sur le choix du scénario le plus probable

La démarche de traitement des points de comparaison a permis d'écarter clairement le scénario dont le départ de feu est supposé dans la cuisine. Les sollicitations thermiques de cette simulation ne concordent pas avec les points de comparaison. En revanche, la démarche ne permet pas de choisir parmi les trois autres scénarios, c'est-à-dire un départ de feu sur le lit, sur le lit avec un accélérant et après la chute d'un rideau enflammé.

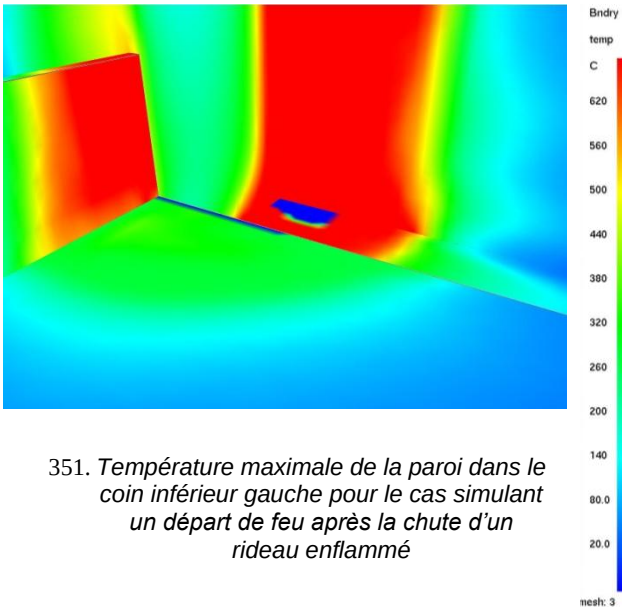
Dans la configuration de ce cas d'étude et en particulier les conditions de ventilation, les résultats des simulations dont le départ de feu est situé sur le lit sont quasiment identiques. Seul un décalage temporel est observé, le cas sans accélérant ayant un retard de 70 s environ. Rien ne permet de différencier par la simulation les deux scénarios. Seule l'analyse en laboratoire d'un prélèvement de résidu d'incendie aurait permis de révéler la présence ou non d'un accélérant et ainsi de différencier les deux hypothèses.

Les sollicitations thermiques aux points de comparaison étudiés dans les paragraphes précédents pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé sont équivalentes à celles des départs de feu sur le lit. Mais des différences dans les simulations apparaissent cependant et elles permettent de privilégier un scénario. Le meilleur exemple de ces différences est illustré par les images 350 et 351 qui sont comparées à la photo 352. Sur les deux images sont tracées les températures maximales des parois solides dans le coin inférieur gauche de l'appartement, c'est-à-dire entre le lit et la paroi extérieure en bois. Sur la photo, une zone plus blanche sur le mur (encerclée de rouge) se distingue. C'est une zone où la sollicitation thermique est nettement inférieure au reste de la paroi car la tapisserie n'a pas été entièrement calcinée. Si les sollicitations thermiques des deux images sont maintenant étudiées, le scénario d'un départ de feu après la chute du rideau enflammé peut être écarté. En effet, à l'endroit de la zone plus blanche du mur, les températures sont supérieures à 620°C, une valeur beaucoup trop élevée au regard des dégradations. Pour le départ de feu sur le lit, la sollicitation thermique est toujours inférieure à 80 °C ce qui correspond mieux aux constatations. D'autres zones de l'appartement, comme les pieds de la table par exemple, permettraient d'arriver aux mêmes conclusions.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



350. *Température maximale de la paroi dans le coin inférieur gauche pour le cas simulant un départ de feu sur le lit*



351. *Température maximale de la paroi dans le coin inférieur gauche pour le cas simulant un départ de feu après la chute d'un rideau enflammé*

Cette démarche pour choisir le scénario correspond toujours à l'utilisation d'un point de comparaison. La différence par rapport aux paragraphes précédents réside dans la méthode utilisée pour déterminer les sollicitations thermiques à partir des simulations. En effet, ici, les températures des parois solides ont du être étudiées dans l'ensemble du domaine de calcul afin de localiser une zone où des différences apparaissent entre les deux scénarios. La démarche est donc moins « automatique » que l'étude de l'évolution en fonction du temps d'une grandeur telle que la température en un point de l'espace déterminé avant le calcul en fonction des dégradations constatées sur site. Le point de comparaison n'est donc pas choisi directement lors de l'investigation mais en recherchant des différences dans les résultats des simulations de deux scénarios. Dans cette étude, le point de comparaison choisi a posteriori, c'est à dire après que les calculs aient été réalisés, se révèle dont plus convaincant que l'ensemble des points choisis a priori, c'est à dire lors de la constatation sur site. Cela renforce l'idée qu'il est très important d'effectuer de façon extrêmement minutieuse les relevés réalisés sur les lieux du sinistre.

352. *Mur entre le lit et la paroi extérieure*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

5.2.4 Apport de la simulation numérique sur cette investigation

Sur ce cas d'étude, l'origine et la cause de l'incendie ont été déterminées avec de grandes certitudes suite à l'investigation post-incendie. Ce sinistre a été choisi en particulier car la surface sinistrée était relativement petite, les dégâts assez localisés à proximité du lit et la scène d'incendie bien conservée. Parmi les scénarios simulés, il était acquis, avant l'analyse des résultats, que celui reproduisant un départ de feu dans la cuisine n'était pas le bon par rapport au cas réel. Cependant, il était important de le prendre en compte pour tester les limites de l'approche par modélisation.

Ces simulations ont permis de confirmer, en apportant des preuves scientifiques supplémentaires, que l'origine de l'incendie était située sur le lit et cela, en utilisant la méthode de validation par les points de comparaison développée au chapitre 4. Le modèle ne s'est pas révélé assez précis sur cet incendie pour différencier les deux hypothèses dont l'origine est sur le lit mais qui ont des puissances d'allumage différentes.

Dans une démarche judiciaire, il ne faut pas négliger l'apport que peut avoir la visualisation dynamique des simulations pour expliquer l'évolution d'un incendie à un public ayant peu ou pas de notions scientifiques dans le domaine de l'incendie.

Les résultats de ce paragraphe 5.2 ont été utilisés pour l'animation de deux ateliers de travail organisés lors de la conférence « *Fire Crime in Europe Conference 2008 »* à laquelle assistaient des investigateurs européens appartenant à des départements de police scientifique ou des corps de sapeur pompier. La première partie de cet atelier consistait à essayer de déterminer, à partir d'une série de photographies, la ou les hypothèses les plus probables de départ de feu. Les quatre simulations de scénario d'incendie étaient ensuite présentées et les participants devaient trouver, à partir des données d'entrée et des résultats fournis, lequel des scénarios correspondait le mieux avec celui qu'ils avaient avancé après l'étude des photographies. La dernière partie de l'atelier était un exposé du scénario retenu après enquêtes et simulations.
La présentation des travaux a été abordée de façon différente dans ce paragraphe. Le scénario retenu lors de l'enquête post-incendie a été présenté avant les résultats des simulations. Les simulations ont donc été comparées au cas par cas au scénario retenu.
Lors de cette conférence, l'accueil de ces travaux a été très bon de la part des professionnels européens de l'investigation post-incendie, ce qui prouve leur intérêt et éventuellement leur besoin ponctuel de ce type de reconstitution numérique des incendies.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

6 Conclusion générale et perspectives

En 2005, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police a ressenti la nécessité de développer de nouveaux outils d'aide à l'investigation post incendie. En effet, sur la demande des autorités judiciaires, l'expert doit de plus en plus étayer son jugement par la preuve pour convaincre du bien fondé de la théorie qu'il avance. À cause du caractère entropique du feu, il n'est pas toujours possible d'avancer les justifications suffisantes à chaque argument même si ce dernier est évident aux yeux de l'expert. Cette thèse a été consacrée à l'évaluation d'une alternative pour compléter l'argumentaire : l'utilisation d'un code de calcul numérique dans le processus d'investigation post-incendie. De façon simplifiée, la question principale étudiée a été de savoir si la simulation numérique est utilisable pour valider des hypothèses de scénario d'incendie avancées par l'investigateur et, dans l'affirmative, comment appliquer cet outil complémentaire à l'enquête sur site.
Ce travail se synthétise en trois étapes : le choix de l'outil numérique et son évaluation pour une utilisation en investigation, la mise en place d'une méthodologie d'investigation intégrant une étape de modélisation et, enfin, l'application de l'outil numérique et de la méthodologie d'investigation à deux cas réels.

Le choix de l'outil numérique s'est porté sur un code à champs développé par le NIST et appelé Fire Dynamics Simulator (FDS). C'est un outil gratuit, libre d'accès et relativement simple à mettre en œuvre. Il est de plus en plus utilisé dans le monde de l'incendie et en particulier pour des applications d'ingénierie dans le domaine de la sécurité. Cependant, au contraire de la sécurité incendie, une démarche sécuritaire, c'est-à-dire majorant le risque, n'est pas souhaitée dans les travaux en investigation. C'est une approche de reconstitution au plus proche des conditions rencontrées lors de l'incendie qui est recherchée. Cette approche de reconstitution a déjà été entreprise avec FDS sur de rares sinistres mais aucune démarche de systématisation de l'utilisation de l'outil numérique n'a encore été établie.
La première étape d'évaluation du code de calcul pour une application en investigation a été de déterminer un critère portant sur les cellules du maillage pour que la simulation d'un cas fictif de feu dans une chambre d'hôtel donne des résultats de température et de débit calorifique indépendants de la taille de maille utilisée. Le même travail a ensuite été entrepris pour que les hauteurs de flamme et les températures et les vitesses simulées dans le panache thermique et le jet sous plafond soient correctes. Les valeurs simulées ont été comparées aux valeurs mesurées ou obtenues grâce à des corrélations. Ces travaux ont mené à la conclusion que, pour simuler correctement les premiers instants d'un incendie, un R^* de l'ordre de 0,06 doit être utilisé dans la zone du foyer. Cette valeur est le meilleur compromis entre temps de calcul et précision du résultat pour l'application recherchée en investigation post incendie.
Cependant, si un tel R^* est utilisé pour mailler l'ensemble du domaine, les temps de calcul peuvent vite dépasser quatre ou cinq jours même pour la reconstitution d'un incendie dans un appartement d'une cinquantaine de mètres carrés de surface. C'est pourquoi, diverses stratégies de maillages ont alors été éprouvées sur le même cas fictif d'une chambre d'hôtel et d'un volume parallélépipède ouvert vers l'extérieur uniquement sur une face. Ces simulations ont permis de déterminer quelques règles élémentaires à respecter lors de la définition des maillages afin d'éviter des erreurs lorsqu'il est constitué de plusieurs blocs. Ces critères portent en particulier sur le saut de taille de maille à la frontière entre deux blocs et sur la position de la frontière par rapport au foyer et aux éléments définis comme combustibles dans le domaine de calcul.
En conclusion de l'étude sur l'outil numérique, le code à champs FDS semble adapté d'une part par la possibilité qu'il offre de simuler des scénarios relativement complexes et d'autre part la validité des calculs semble suffisante pour une application lors des premiers instants d'un incendie.
Quand les premiers instants de l'incendie sont évoqués, il ne faut pas entendre exactement les premières secondes de l'incendie qui suivent l'allumage. En effet, comme FDS gère relativement mal l'allumage des matériaux à partir d'un brûleur, des puissances surfaciques élevées doivent parfois être imposées pour atteindre l'inflammation des supports et la propagation des flammes. Comme la puissance dégagée et la surface de la source sont élevées par rapport à celle d'une cigarette par exemple, cela a pour conséquence de ne pas pouvoir simuler les premières secondes de l'allumage mais plutôt celles qui suivent, lorsque le foyer commence à se propager.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

De plus, afin de s'assurer d'une simulation correcte des scénarios, il apparait nécessaire de respecter certaines règles lors de l'élaboration du maillage et en particulier sur la taille des cellules à définir et la juxtaposition des différents blocs utilisés.

Des bases ayant été posées afin de s'assurer d'une utilisation appropriée de FDS pour la simulation des premiers instants d'un incendie, le travail suivant a consisté à rechercher comment interpréter les résultats des calculs dans un cadre d'investigation. Dans un premier temps, la démarche classique d'investigation générale d'un incendie a été présentée. Une étape supplémentaire nécessaire à la reconstitution du sinistre y a ensuite été ajoutée. Elle permet de collecter, de façon systématique, l'ensemble des données essentielles à la reconstitution numérique d'un sinistre : dimensions des volumes, état des ouvertures, charge calorifique, nature des matériaux, etc.. Cette étape intègre également la collecte de points de comparaison qui sont des effets thermiques ou mécaniques remarquables sur un matériau. À un point de comparaison est ensuite associée une sollicitation thermique, c'est-à-dire la conjugaison d'une température ou d'un flux thermique incident et d'un temps d'exposition. Cette sollicitation thermique, parfaitement localisée dans l'espace, est ensuite comparée aux valeurs calculées au même emplacement avec FDS. En multipliant dans l'espace les points de comparaison, un outil supplémentaire est alors disponible pour évaluer un scénario d'incendie. Si une majorité des sollicitations thermiques concorde entre les points de comparaison sur site et ceux introduits dans les modélisations numériques, le scénario simulé est alors jugé comme envisageable.
Cependant, il n'est pas toujours facile de lier une sollicitation thermique à une dégradation. Des recherches bibliographiques ont été menées afin d'évaluer la quantité d'informations disponibles pour effectuer le lien. Mais, devant le manque de données disponibles pour de nombreux matériaux, il a été choisi d'effectuer des expériences supplémentaires pour compléter les recherches bibliographiques. Des essais en laboratoire et sur des feux réels se sont focalisés sur des éléments couramment retrouvés dans des bâtiments à savoir, principalement, des interrupteurs, des prises de courant et des blocs autonomes d'éclairage de sécurité. La gamme de sollicitations thermiques susceptibles d'endommager ces éléments s'est révélée adéquate pour l'utilisation de ces matériels comme points de comparaison lors des premiers instants d'un incendie. La quantité de données récoltées n'a pas été suffisante pour permettre, à ce jour, une utilisation automatique de ces éléments comme points de comparaison. De nouveaux essais ont tout de même été proposés ainsi qu'une démarche d'interprétation des dégradations constatées sur les éléments et le lien qui peut être fait avec les sollicitations thermiques. Ces essais devront confirmer que, lorsqu'un même élément est soumis plusieurs fois à une exposition identique, une répétitivité des dégradations est constatée. Lors de ces essais, il sera également important d'étudier si deux sollicitations thermiques <temps – température> différentes mènent à un même état de dégradation. Il sera primordial que le dispositif d'essai ne soit pas uniquement basé sur du rayonnement, ou de la convection comme sur les essais déjà menés en laboratoire mais soit une combinaison de ces deux sollicitations, voire même couplées à la reproduction d'un dépôt de suies.
En conclusion, une méthode d'utilisation de la simulation numérique comme outil d'aide à l'investigation a été mise au point et les premières données nécessaires à sa mise en œuvre récoltées.

Dans le dernier chapitre, les résultats obtenus sur les conditions d'utilisation de FDS et sur la méthodologie d'investigation ont été appliqués à deux cas réels.
Le premier est la combustion d'un matelas en mousse polyuréthane dans deux configurations expérimentales différentes. Cette étude a été conduite pour évaluer le modèle de pyrolyse de FDS ainsi que pour appréhender les difficultés introduites par les changements d'échelles entre les essais préliminaires au cône calorimètre et les tests à échelle réelle.
La mousse polyuréthane a été choisie comme support des essais car le LCPP constate régulièrement des départs d'incendie localisés sur ce type de matériau, la cause de l'incendie étant très variable. La première configuration simulée est la combustion d'un matelas dans un caisson de transport maritime. La géométrie et les conditions expérimentales sont simples à modéliser ce qui permet de focaliser l'étude sur la propagation des flammes à la surface du matelas dans un essai dont la combustion est contrôlée par le combustible. Dans un premier temps, les données matériaux mesurées au cône calorimètre sont utilisées comme données d'entrée pour simuler l'essai. Avec la température d'auto-inflammation mesurée de 340 °C, aucune propagation n'est constatée sur la simulation. En la diminuant de 35 °C, les vitesses de propagation sont sous-estimées par rapport à l'essai. Elle doit être diminuée de 60°C pour que les vitesses de propagation calculées soient concordantes avec celles mesurées dans le caisson. L'étude de cette première configuration a mis en avant la difficulté d'utiliser

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

directement les données matériaux obtenues à l'aide d'essais au cône calorimètre sans que des effets liés au changement d'échelles n'apparaissent.
La seconde configuration est celle d'un matelas placé dans le coin d'une pièce d'un appartement communiquant vers un premier couloir, celui de l'appartement, puis vers une circulation en forme de L équipée d'un système de désenfumage asservi à une détection de fumée. Ce cas a été choisi afin d'évaluer la propagation du front de flamme sur la surface supérieure du matelas dans une configuration plus complexe et plus réaliste que celle du caisson de transport maritime. La simulation de l'essai est rendue plus difficile par la géométrie des lieux, plus complexe, le changement du régime de combustion qui passe rapidement vers un contrôle par la ventilation et les évènements extérieurs difficilement maîtrisables comme le déclenchement de la ventilation par exemple. Les données matériaux définies dans l'essai du caisson maritime pour que la propagation des flammes soit reproduite correctement sont utilisées pour la simulation de cette seconde configuration. Cependant, avec ces données matériaux, la vitesse moyenne de propagation du front de flamme est surestimée par rapport à l'expérimentation. Cette seconde simulation met en évidence les faiblesses du modèle de pyrolyse pour simuler la propagation du front de flamme à la surface du matelas en polyuréthane dans des conditions sous-ventilées. Dans une démarche d'investigation post-incendie, cela pourrait engendrer des erreurs sur les aspects temporels des évènements. La seconde faiblesse apparaissant est celle du modèle de combustion de FDS, toujours lorsque le régime devient sous-ventilé. Toutes les températures dans le domaine de calcul sont alors sous-évaluées et cela peut provoquer de mauvaises interprétations dans les dégradations de certains points de comparaison.

Le second cas réel étudié dans le dernier chapitre est la confrontation de différents scénarios simulés à une scène d'incendie selon la méthodologie d'investigation développée au chapitre 4. L'incendie concerne un studio dans un foyer logement pour personnes âgées dont l'occupante est décédée par intoxication après avoir respiré les fumées lors des premières minutes de l'incendie. L'enquête a déterminé avec de grandes certitudes que le feu débute après la chute d'un lampadaire halogène sur le lit. Quatre scénarios sont simulés et les résultats des calculs sont confrontés au cas par cas aux points de comparaisons repérés sur les lieux du sinistre.
La méthode pour évaluer les scénarios simulés a consisté à multiplier les points de comparaison. Le scénario de départ de feu dans la cuisine est rapidement écarté car les sollicitations thermiques simulées et déduites de l'observation ne sont pas concordantes aux points de comparaisons. Le choix est plus difficile entre les trois scénarios restant mais un dernier peut être écarté en étudiant les températures maximales atteintes sur les parois solides. Les deux derniers scénarios, à savoir un départ de feu sur le lit et un départ de feu sur le lit avec un accélérant, ne peuvent pas, dans ce cas, être réellement différenciés. Seule une recherche d'accélérants sur un prélèvement effectué à l'emplacement de la literie aurait éventuellement permis de privilégier l'un par rapport à l'autre.
Cependant, ces simulations ont permis de confirmer, en apportant des preuves scientifiques supplémentaires, que l'origine de l'incendie était vraisemblablement située sur la face la supérieure du lit et cela en utilisant la méthode de validation par les points de comparaison développée au chapitre 4. L'application de la simulation numérique peut donc, pour cet incendie, être considérée comme un outil supplémentaire efficace d'aide à l'investigation.

Les chapitres 3 et 4 ont présenté les méthodes pour intégrer l'étape de modélisation dans la démarche d'investigation ainsi que quelques critères à respecter pour simuler des scénarios d'incendie avec FDS. Comme l'a montré la simulation des hypothèses de départ d'incendie dans le foyer logement, les codes de calculs numériques peuvent se révéler être des outils très performants d'aide à l'investigation car ils permettent d'écarter certaines hypothèses. Cependant, même s'ils sont utilisés avec précautions par un utilisateur averti, les résultats des calculs ne sont pas toujours corrects après comparaisons à des valeurs expérimentales obtenues dans des configurations difficiles comme celle de la simulation du feu de matelas dans l'appartement présenté au chapitre 5. Des calculs erronés peuvent donc induire en erreur l'expert s'il considère chaque résultat comme acquis sans l'analyser d'un œil critique.
Il faut toujours se rappeler que les calculs sont obtenus à partir d'une modélisation de la réalité et, par essence, celle-ci n'en est pas encore une représentation fidèle. Certains phénomènes comme la combustion solide par exemple ne sont même pas encore correctement caractérisés d'un point de vue théorique. Les utilisateurs doivent donc être parfaitement conscients des limites et des forces du modèle qu'ils utilisent.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

La décision d'appliquer ou non la modélisation à une investigation se décide donc au cas par cas, selon la complexité des scénarios à simuler, les questions auxquelles les calculs doivent répondre, etc.. À l'heure actuelle, le LCPP a appliqué la modélisation après une demande des autorités sur seulement trois cas. Elles se sont partiellement basées sur les travaux présentés dans ce mémoire en particulier pour les stratégies de maillage.
Le premier des cas est l'incendie d'un immeuble ayant fait 17 morts. Le premier objectif des simulations était de vérifier que le scénario avancé d'une mise de feu, volontaire ou accidentelle, sur quatre à six poussettes d'enfants stockées au bas de la cage d'escalier pouvait mener aux dégradations constatées et aux temps relativement rapides de développement du foyer et d'embrasement généralisé de la cage d'escalier. Le second objectif était d'évaluer le rôle qu'avaient pu jouer des panneaux de contreplaqué de bois disposés verticalement du rez-de-chaussée jusqu'au dernier étage de la cage d'escalier.
Le second cas a été étudié afin de mettre en avant un éventuel caractère volontaire d'un incendie ayant fait deux victimes. Deux poussettes distantes de trois mètres environ l'une de l'autre étaient disposées dans le hall d'entrée d'un immeuble. Des départs de feu sur l'une des poussettes puis sur l'autre ont été tour à tour simulés. Les flux thermiques incidents et les températures atteintes aux emplacements des poussettes ont ensuite été étudiés afin de savoir si un départ de feu sur l'une aurait pu provoquer l'inflammation de l'autre sans que des conditions d'embrasement généralisé ne soient atteintes. Ainsi, si aucune des deux poussettes, lorsqu'elle est allumée, ne peut mener à l'inflammation de l'autre, deux origines sont envisagées et le caractère volontaire du sinistre est à privilégier. À partir des modélisations des divers scénarios d'incendie, les conditions de tenabilité dans la cage d'escalier ont également été étudiées afin de mieux comprendre le décès des victimes retrouvées sur deux paliers des étages supérieurs.
Le départ de feu du troisième et dernier cas se situe également dans le hall d'entrée de la cage d'escalier d'un immeuble avec, une nouvelle fois, une mise de feu sur des poussettes. L'objectif de l'étude a cette fois été d'étudier si l'énergie dégagée par la combustion d'une puis de deux poussettes aurait été suffisante pour dégrader suffisamment la soudure étain/plomb liant deux colonnes d'alimentation de gaz qui serpentaient dans la cage d'escalier. La fonte de cette soudure avait provoqué la création d'une torchère qui avait largement aggravé l'incendie ayant fait 3 victimes.
Dans chacun de ces trois cas, les simulations ont permis de répondre aux questions posées par les autorités tout en apportant des preuves supplémentaires à l'expert pour qu'il étaye son propos. Les simulations n'ont cependant pas été utilisées selon la méthode avancée au chapitre 4 car l'objectif n'était pas réellement de valider un scénario (bien que cela soit fait indirectement) mais plutôt de répondre à une ou plusieurs questions précises.

La simulation numérique est d'ores et déjà appliquée dans un objectif d'investigation à quelques cas. Ce mémoire présente des méthodes et des outils pour généraliser cette application à la majorité des scénarios. Cependant, des travaux complémentaires sont encore à mener pour que la simulation soit plus facilement ou plus efficacement applicable à l'investigation post incendie.
Pour commencer, à cause de l'évolution des codes de calculs, un suivi, une vérification et une adaptation des résultats présentés dans le chapitre 3 doivent être faits régulièrement aux nouvelles versions. De plus les améliorations du code doivent être prises en compte pour modifier et adapter la démarche de modélisation et d'investigation pour tirer bénéfice des nouveaux développements.
Un lourd travail sur la caractérisation des points de comparaison doit être mené. L'utilisation d'éléments tels que les prises de courant, les interrupteurs ou encore les blocs autonomes d'éclairage de sécurité s'est révélée positive. Pour systématiser leur utilisation, il faudra travailler sur les méthodes de caractérisation des points de comparaison. Un ensemble de données expérimentales sera à collecter pour lier la dégradation à la sollicitation thermique afin de constituer éventuellement un catalogue de points de comparaison à l'utilisation de l'investigateur. Ces travaux passent en particulier par la mise en place de critères de dégradation mieux définis.
Enfin, des recherches sur l'application des points de comparaison à des cas réels devront être menées afin de savoir dans quelles conditions valider ou un non un scénario, c'est-à-dire à partir de combien de points de comparaison concordants une hypothèse est validée et pour combien de discordants elle est écartée.
Ce sont les axes de recherche principaux qui semblent nécessaires à l'amélioration de la méthode et de son application. Tous les développements qu'il pourrait être nécessaire d'apporter à FDS pour une utilisation en investigation ne sont pas évoqués ici car ils suivent en majorité les axes de recherches actuels c'est-à-dire des travaux principalement menés sur les modèles de pyrolyse et de combustion solide.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

7 Bibliographie

AIAA, 1998, *Guide for the verification and validation of Computational Fluid Dynamics simulations*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA G-077-1998.

ALPERT R., 2002, *Ceiling jet flows*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 2.18-2.31.

ARTOUS S., NORVEZ O., PREVOST C., ROCHAS V., 2007, *Étude du comportement de vitrages soumis à des contraintes couplées de pression et de température*, DSU/SERAC/LECEV/07-30, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.

ASTM C856, 2004, Standard *Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI : 10.1520/C0856-04.

ASTM E176, 2008, *Standard terminology of fire standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI : 10.1520/E0176-08A.

ASTM E 1317, 2008, *Standard Test Method for Flammability of Marine Surface Finishes,* ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI :10.1520/E1317-08A.

ASTM E 1321, 2008*, Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties,* ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI : 10.1520/E1321-09.

ASTM E1355, 2005, *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models*, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI : 10.1520/E1355-05A.

ATREYA A., 1984, *Pyrolysis ignition and fire spread on horizontal surface of wood*, *NBS-GCR-83-449.*

ATREYA A., 2002, *Convection heat transfer*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 1.44-1.72.

BABRAUSKAS V., 1979, *Full scale burning behaviour of upholstered chairs*, National Bureau of Standards, NBS technical note n° 1103.

BABRAUSKAS V., 1980, *Estimating room flashover potential*, Fire Technology n°16, 2, pages 94-104.

BABRAUSKAS V., 1984, *Upholstered furniture room fires – Measurements, comparison with furniture calorimeter data, and flashover predictions*, Journal of Fire Science n°2, pages 5-19.

BABRAUSKAS V., 1984A*, Development of the cone calorimeter – A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption*, Fire and Materials n°8, pages 81 – 95.

BABRAUSKAS V., KRASNY J., 1985, *Fire behavior of upholstered furniture*, National Bureau of Standards, NBS Monograph 173.

BABRAUSKAS V., AMES S., PARKER W., 1992, *Upholstered Furniture: prediction by correlations*, Heat release in fires, chapter 15, Elsevier Applied Science.

BABRAUSKAS V., KRASNY J., 1997, *Upholstered furniture transition from smoldering to flaming*, Journal of Forensic Sciences, Novembre, pages 1029-1031.

BABRAUSKAS V., 2003, *Ignition Handbook*, Fire Science Publishers and Society of Fire Protection Engineers.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

BABRAUSKAS V., 2003A, *The cone calorimeter*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 3.63-3.81.

BABRAUSKAS V., 2003C, *Ignition of wood: a review of the state of the art,* Journal of Fire Protection Engineering, vol. 12, No. 3, pages 163-189.

BABRAUSKAS V., 2004, *Wood char: Interpretation in fire investigation*, International Symposium on Fire Investigation.

BABRAUSKAS V., 2006, *Temperatures in flames and fires*, Fire Science and Technology Inc., http://www.doctorfire.com/flametmp.html.

BAUM H.R., McGRATTAN K.B., REHM R.G., 1997, *Three dimensional simulations of fire plume dynamics*, Fire Safety Science – Proceedings of the Fifth International Symposium, pages 511-522.

BECKER H.A., LIANG D., 1978, *Visible length of vertical free turbulent diffusion flames,* Combustion and Flame, n°32, pages 115-137.

BEYLER C., HIRSCHLER M., 2002, *Thermal decomposition of polymers*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 1.110-1.131.

BOUNAGUI A., BÉNICHOU N., McCARTNEY C., KASHEF A., 2003, *Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses*, NRCC-46760, 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics.

BRYNER N., MADRZYKOWSKI D., GROSSHANDLER W., 2007, *Reconstructing the station nightclub fire – Computer modelling of the fire growth and spread*, 11th International Fire Science & Engineering Conference Interflam '07.

BRYNER N., MADRZYKOWSKI D., GROSSHANDLER W., 2007, *Reconstructing the station nightclub fire – Materials testing and small-scale experiments*, Proceedings of the 11th International Fire Science & Engineering Conference Interflam '07.

BUKOWSKI R., 1995, *Modelling a backdraft : the fire at 62 Watts street*, NFPA Journal, November/December, pages 85-89.

CHU N., 2004, *Calcination of gypsum plasterboard under fire exposure*, Fire Engineering Research Report 04/6, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.

COX G., CHITTY R., 1985, *Some Source-Dependent effects of unbounded fires*, Combustion and flame, n°60, pages 219-232.

CLEMENT J., 2000, *Experimental verification of the Fire Dynamics Simulator (FDS) hydrodynamics model*, Thèse de Doctorat présentée à l'University of Canterbury.

CNPP, 2007, *Méthodologie de recherche des causes d'incendie*, gestion de sinistres, Étude Prévention EP 02.11.

CURTAT M, 2002, *Physique du feu pour l'ingénieur*, Tome 3 du Traité de physique du bâtiment, CSTB.

d'HOOP J.-M., 2005, *Maîtriser et gérer le risque d'incendie*, AFNOR.

DELÉMONT O., 2005, *Intégration de l'influence de l'évolution dynamique du feu dans l'investigation d'incendies en criminalistique : Evaluation du recours à la modélisation informatique*, Thèse de Doctorat présentée à l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne.

DELÉMONT O., MARTIN J.-C., 2007, *Application of Computational Fluid Dynamics modelling in the process of forensic fire investigation: Problems and solutions*, Forensic Science International n°167, pages 127-135.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

DESANGHERE S., 2006, *Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie,* Thèse de Doctorat présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen.

DOSANJH S.S., PAGNI P.J., FERNADEZ-PELLO A.C., 1987, *Forced co-current smouldering combustion*, Combustion and Flame n°68, pages 131-142.

DRYSDALE D., MACMILLAN A., SHILITTO D., 1992, *The king's Cross fire: experimental verification of the "trench effect"*, Fire Safety Journal Vol. 18, n°1, pages 75-82.

DRYSDALE D., 1985, *Fire behaviour of cellular polymers*, Cellular Polymer, 4, pages 405-419.

DRYSDALE D., 1999a, *An introduction to fire dynamics*, Second Edition, John Wiley and Sons.

DRYSDALE D., 1999b, *Interpretation of evidence at the fire scene: the importance of fire dynamics*, Proceedings of the 8th International Fire Science & Engineering Conference Interflam '99, Vol. 1, pages 85-97.

EVANS D., 1995*, Ceiling jet Flows*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, NFPA-SFPE, pages 2.32-2.39.

FANG J.B., 1975, *Measurement of the behaviour of incidental fires in a compartment*, National Bureau of Standards, NBSIR 75-679.

FERNANDEZ-PELLO A., 1994, *The solid phase*, Combustion Fundamentals of Fire, Cox G., Academic Press. Chapter 2, pages 31-100.

FRIDAY P., MOWRER F., 2001, *Comparison of FDS model predictions with FM/SNL fire test data*. NIST GCR 01-801, National Institute of Standards and Technology.

FRIEDMAN R., 1975, *Behaviour of fires in compartments*, Proceedings of International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, pages 100-113.

FRIEDMAN R., 1978, *Quantification of threat from a rapidly growing fire in terms of relative material properties*, Fire and Materials, n°2, pages 27-33.

GARDINER M., 2001, *Guide to fire and arson investigation*, Second Edition, FM Global.

GOTT E., LOWE D., NOTARIANNI K., DAVIS W., 1997, *Analysis of high bay hanger facilities for fire detection sensitivity and placement*, NIST TN 1423, National Institute of Standards and Technology.

GRANDISON A., GALEA E., PATEL M., PEACE D., 2001, *Fire modelling standard/benchmark: Report on phase 1 simulations*, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, Londres.

GRANDISON A., GALEA E., PATEL M., PEACE D., 2001, *Fire modelling standard/benchmark: Report on phase 2 simulations*, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, Londres.

HÄGGLUND B., JANSSON R., ONNERMARK B., 1974, *Fire development in residential rooms after ignition from nuclear explosions*, FOA Report C 20016-D6 (A3).

HASSANI S., SHIELDS T., SILCOCK G., 1994, *An experimental investigation into behaviour of glazing in enclosure fire*, Journal of Applied Fire Science, Vol. 4, pages 303-323.

HAWTHORNE W.R., WEDDEL D.S., HOTTEL H.C., 1949, Third Symposium on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore.

HESKESTAD G., 1984, *Engineering relations for fire plumes*, Fire Safety Journal, n°7, pages 25-32.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

HESKESTAD G., 1997, *Flame Heights of Fuel Arrays with Combustion in Depth*, Fire Safety Science – Proceedings of the fifth International Symposium, pages 427-438.

HESKESTAD G., 2002, *Fire plumes, flame height, and air entrainment*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 2.1-2.17.

HUGGET C., 1977, *Time-dependent fire behaviour of aircraft cabin materials*, Reports FAA-RD-77-99, Federal Aviation Administration, Washington.

HUGGETT C., 1980, *Estimation of the rate of heat release by means of oxygen consumption*, Journal of Fire and Materials n° 4, pages 61-65.

IERARDI J., BARNETT J, 2003, *A quantitative method for calibrating CFD model calculations*. Proceedings of CIB-CTBUH International Conference on tall buildings.

ISO 13 943, 2000, *Fire Safety – Vocabulary*, International Organization for Standardization, Genève.

ISO 5658-2, 2007, *Partie 2 : Propagation latérale sur les produits de bâtiment et de transport en position verticale*, Propagation du feu, International Organization for Standardization, Genève.

ISO 5659, 2007, *Production de fumées - partie 2 : détermination de la densité optique par un essai en enceinte unique,* Plastiques, International Organization for Standardization, Genève.

ISO 5660, 2002, *Débit calorifique (méthode au calorimètre conique) - Essais de réaction au feu, débit calorifique, taux de dégagement de fumée et taux de perte de masse*, International Organization for Standardization, Genève.

JACQUEMET PAPILLOUD J., 2003, *L'incendie volontaire. Méthodes et outils d'investigation – analyse stratégiques et opérationnelles*, Thèse de Doctorat présentée à l'Institut de Police Scientifique et de Criminologie de l'université de Lausanne.

JO, 2002, *Article EC5 - appareils d'éclairage*, Journal Officiel de la République Française du 7 février 2002.

JONES W., 2001, *State of the art in zone modelling of fire*, Proceedings of the 9th International Fire Protection Seminar, pages 89-126.

JONES W., PEACOCK R., FORNEY G., RENEKE P., 2004, *CFAST – Consolidated model of fire growth and smoke transport, Technical reference guide*, NIST Special Publication 1030.

KALGHATGI G.T., 1984, *Lift-off height and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air*, Combustion Science and Technology, n°41, p 17-29.

KANURY A.M., 1972, *Ignition of cellulosic materials: a review*, Fire Research Abstracts and Reviews, n°14, pages 24-52.

KARLSSON B., QUINTIERE J.G., 2000, *Enclosure fire dynamics*, CRC Press.

KEALY M., LAW M., 2003, *CIBSE Guide E: Fire engineering*, Section 10 – Fire dynamics, CIBSE.

KENNEDY P., KENNEDY K., HOPKINS R., 2003, *Depth of calcinations measurement in fire origin analysis*, Fire Science Applications to Fire Investigation – A Compendium of Research Papers, Interscience Communications Ltd.

KESKI-RAHKONEN O., 1988, *Breaking of window glass close to fire*, Fire and Materials n°12, pages 61-69.

KOYLU U., FAETH G., 1991, *Carbon monoxide and soot emissions from liquid-fuelled buoyant turbulent diffusion flames*, Combustion and Flame n°87, pages 61-76.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

LA HOUGUE T., 2005, *L'aspect technique de l'incendie volontaire : Comment le reconnaître ?*, Agence pour la Lutte contre la Fraude à l'Assurance (ALFA).

LABORATOIRE CENTRAL DE LA PREFECTURE DE POLICE, GAREL J.-M., DONATI J., 2006, *Rapport de réquisition n° 91050/06 et n° 91057/06* (Intervention Permanence générale n° 399/06).

LABORATOIRE CENTRAL DE LA PREFECTURE DE POLICE, BAZIN H., THIRY A., SUZANNE M., FAURE E., BELLIVIER A., DREUILLE N., MERCIER E., 2008, *Rapport d'essai 167/08, Expérimentation de feux réels dans un immeuble d'habitation*, Laboratoire Central de la Préfecture de Police.

LASSUS J., 2009, *Risque d'inflammation de gaz imbrûlés au cours d'un incendie en milieu confiné-ventilé*, Thèse de Doctorat présentée l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique.

LETEURTROIS J.-P., MAIGNAUD J.-M., 2005, *Avis relatif aux luminaires halogènes déplaçables 01/05*, Rapport à la Commission de la sécurité des Consommateurs.

LIN C., FERNG Y., HSU W., 2009, *Investigating the effect of computational grid sizes on the predicted characteristics of thermal radiation for a fire*, Applied Thermal Engineering n° 29, pages 2243-2250.

LOSS PREVENTION COUNCIL, 1999, *Fire spread in multi-storey buildings with glazed curtain wall facades*, LPR11.

MA T., QUINTIERE J., 2003, *Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations*, Fire Safety Journal n° 38, Issue 5, pages 467-492.

MAKAROV D., MOLKOV V., 2009, *Conductive heat transfer*, Lecture 4 – Heat transfer, Master of Fire Safety Engineering, University of Ulster.

MARTIN J-C., 2008, *Incendies et explosions d'atmosphère*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection Sciences Forensiques.

McCAFFREY B., 1979, *Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results*, NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards.

McCAFFREY B., QUINTIERE J., HARKLEROAD M., 1981, *Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations*, Fire Technology n°17, pages 98-119.

McDERMOTT R., McGRATTAN K., HOSTIKKA S., FLOYD J., 2009, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide*, Volume n°2: Verification, NIST special publication 1018-5.

McGRATTAN K., FLOYD J., FORNEY G., BAUM H., HOSTIKKA S., 2003, *Improved radiation and combustion routines for a large eddy simulation fire model*, Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium.

McGRATTAN K., 2006, *Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical reference guide*, NIST special publication 1018.

McGRATTAN K., FORNEY G., 2006, *Fire Dynamics Simulator (Version 4) – User's guide*, NIST special publication 1019.

McGRATTAN K., KLEIN B., HOSTIKKA S., FLOYD J., 2009, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide*, Volume n°3: Validation, NIST special publication 1018-5.

McMAHON J., DODD F., TAYLOR I., DONEGAN H., 1993, *Fire modelling – A postgraduate student's perception*, Proceedings of the 6th International Fire Conference Interflam '93.

MIKKOLA E, 1990, *Charring of wood*, Research Report 689, Valtion Teknillinen Tutimuskesku, Finland.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

MIZUNO T., SASAGAWA F., HORIUCHI, KAWAGOE K., 1981, *Burning behaviour of urethane foam mattresses*, Fire Science and Technology, n°1, pages 33-44.

MIZUNO T., KAWAGOE K., 1984, *Burning behaviour of upholstered chairs*, Fire Science and Technology, n°4, pages 37-35.

MIZUNO M., MATSUYAMA K., TANAKA T., HAGIWARA I., HARADA K., OMIYA Y., TOMATSU T., 1999, *A case study of a performance based fire safety design method to a high-rise office building*, Journal of Architecture and Building Science n°114.

MOODIE K., JAGGER S., 1992, *The King's Cross fire: Results and analysis from the scale model tests*, Fire Safety Journal n°18, pages 83-103.

MOUSSA N.A., TOONG T.Y., GARRIS C.A., 1977, *Mechanisms of smouldering of cellulosic materials*, Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion, pages 1447-1457.

MOWRER F., 2003, *Ignition characteristics of various fire indicators subjected to radiant heat fluxes*, Proceedings of the 8th Fire & Materials Conference.

MSAAD Y., 2005, *Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées*, Thèse de Doctorat présenté à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

NF 92501, 1995, *Essai par rayonnement applicable aux matériaux rigides ou rendus tels (matériaux de revêtement collés) de toute épaisseur et aux matériaux souples d'épaisseur supérieure à 5 mm*, Sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux.

NF 92503, 1995, *Essai au brûleur électrique applicable aux matériaux souples*, Sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux.

NF 92504, 1995, *Essai de persistance et mesure de vitesse de propagation de flamme*, Sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux.

NF 92505, 1995, *Essai applicable aux matériaux thermofusibles : essai de goutte*, Sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux.

NF 92506, 1985, *Essai au panneau radiant pour revêtements de sol*, Sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux.

NF EN ISO 4589, 1999, *Détermination du comportement au feu au moyen de l'indice d'oxygène*, Plastiques.

NF EN ISO 13943, 2001, *Vocabulaire*, Sécurité au feu.

NF X 10700-1, 2006, *Partie 1 : méthodes d'analyses des gaz provenant de la dégradation thermique*, Essais de comportement au feu - Analyse des effluents gazeux.

NF X 10700-2, 2006, *Partie 2 : méthode de dégradation thermique au four tubulaire*, Essais de comportement au feu - Analyse des effluents gazeux.

NFPA 921, 2001, *Guide for fire and explosion investigations*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.

NOWLEN S., 1987, *Enclosure characterization testing for the baseline validation of computer fire simulation codes*, NUREG/CR-4681.

NUREG-1824, 2007, *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7 Fire Dynamics Simulator*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, EPRI 1011999.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

OHLEMILLER T.J., ROGERS F.E., 1978, *A survey of several factors influencing smouldering combustion in flexible and rigid polymer foams*, Journal of Fire and Flammability, n°9, pages 489-509.

OHLEMILLER T.J, LUCCA D.A., 1983, *An experimental comparison of forward and reverse smoulder propagation in permeable fuel beds*, Combustion and Flame, n° 54, pages 131-148.

OHLEMILLER T.J., 2002, *Smoldering combustion*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 2.200-2.210.

PAGNI P., JOSHI A., 1991, *Glass breaking in fires*, Proceedings of the 3rd International Symposium of Fire Safety Science, pages 791-802.

PAPE R., 1977, *Burn rate data*, IIT Research Institute, Chicago.

PEACOCK R., BABRAUSKAS V., 1992, *Heat release rate: the single most important variable in fire hazard*, Fire Safety Journal, n°18, pages 255-272.

PEACOCK R., RENEKE P., BUKOWSKI R., BABRAUSKAS V., 1999, *Defining flashover for fire hazard calculation*s, Fire Safety Journal, n°32, pages 331-345.

PEACOCK R., JONES W., FORNEY G., 2005, *CFAST – Consolidated model of fore growth and smoke transport, User's guide*, NIST Special Publication 1034.

PERESSON C. 2008, *Utilisation de points de calage dans l'évaluation de modélisations numériques de l'incendie*, Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris, ENSI Bourges.

PETTERSON N., 2002, *Assessing the feasibility of reducing the grid resolution in FDS field modelling*, Fire Engineering Research Report 2002/6, University of Canterbury.

PIEROPAN F., REY V., DE MEO P., POUSSE G., SROKA A., 2001, *Guide technique à l'enquête – Recherche des causes d'un incendie*, Ministère de l'Intérieur.

PLA P., DIDIEUX F., 2007, *Extrapolation des données petite échelle aux foyers réels - Caractérisation des foyers*, Projet National Ingénierie de la Sécurité Incendie, Groupe 4, Action 11.

QUINTIERE J., 1995, *Compartment fire modelling*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 3.162-3.170.

QUINTIERE J., 1995, *Surface Flame Spread*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, NFPA-SFPE, pages 2.205-2.217.

QUINTIERE J., 2006, *Fundamentals of fire phenomena*, John Wiley and Sons.

RABASH D.J., 1975, *Relevance of firepoint theory to the assessment of fire behaviour of combustible materials*, International Symposium of Fire Safety of Combustible Materials, pages 169-178.

REHM R., BAUM H., 1978, *The equations of motion for thermally driven buoyant flows*, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Volume 83, n° 3, pages 297-308.

RENAUD C., 2007, *Comportement au feu de deux châssis vitrés*, Projet National Ingénierie de la Sécurité Incendie, Groupe 4, Action 14, tâche 2.

RITCHIE S., STECKLER A., HAMINS A., CLEARY T., YANG J., KASHIWAGI T., 1997, *The effect of sample size on the heat release rate of charring materials*, Fire Safety Science – Proceedings of the 5th International Symposium, International Association for Fire Safety Science, pages 177-188.

ROCKETT J.A., MILKE J.A., 2002, *Conduction of heat in solids*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 1.27-1.43.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

ROHR K., 1999, *U.S. home product report, 1992-1996: Forms and types of materials first ignited in fires*, National Fire Protection Association, Quincy, MA.

ROYTMAN M., 1975, *Principles of fire safety standards for building construction*, National Technical Information Service.

SCHLESINGER S., 2000, *Terminology for model credibility*, Simulation, Volume n° 128, pages 2920-2934.

SCHROEDER R., WILLIAMSON R., 2003, *Application of materials science to fire investigation*, Fire Science Applications to Fire Investigation – A Compendium of Research Papers, Interscience Communications Ltd.

SCHROEDER R., 1999, *Post-fire analysis of construction materials*, University of California, Berkeley.

SFPE 2002, *Fuel properties and combustion data*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages A.34-A.42.

SIMCOX S., WILKES N., JONES I., 1992, *Computer simulation of the flows of hot gases from the fire at King's Cross underground station*, Fire Safety Journal n°18, pages 49-73.

STECKLER K., QUINTIERE J., RINKINEN W., 1982, *Flow induced by a fire in a compartment*, NBSIR 82-2520, National Bureau of Standards.

STEWARD F.R., 1970, *Prediction of the height of turbulent diffusion buoyant flames*, Combustion Science and Technology, n°2, pages 203-212.

THOMAS P.H., 1963, *The size of flames from natural fires*, Ninth Symposium on Combustion, pages 844-859.

THOMAS P.H., 1981, *Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms*, Fire and Materials, n°5, pages 103-111.

THOMAS P.H., 1982, *Modelling of compartment fires*, Proceedings of the 6th International Fire Protection Seminar, pages 29-46.

THORNTON W., 1917, *The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds*, Philosophical Magazine and Journal of Science n° 33, pages 196-203.

TIEN C.L., LEE K.Y., STRETTON A.J., 2002, *Radiation heat transfer*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 1.73-1.89.

TORERO J.L., FERNANDEZ-PELLO A.C., 1995, *Natural convection smoulder of polyurethane foam upward convection*, Fire Safety Journal, n°24, pages 35-52.

TORERO J.L., FERNANDEZ-PELLO A.C., 1996, *Forward smoulder of polyurethane foam in a forced air flow*, Combustion and Flame, n°106, pages 89-109.

WALTON W.D., NOTARIANNI K.A., 1993, *A comparison of ceiling jet temperatures measured in an aircraft hanger test fire with temperatures predicted by DETACT-QS and LAVENT computer models*, NISTIR 4947.

WALTON W.D., THOMAS P.H, 2002, *Estimating temperatures in compartment fires*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pages 3.171-3.188.

WATTERMAN T.E., 1968, *Room flashover – criteria and synthesis*, Fire Technology, n°4, pages 25-31.

ZHENG F., 2002, *Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiments*, Advances in Colloid and Interface Science, volume 97, n° 1-3, pages 255-278.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

ZHOU L., 1992, *Solid fuel flame spread and mass burning in turbulent flow*, NIST-GCR-92-602.

ZUKOSKI E., CETEGEN B., KUBOTA T., 1984, *Visible structure of buoyant diffusion flames*, Proceedings of the 20th Symposium on Combustion, page 361-366.

ZUKOSKI E., CETEGEN B., KUBOTA T., 1982, *Entrainment and flame geometry of fire plumes*, NBS-GCR-82-402.

ZUKOSKI E., KUBOTA T., CETEGEN B., 1980, *Entrainment in fire plumes*, Fire Safety Journal, n°3, pages 107- 121.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

8 Annexes

Sommaire des annexes

Annexe 1. Procédure de recueil des données _____244
Annexe 2. Fiche de recueil des données_____250
Annexe 3. Identification d'un liquide inflammable ou de traces d'imbrulées d'un tel liquide dans les prélèvements de débris d'incendie par chromatographie en phase gazeuse (CG) et/ou par couplage de la chromatographie en phase gazeuse avec la spectrométrie de masse_____260
Annexe 4. Lateral Ignition and Flame Spread _____262
Annexe 5. Cône calorimètre_____263
Annexe 6. Four tubulaire _____266
Annexe 7. Résultat des essais en laboratoire _____267
Annexe 8. Essais de la rue Boinod_____271
Annexe 9. Essais du Puy en Velay_____274
Annexe 10. Caractérisation des points de comparaison lors des essais du Puy en Velay _____290
Annexe 11. Photographies prises lors de l'analyse en laboratoire du lampadaire halogène impliqué dans l'incendie du chapitre 5 _____303
Annexe 12. Complément des données d'entrée du cas fictif de la chambre d'hôtel _____305
Annexe 13. Test de Belstein_____307
Annexe 14. Températures mesurées à la surface du matelas pour l'expérience dans le caisson de transport maritime _____308
Annexe 15 Températures mesurées à la surface du matelas pour l'expérience dans l'appartement 309
Annexe 16. Températures simulées à la surface du matelas pour l'expérience dans l'appartement 310
Annexe 17. Photos complémentaires de l'investigation sur l'incendie d'un appartement _____311

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 1. Procédure de recueil de données

Cette procédure, rédigée au sein du LCPP, décrit l'organisation, la démarche et les responsabilités de chaque intervenant pour collecter l'ensemble des données nécessaires à la modélisation des sinistres par le calcul. Elle est rédigée selon la procédure qualité mise en place au LCPP.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

PROJET

PROCEDURE SPECIFIQUE QUALITE N° 01

Recueil des données sur site d'incendie

1-Objet

Cette procédure décrit l'organisation, la démarche et les responsabilités de chacun pour collecter l'ensemble des données nécessaires à la modélisation des sinistres par le calcul.

2-Domaine d'application

Cette procédure s'applique à toutes les interventions réalisées par l'équipe d'ingénierie du feu sur des sinistres signalés par la direction, les ingénieurs de la permanence générale ou par un membre du projet « Ingénierie du feu »**.**

Ces incendies doivent être sélectionnés parmi ceux concernant les chambres d'hôtel, d'établissement sanitaire, ou d'appartement. Toutefois, le responsable d'étude de l'équipe d'ingénierie peut décider d'étudier tout type de sinistre.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

3-Références

ASQ_MQ01 Manuel qualité du LCPP

Lettre de mission du directeur du LCPP du 12/09/2005

4-Définitions

Échantillon

Désigne un ou plusieurs spécimens représentatifs de la production à qualifier. Les échantillons sont prélevés par le chargé d'étude.

Référentiel

Désigne une norme, un règlement, une spécification particulière.

Résultat de modélisation

Fichiers émis à la fin de l'étude qui présentent les résultats des calculs, et, éventuellement, d'autres informations s'y rapportant.

Terminologie technique

Le vocabulaire utilisé correspond aux termes et définitions portés en anglais, français et allemand dans la norme NF EN ISO 13943 (janvier 2001)

5-Principes

Tout signalement doit être effectué auprès du membre de l'équipe d'ingénierie du feu d'astreinte déclaré au secrétariat du département DEI. Dès réception, il fait l'objet d'une étude de faisabilité par un responsable d'essai qui prend en compte la nature des locaux affectés, le niveau de préservation des indices et l'accessibilité des lieux.

Dans le cas ou le sinistre proposé correspond aux critères de faisabilité, un déplacement est alors organisé pour effectuer les taches nécessaires au recueil des données d'entrée des modèles de calcul.

6-Responsabilités

Le chef de projet est informé des interventions demandées au groupe. Il signe les courriers à caractère particulier et les rapports d'étude.

Le responsable d'essai examine la demande d'intervention. Il prend en charge l'organisation du déplacement. Il décide de la conduite à tenir en cas de difficultés techniques. Il valide les indications techniques portées sur les fiches de recueil de données (ISI_FIC02). Il rend compte périodiquement au chef de projet de l'avancement des études dont il a la charge. Il signe le rapport d'étude.

Le chargé d'essai réalise les études et rédige les fiches de recueil de données (ISI_FIC02).

Le personnel du secrétariat DEI est chargé de l'enregistrement du courrier et de l'envoi du rapport d'étude.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

7-Processus

Étapes

Étape **0**

Le demandeur (la direction, les ingénieurs de la permanence générale ou par un membre du projet « Ingénierie du feu ») prend contact avec le responsable d'essai d'astreinte du « groupe ingénierie ». La fiche d'informations préalables ISI_FIC01 est rédigée *(nature de l'affaire, circonstances du sinistre, centre de secours BSPP concernés, chronologie des événements, …).* Une concertation s'engage entre les parties pour identifier la faisabilité de l'étude en fonction des critères de l'affaire. Cette fiche a valeur de demande de travail par le demandeur.

Étape **1**

Le responsable d'essai prend les contacts nécessaires avec les autorités publiques ou judiciaires en vue d'un déplacement sur le site de l'incendie. Il contacte éventuellement les services de secours et d'incendie pour les détails de l'intervention.

Étape **2**

Sur les lieux, le responsable d'essai détermine si l'étude peut être engagée, en fonction des indices encore présents et des critères de faisabilité précités.

Dans la négative, il complète la fiche d'informations préalables ISI_FIC01 en précisant la nature des difficultés rencontrées et retourne la fiche au demandeur pour clôture de la mission.

Dans l'affirmative, il complète la fiche d'informations préalables (ISI_FIC01) et ouvre une fiche de recueil ISI_FIC02.

Étape **3**

L'équipe d'ingénierie repère les volumes affectés par les effets thermiques du feu après une visite complète des locaux directement ou indirectement concernés par le sinistre.

Elle définit la zone sur laquelle portera l'étude.

Étape **4**

Il est procédé aux relevés topographiques et photographiques de ces volumes sur la fiche ISI_FIC02 en suivant les indications mentionnées sur celle-ci.

Étape **5**

Des informations utiles auprès des occupants sur la disposition des éléments mobiliers, équipements et appareillages sont recueillies. Disposer les éléments à leur emplacement d'origine.

Étape **6**

Tous les éléments dont l'état (absence de dégradation, déformation, carbonisation partielle ou complète,..) pourrait donner des indications sur les caractéristiques des effets thermiques (en suivant les indications mentionnées sur la fiche ISI_FIC02) sont repérés et photographiés.

Étape **7**

Un échantillon des matériaux ayant participé au développement du feu est prélevé, conditionné, identifié et, repéré sur la ISI_FIC02.

Suivi des études

Le suivi de l'avancement des études est effectué lors des réunions du groupe ingénierie.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

8-Documents liés

ISI_FIC01 "Fiche d'informations préalables"

ISI_FIC02 "Recueil de données"

9-Annexes

Annexe A : Historique des modifications

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

ANNEXE A

Historique des modifications

Révision	§ / Page	Sujet / Objet
00	Tous	Création.
02		
03		
04		
05		

Observations :

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 2. Fiches de recueil de données

Les neuf fiches suivantes de recueil de données sur site ont été élaborées dans le cadre du présent travail de recherche afin de collecter sur les scènes d'incendie les informations nécessaires à la modélisation des scénarios. La première série de fiche est distribuée aux premiers intervenants. Ils doivent y inscrire les informations essentielles pour se faire un avis rapide sur le contexte de l'incendie et toutes les coordonnées utiles au lecteur pour qu'il puisse prendre contact avec l'ensemble des premiers intervenants. La seconde série de fiches est à compléter par les seconds intervenants se rendant sur les lieux de l'incendie dans le but de collecter les informations nécessaires à la reconstitution du sinistre. Elle rassemble les dimensions des locaux, les matériaux les constituants, le mobilier, etc..

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Fiche d'informations préalables-	ISI_FIC01
Date			Folio n°0

Renseignements administratifs:

Ingénieur PG:

Technicien PG:

N° affaire PG:

Date d'intervention:

Heure d'intervention:

Nature de l'affaire:

Adresse de l'affaire:

Nombre de blessés: victimes:

Chronologie des faits:

-Heure de départ estimée du feu:

-appel des secours:

-arrivée des secours sur les lieux:

-feu maîtrisé:

Contacts utiles:

Centre de secours BSPP concerné	Nom:	Tel:
Autorité judiciaire (PJ, Ciat, ...)	Nom:	Tel:
Autorités publiques (mairies, ...)	Nom:	Tel:
Autres (préciser):	Nom:	Tel:

Conservation des lieux:

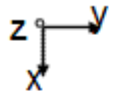
-Demande de conservation des lieux effectuée?

-% de mobilier restant après déblai dans le local sinistré?

Origine du sinistre:

Photos et plans effectués par l'IJ? **Contact:**

Étude IDF N°		-Recueil de données - PLAN MASSE-	ISI_FIC01
Date		*Ensemble des pièces affectées par le feu et fumées*	Folio n°1



Nature et hauteur des parois

Nature	Hauteur (m)
	h1= h2= h3= h4= h5= h6=

Ouvertures

Nature ponte/montant	hauteur	État en fonction du temps	
	$<0_1<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_2<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_3<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_4<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_5<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_6<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_7<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_8<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_9<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{10}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{11}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{12}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{13}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{14}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{15}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{16}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{17}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{18}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{19}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{20}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{21}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{22}<$	<Fer<	<Ouv<
	$<0_{23}<$	<Fer<	<Ouv<

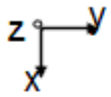
Sur le schéma:

•Représenter l'ensemble des pièces affectées par le feu et les fumées

•Noter toutes les distances (saufs celles de la pièce de départ de feu)+ représenter les épaisseurs des murs

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Mobilier-	ISI_FIC01
Date		*Pièce dans laquelle départ probable du feu*	Folio n°2



Sur ce schéma:

- Ne représenter que la pièce dans laquelle le feu est susceptible d'avoir commencé
- Représenter les meubles, indiquer les distances puis numéroter les meubles: A, B, C, ...
- PRENDRE DES PHOTOS/VIDEOS DE CHAQUE PAN ET DE CHAQUE MEUBLE

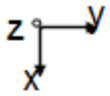
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Mobiliers-	ISI_FIC01
Date			Folio n°3

N°photo	type	Dim (m)			Nature du matériau Identifiée? oui / Non (indiquer le n° de prélèvement)		Effets thermiques/mécaniques observés
		x	y	z			
	A=						
	B=						
	C=						
	D=						
	E=						
	F=						
	G=						
	H=						
	I=						
	J=						
	K=						
	L=						
	M=						
	N=						
	O=						

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Relevé des points de calage-	ISI_FIC01
Date			Folio n°5



Hauteur des suies
$<S_1<$
$<S_2<$
$<S_3<$
$<S_4<$
$<S_5<$
$<S_6<$
$<S_7<$
$<S_8<$
$<S_9<$
$<S_{10}<$
$<S_{11}<$
$<S_{12}<$
$<S_{13}<$
$<S_{14}<$
$<S_{15}<$
$<S_{16}<$
$<S_{17}<$
$<S_{18}<$
$<S_{19}<$
$<S_{20}<$
$<S_{21}<$
$<S_{22}<$
$<S_{23}<$
$<S_{24}<$
$<S_{25}<$

Sur ce schéma:

- Représenter l'ensemble des pièces atteintes par le feu et les fumées
- Positionner les points de calages en leur attribuant une lettre: a, b, c,…(indiquer les distances en x et y, mettre celles en z sur la page suivante)
- Représenter la position des victimes
- Prendre en compte les déformations des vitres si ça parait intéressant
- PRENDRE AU MINIMUM UNE PHOTO PAR POINT DE CALAGE+FILM

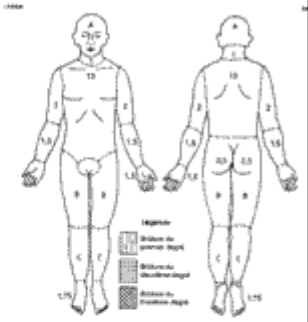
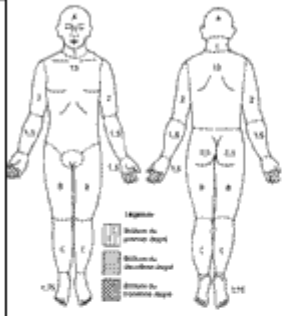
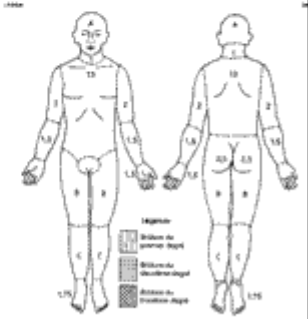
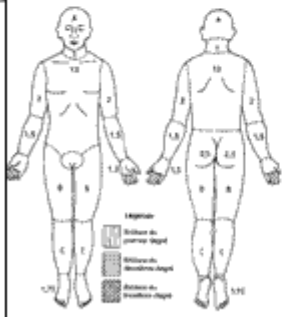
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Points de calage-	ISI_FIC01
Date			Folio n°6

N°photo	type	Hauteur du centre de l'objet	Dimension du point de calage(m)			Nature du matériau Identifiée? oui / Non (indiquer le n° de prélèvement)		Effets observés				
		z	x	y	z			Aucun	Dépôt suie	Déformation	Carbo. surface	Carbo. profonde
	A=											
	B=											
	C=											
	D=											
	E=											
	F=											
	G=											
	H=											
	I=											
	J=											
	K=											
	L=											
	M=											
	N=											

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Victimes-	ISI_FIC01
Date			Folio n°8

Victime 1	**Victime 2**
Age: Sexe: 	 Age: Sexe:
Victime 3	**Victime 4**
Age: Sexe: 	 Age: Sexe:

- Positionner les victimes sur le plan de la page 5
- Représenter les différents degrés de brûlure

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Installations techniques-	ISI_FIC01
Date			Folio n°9

Type d'installation	Description	Observations
Électricité		
Chauffage		
Ventilation		
Désenfumage		
gaz		
Alarme		

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Étude IDF N°		-Relevés photographiques-	ISI_FIC01
Date			Folio n°10

N°photo	intitulé	N°photo	intitulé

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 3. Identification d'un liquide inflammable ou de traces d'imbrulées d'un tel liquide dans les prélèvements de débris d'incendie par chromatographie en phase gazeuse (CG) et/ou par couplage de la chromatographie en phase gazeuse avec la spectrométrie de masse[34]

L'analyse est effectuée par chromatographie en phase gazeuse en utilisant la technique dite de l'espace de tête pour la recherche des composés les plus volatils, et (ou) celle de l'extraction par traitement avec un solvant pour les composés moyennement volatils et lourds.

Pour assurer leur bonne conservation, les débris d'incendie sont conditionnés dans des récipients propres et étanches (bocaux de verre ou conteneurs métalliques), non complètement remplis de façon à ménager un espace au-dessus des prélèvements.

La chromatographie en phase gazeuse

Cette méthode est basée sur le partage des constituants d'un mélange entre deux phases d'une colonne. L'une des phases (dite stationnaire) est un support de grande surface de contact imprégné ou non d'un produit actif. L'autre phase (dite mobile) est un gaz inerte (gaz vecteur) parcourant la colonne. Le partage dépend de l'affinité des constituants à séparer pour la phase stationnaire.

Si on introduit en tête de la colonne un mélange de constituants présentant des affinités différentes, ils en ressortiront, entraînés par le gaz vecteur, au bout de temps eux-mêmes différents, en fonction de ces affinités ; c'est-à-dire que par ce procédé, les constituants d'un mélange seront séparés.

Si on dispose à la sortie de la colonne un détecteur, généralement du type à "ionisation de flamme", la présence de chaque constituant se manifeste par un signal électrique proportionnel à sa concentration. Ce signal est amplifié et enregistré. Il se présente finalement sur l'enregistrement, appelé chromatogramme, sous la forme d'un pic d'allure gaussienne qui jouit de deux propriétés : sa place est caractéristique du constituant et sa surface et sa hauteur sont proportionnelles à la quantité de composé introduite en tête de colonne. S'agissant ici d'une identification qualitative, seule la place du pic est à considérer. Pour des conditions opératoires données, elle sera caractérisée par son temps de rétention, c'est-à-dire le temps que met le constituant pour parcourir la colonne, ce qui permet son identification par comparaison avec les temps de rétention de produits de référence.

Le couplage de la chromatographie en phase gazeuse avec la spectrométrie de masse

La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG-SM) est une méthode d'analyse dans laquelle la technique de séparation (CG) précède la technique d'identification (SM).
Les informations obtenues sont caractéristiques des constituants de l'échantillon : il s'agit, pour chacun d'eux, du temps de rétention et du spectre de masse.

Le principe de la spectrométrie de masse est le suivant : les molécules introduites à l'état de vapeur dans la source d'ionisation du spectromètre, sont bombardées par un faisceau d'électrons dont l'impact provoque l'ionisation et la fragmentation d'un certain nombre d'entre elles.

Les ions ainsi formés sont focalisés vers un filtre où ils sont triés en fonction du rapport de leur masse à leur charge électrique. Le signal mesuré au cours de chaque balayage d'une gamme de masse donnée est un courant ionique traduisant l'abondance de chacun des ions : il se caractérise par une série de pics correspondant aux différents fragments. On obtient alors le spectre de masse de chacun des constituants au fur et à mesure de leur sortie de la colonne du chromatographe.

La connaissance des mécanismes de fragmentation permet de proposer une structure moléculaire possible pour chacun des constituants. De plus, la comparaison de spectres inconnus avec ceux contenus

[34] Extrait d'une notice rédigée par le LCPP à insérer dans les rapports d'expertise incendie

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

dans des librairies informatisées (plusieurs milliers de spectres) conduit généralement à l'identification des constituants correspondants.

Le chromatogramme obtenu est la mesure du courant ionique total en fonction du temps de rétention caractéristique de chaque type de molécules : à chaque pic présent sur le chromatogramme correspond donc un constituant ayant un spectre de masse unique dans des conditions opératoires données.

Technique de l'espace de tête

Lorsqu'un prélèvement, souillé par un liquide plus ou moins volatil, est conditionné dans un récipient clos, l'atmosphère en équilibre au-dessus de cet échantillon (solide ou liquide), appelée espace de tête, renferme, notamment, les constituants volatils du produit.

Pour un échantillon donné, la concentration en vapeurs du produit volatil dans l'espace de tête est, en général, d'autant plus élevée que la température à laquelle il est porté est elle-même plus élevée ; mais à la température ambiante, cette concentration, pour les produits volatils tels que les liquides inflammables, est déjà décelable. Une réserve est cependant à formuler : il importe que l'échantillon n'ait pas été lui-même porté à une température trop élevée lors de l'incendie et que ne se soit pas écoulé un temps trop long entre la souillure de l'échantillon et l'analyse, afin que les constituants volatils à rechercher ne se soient pas complètement dissipés, ou que des précautions spéciales aient été prises pour éviter cette dissipation.
Avant l'analyse, le récipient est donc maintenu pendant un temps prédéterminé (généralement 30 à 60 minutes) dans une enceinte thermostatée (généralement 90 degrés Celsius).

Une partie de l'atmosphère du récipient est ensuite prélevée soit directement à l'aide d'une seringue à gaz, soit après piégeage sur un adsorbant (piégeage statique par diffusion ou piégeage dynamique par pompage, avec ou sans balayage par un gaz inerte) afin de réaliser une concentration, puis injectée dans le chromatographe.

Technique par extraction

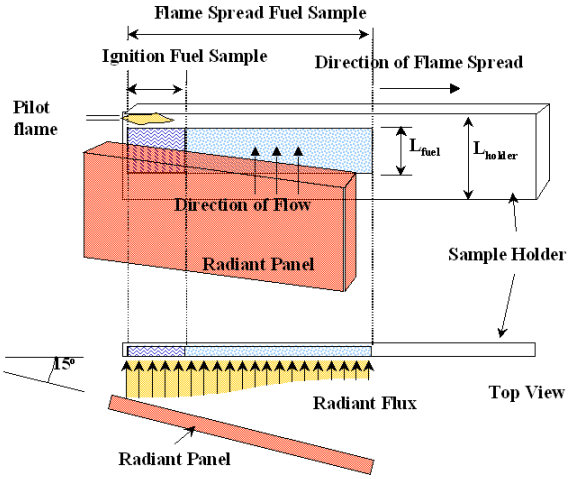
La recherche de produits moyennement volatils ou lourds (constituants lourds d'essence pour automobile, gazole ou fioul domestique...) est effectuée après traitement de l'échantillon à l'aide d'un solvant approprié. Cette préparation consiste soit en une dilution dans le solvant, soit en une extraction à l'aide du solvant. L'extrait obtenu, après filtration, est concentré sous courant gazeux (air ou gaz inerte), puis purifié sur gel de silice. Une fraction de cet extrait est ensuite injectée dans le chromatographe.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 4. Lateral Ignition and Flame Spread

Le Lateral Ignition and Flame Spread (LIFT) est un dispositif expérimental permettant de mesurer la propagation des flammes. L'essai est standardisé par la référence *Standard test method for determining material ignition and flame spread properties* [ASTM E 1321]. Un panneau radiant alimenté au gaz est utilisé pour mesurer l'inflammation d'une surface et la propagation latérale par rapport au sens de l'écoulement des flammes sur un matériau (voir le schéma 353). Le panneau radiant forme un angle de 15 % avec le matériau qui est donc soumis à une sollicitation thermique dont le flux thermique incident décroît en s'éloignant de la zone où l'allumage peut être piloté. Cet essai renseigne sur les caractéristiques d'inflammabilité des matériaux et de propagation des flammes à leur surface comme le flux critique d'inflammation, le temps d'inflammation, la température d'inflammation,

Ce dispositif est également utilisé pour mesurer l'inflammabilité de certains matériaux utilisés dans la marine. L'essai suit alors la référence *Standard Test Method for Flammability of Marine Surface Finishes* [ASTM E 1317].



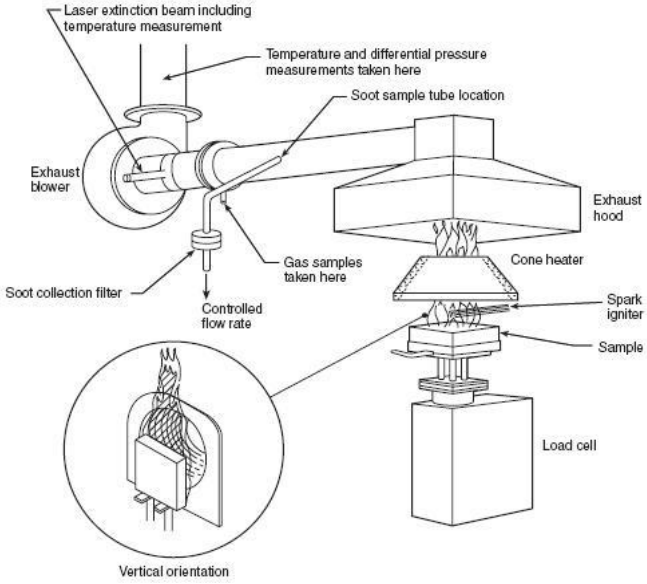
353. *Représentation schématique d'un dispositif LIFT*[35]

[35] Schéma tiré de http://www.me.berkeley.edu/mcl/fist/lift.html

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 5. Cône calorimètre

Le cône calorimètre est un dispositif expérimental permettant de caractériser le comportement d'un matériau soumis à un rayonnement thermique (voir le schéma 354). Un échantillon de 100 mm par 100 mm de côté pour une épaisseur de 6 à 50 mm est disposé dans un porte-éprouvette lui-même placé sur une balance pour mesurer la perte de masse au cours de l'essai. Le matériau est ensuite exposé en position horizontale ou verticale à un rayonnement thermique constant compris entre 0 et 110 $kW.m^{-2}$. En position horizontale, le cône calorimètre a été mis au point de façon à réduire au maximum la convection au niveau de l'échantillon. Les gaz issus de la combustion sont aspirés dans une hotte et les concentrations en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone y sont mesurées. Un laser hélium-néon de 0,5 mW mesure le coefficient d'extinction des fumées dans le conduit d'extraction.



354. *Schéma du cône calorimètre [BABRAUSKAS 2003A]*

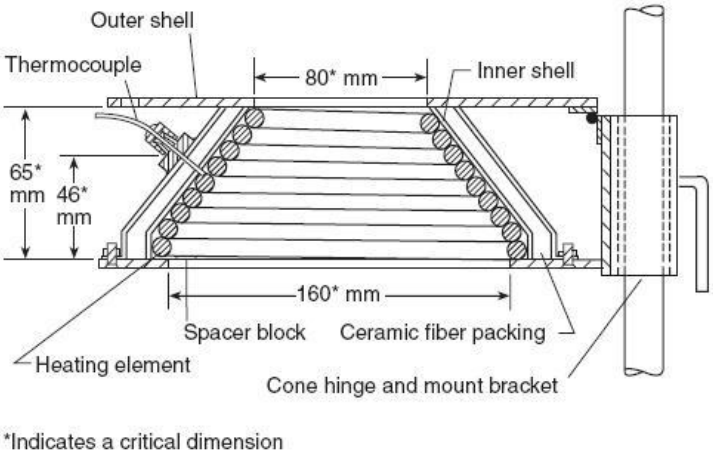
Au cours d'un incendie, les gaz peuvent atteindre des températures supérieures à 1 000 °C induisant des rayonnements vers les parois de l'ordre de 150 $kW.m^{-2}$. Selon la référence [BABRAUSKAS 2003A], tester des matériaux à des conditions si extrêmes n'est pas nécessaire. Cependant, si des conditions d'incendie postérieures à l'embrasement généralisé doivent être reproduites expérimentalement, des rayonnements de l'ordre de 75 $kW.m^{-2}$ doivent être générés et de préférence proches de 100 $kW.m^{-2}$.

Une résistance électrique chauffante a été choisie comme source de rayonnement pour le cône calorimètre car, dans les systèmes de chauffages disponibles, c'est le dispositif qui se rapproche du comportement d'un corps gris proche de celui des suies. C'est un aspect important à prendre en compte car la réponse d'un matériau comme le délai d'inflammation par exemple peut dépendre le la longueur d'onde du rayonnement.

La résistance chauffante est en forme de tronc de cône. Elle a un trou en son milieu pour éviter que le matériau soit soumis à un point chaud là où le facteur de forme géométrique de rayonnement est maximum. De plus, comme la même résistance doit être utilisée pour l'essai en position horizontale et verticale, le trou au centre de la résistance permet aux fumées de s'échapper verticalement sans que l'écoulement ne soit entravé.

La forme du cône calorimètre permet d'obtenir un rayonnement quasiment uniforme sur l'échantillon [BABRAUSKAS 1984A]. Pour une gamme de flux compris entre 25 et 100 $kW.m^{-2}$, le rapport entre le flux au centre de l'échantillon et le flux moyenné varie seulement de 1 à 1,06. L'échantillon est placé 25 mm sous la partie inférieure de la résistance chauffante.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



355. *Représentation schématique en coupe transversale de la résistance chauffante du cône calorimètre [BABRAUSKAS 2003A]*

L'opérateur peut choisir entre une auto-inflammation non pilotée du matériau et une auto-inflammation pilotée qu'il provoque en utilisant un générateur d'étincelle disposé à proximité de la surface du matériau dans une zone où la concentration en vapeurs combustibles provenant du matériau est comprise entre les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité.

Pour caractériser un matériau, deux propriétés sont reliées au débit calorifique : l'enthalpie effective de combustion $\Delta H_{c,eff}$ et l'enthalpie de vaporisation ΔH_v, toutes deux exprimées en kJ.kg^{-1}.
L'enthalpie de combustion est le rapport entre le débit calorifique $\dot{q}''$ en kW.m^{-2} et la vitesse de perte de masse $\dot{m}''$ en g.m^{-2}.s^{-1} comme exprimé par la relation (69).

$$\Delta H_{c,eff} = \frac{\dot{q}''}{\dot{m}''} \qquad (69).$$

La mesure du débit calorifique au cône calorimètre est basée sur la méthode de consommation d'oxygène. En 1917, Thornton a montré que, pour un grand nombre de liquides et de gaz organiques, une valeur plus ou moins constante de chaleur est dégagée par unité de masse d'oxygène consommée pour une combustion complète [THORNTON 1917]. Huggett a montré ensuite que cela est également vérifié pour la combustion de solides organiques et a obtenu une valeur moyenne pour cette constante de 13,1 kJ.kg^{-1} d'oxygène [HUGGETT 1980]. Mis à part pour quelques exceptions, cette valeur est précise à 5 % près. Cela implique donc que, pour connaître le débit calorifique dégagé, il suffit de mesurer la quantité d'oxygène consommée par la combustion d'un matériau.
Ainsi, si l'ensemble des produits de combustion est collecté dans une hotte et que le point de prélèvement des gaz pour l'analyse est situé suffisamment loin de la combustion pour considérer que le mélange est homogène, le débit calorifique est calculé à partir de la relation (70).

$$\dot{q} = E\left(\dot{m}_a Y_{O_2}^a - \dot{m}_e Y_{O_2}^e\right) \qquad (70).$$

Où *E* est le facteur de Thornton, $Y_{O_2}^a$ la fraction massique d'oxygène dans l'air utilisé pour la combustion et $Y_{O_2}^e$ la fraction massique d'oxygène dans les produits de combustion.

La mesure du débit calorifique peut être corrigée pour les cas où une quantité significative de carbone est transformée en CO plutôt qu'en CO_2. Le débit calorifique est alors calculé à partir de la relation (71).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

$$\dot{q} = \left[E\phi - \left(E_{CO} - E\right)\frac{1-\phi}{2}\frac{X_{CO}^{A^e}}{X_{O_2}^{A^e}} \right] . \frac{\dot{m}_e}{1+\phi(\alpha-1)} \frac{M_{O_2}}{M_a}\left(1 - X_{H_2O}^{a}\right) X_{O_2}^{A^a} \quad (71).$$

Avec Φ le facteur de déplétion en oxygène qui s'exprime selon l'équation (72).

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A^a}\left(1 - X_{CO_2}^{A^e} - X_{CO}^{A^e}\right) - X_{O_2}^{A^e}\left(1 - X_{CO_2}^{A^e}\right)}{\left(1 - X_{O_2}^{A^e} - X_{CO_2}^{A^a} - X_{CO}^{A^e}\right) X_{O_2}^{A^a}} \quad (72).$$

Où α est le facteur d'expansion volumétrique généralement considéré comme constant et égal à 1,105, M_{O2} la masse moléculaire d'oxygène (28 g.mol^{-1}), M_a la masse moléculaire de l'air utilisé pour la combustion (29 g.mol^{-1} pour de l'air sec), $X_{H_2O}^{a}$ la fraction de vapeur d'eau en mole dans l'air utilisé pour la combustion, $X_{CO_2}^{a}$ la fraction de dioxyde de carbone en mole dans l'air utilisé pour la combustion, $X_{O_2}^{A^a}$ la fraction d'oxygène mesurée en mole dans l'air utilisé pour la combustion, $X_{O_2}^{A^e}$ la fraction mesurée en mole d'oxygène dans les gaz de combustion, E_{CO} le débit calorifique par unité d'oxygène consommé pour la combustion de CO en CO_2 (environ égal à 17,6 kJ.g^{-1}) et enfin $X_{CO}^{A^e}$ la fraction de monoxyde de carbone mesurée en mole dans les gaz de combustion.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 6. Four tubulaire

Le four tubulaire est un dispositif expérimental permettant de chauffer jusqu'à 1 200 °C un échantillon de petite taille. Il est constitué d'une partie réfractaire en silice 60 chauffant un tube en quartz dans lequel est disposé l'échantillon. Les dimensions du four disponible au LCPP sont indiquées dans sur les photos 356.

Dans le domaine de la réaction au feu, le four tubulaire est utilisé en particulier dans le cadre du classement F afin de pyrolyser un échantillon de 1 g de matériau à caractériser. Une partie des gaz issus de la pyrolyse sont ensuite analysés afin de rechercher la quantité de CO, CO_2 présents. Les anions (chlorure, sulfate, bromure) sont analysés par chromatographie, les cyanures par colorimétrie et les fluorures par ionométrie.

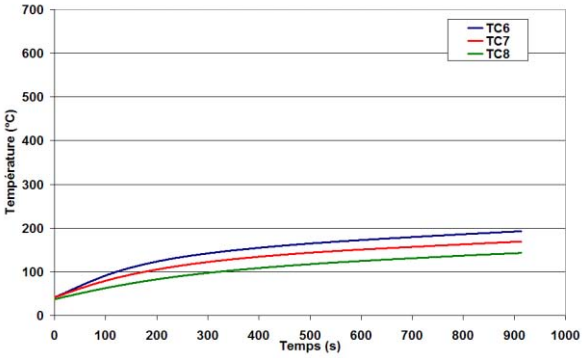
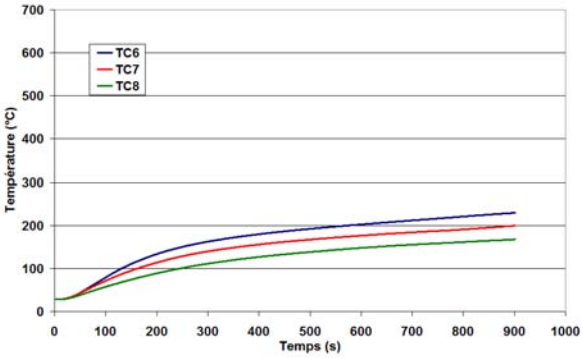
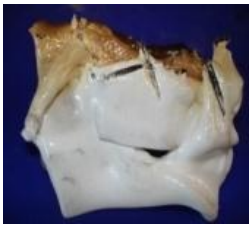
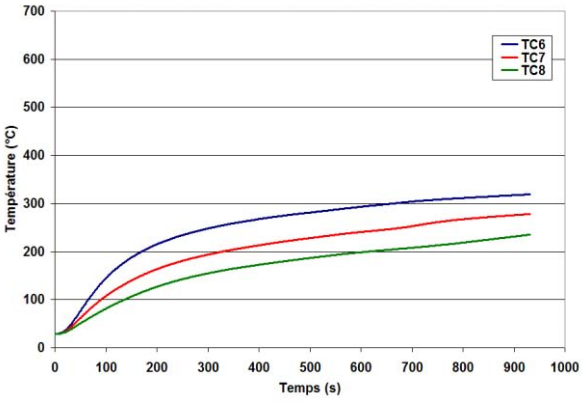
Le four tubulaire peut être détourné de son utilisation première. Il permet par exemple, dans une démarche d'expertise, d'étudier le comportement de câbles électriques alimentés lorsqu'ils sont soumis à de fortes températures. La difficulté pour utiliser ce dispositif afin de caractériser des points de comparaison basés sur la dégradation d'un interrupteur ou d'une prise de courant réside dans la taille de l'échantillon testée qui dépasse souvent le diamètre de 50 mm du tube en quartz.

356. *Four tubulaire chauffant un échantillon à 603°C*

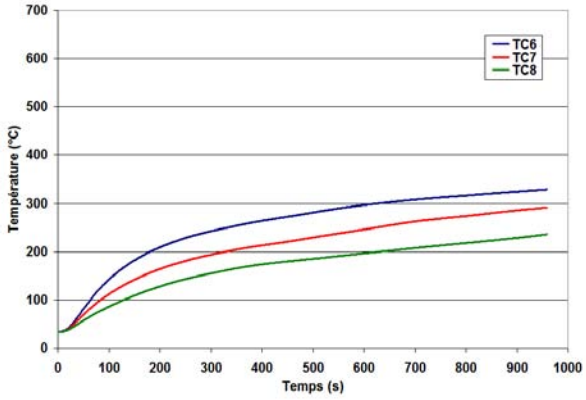
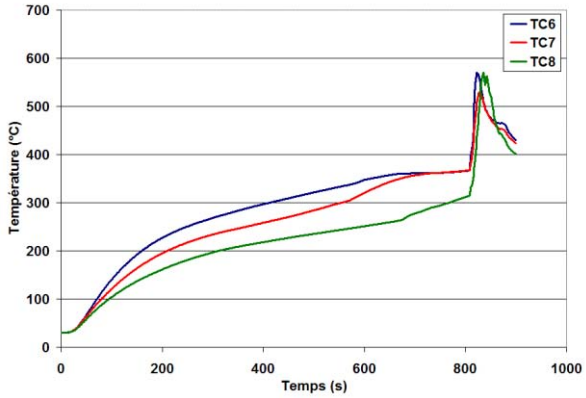
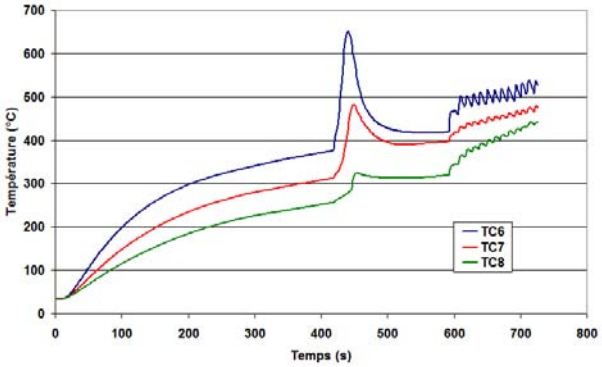
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 7. Résultats des essais en laboratoire

Les tableaux 357 et 358 synthétisent les résultats obtenus lors des essais en laboratoire sur les points de comparaison. Ils complètent les résultats présentés précédemment.

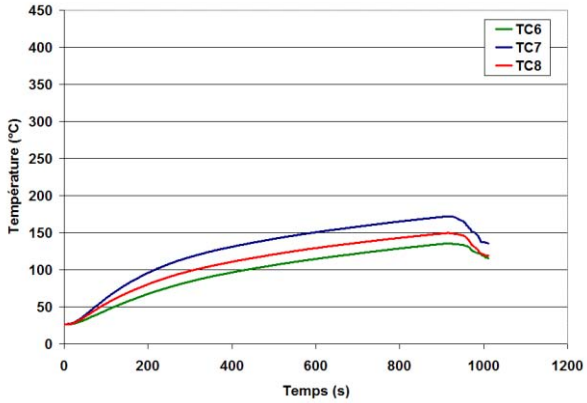
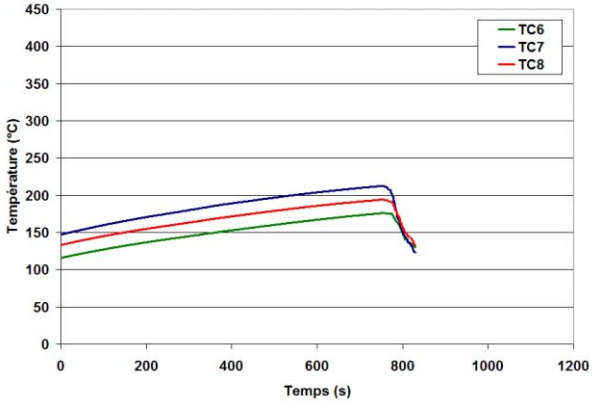
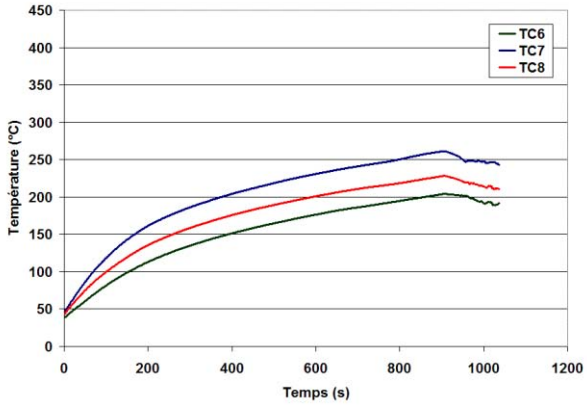
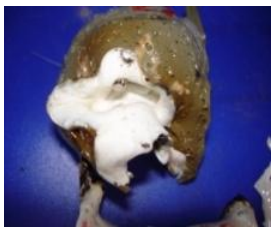
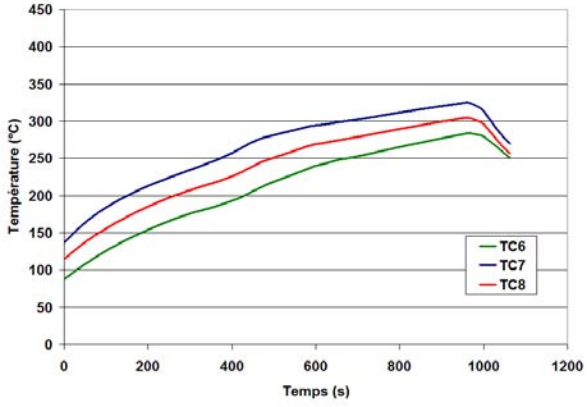
	Photo	Sollicitation thermique imposée	Synthèse de la sollicitation thermique maximale
Déformations légères			150<*T*<195 °C Δ*t*=560 s
			150<*T*<230 °C Δ*t*=650 s
Carbonisation superficielle			150<*T*<320 °C Δ*t*=750 s 250<*T*<320 °C Δ*t*=590 s

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

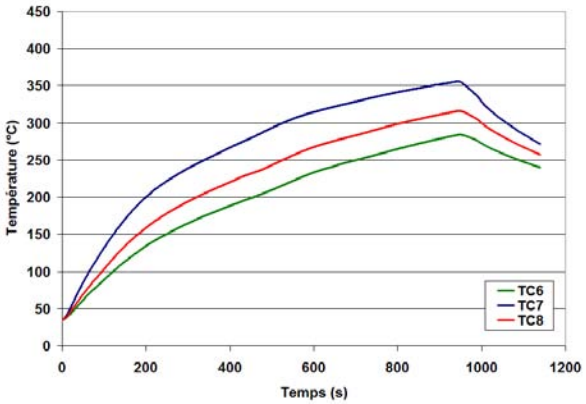
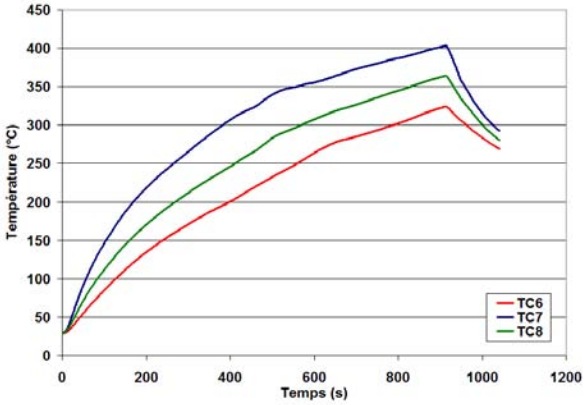
Carbonisation en profondeur			150<*T*<330 °C Δ*t*=850 s 250<*T*<330 °C Δ*t*=620 s
			150<*T*<570 °C Δ*t*=790 s 250<*T*<570 °C Δ*t*=650 s
			150<*T*<650 °C Δ*t*=650 s 250<*T*<650 °C Δ*t*=590 s

357. *Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les interrupteurs*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

	Photo	Sollicitation thermique imposée	Synthèse de la sollicitation thermique
Déformations légères			150<*T*<175 °C Δ*t*=400 s
			150<*T*<210 °C Δ*t*=800 s
Carbonisation superficielle			150<*T*<260 °C Δ*t*=780 s
			150<*T*<325 °C Δ*t*=1 000 s 250<*T*<325 °C Δ*t*=600 s

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

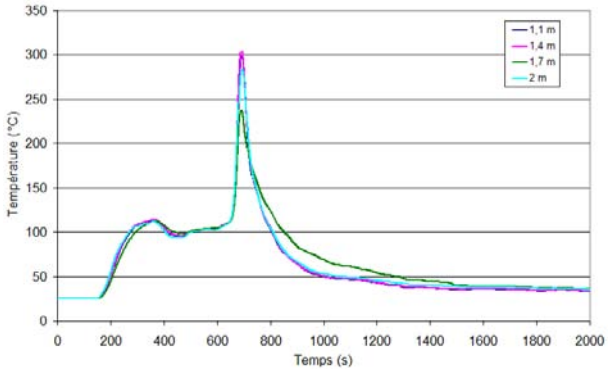
			150<*T*<355 °C Δ*t*=1 000 s 250<*T*<355 °C Δ*t*=900 s
Carbonisation profonde			150<*T*<400 °C Δ*t*=900 s 250<*T*<400 °C Δ*t*=700 s

358. *Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les prises de courant*

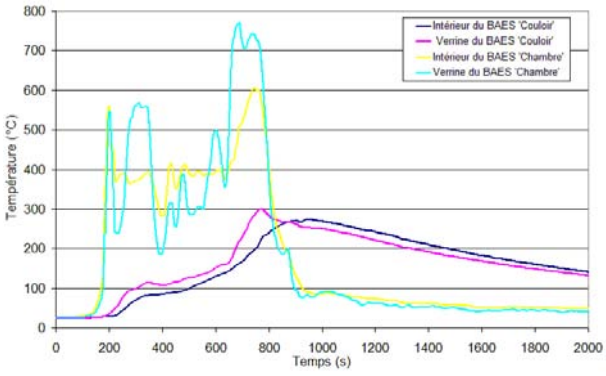
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 8. Essais de la rue Boinod

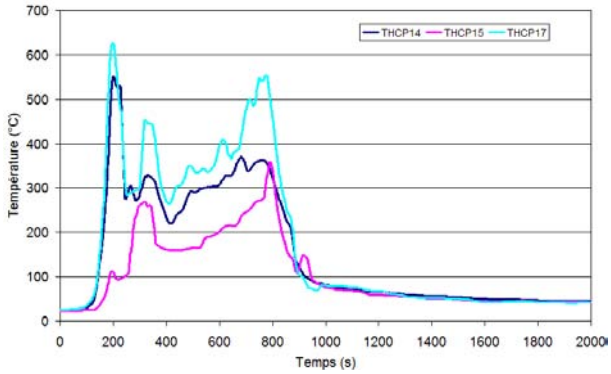
Les graphiques 359 à 364 présentent l'ensemble des températures mesurées lors des essais de la rue Boinod.



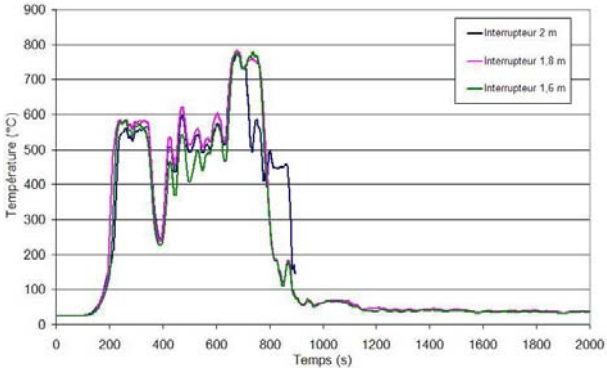
359. *Températures au cinquième et dernier étage de la cage d'escalier*



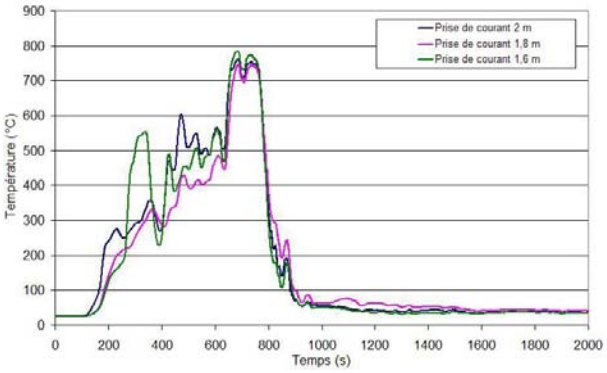
360. *Températures à l'intérieur et sur la verrine des blocs autonomes d'éclairage de sécurité disposés dans la chambre et le couloir*



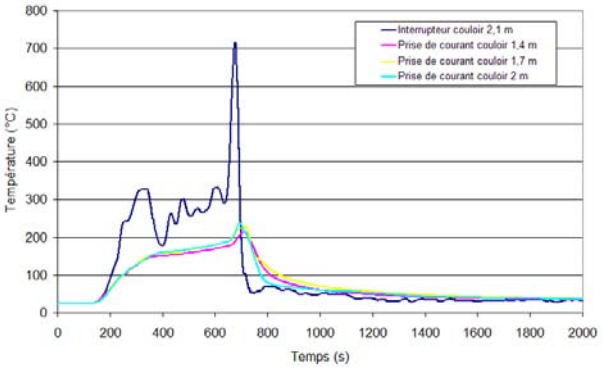
361. *Températures dans la chambre*



362. *Températures au niveau des interrupteurs disposés dans la chambre*



363. *Températures au niveau des prises de courant disposées dans la chambre*



364. *Températures au niveau des prises de courant et de l'interrupteur disposés dans le couloir*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Les photos 365 ont été prises après l'essai. Ce sont les interrupteurs soumis aux températures tracées dans le graphique 362.

365. *Photos après l'essai des interrupteurs disposés dans la chambre correspondant de gauche à droite aux matériels placés respectivement du plus haut au plus bas sur le mur*

366. *Photos après l'essai des prises de courant disposées dans la chambre correspondant de gauche à droite aux matériels placés respectivement du plus haut au plus bas sur le mur*

Un point de comparaison placé pour ces expériences dans la chambre n'a pas encore été présenté précédemment : c'est le matériel informatique. Deux thermocouples sont placés sur le disque dur à l'intérieur de la tour. L'écran est situé juste en dessous des canes de prélèvement d'air sur lesquelles a été fixé un troisième thermocouple. Trois températures sont donc mesurées lors de l'essai pour caractériser ce point de comparaison.

367. *Ensemble informatique placé dans la chambre avant et après l'expérience*

Les parties métalliques de la tour et du moniteur sont intactes après l'expérience. Toutes les matières plastiques en façade de la tour ont totalement disparu suite à leur fusion et leur combustion. Pendant 30 secondes environ, les deux thermocouples placés à l'intérieur de la tour ont mesuré des températures dépassant les 500°C, valeur supérieure à la température d'auto-inflammation de la

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

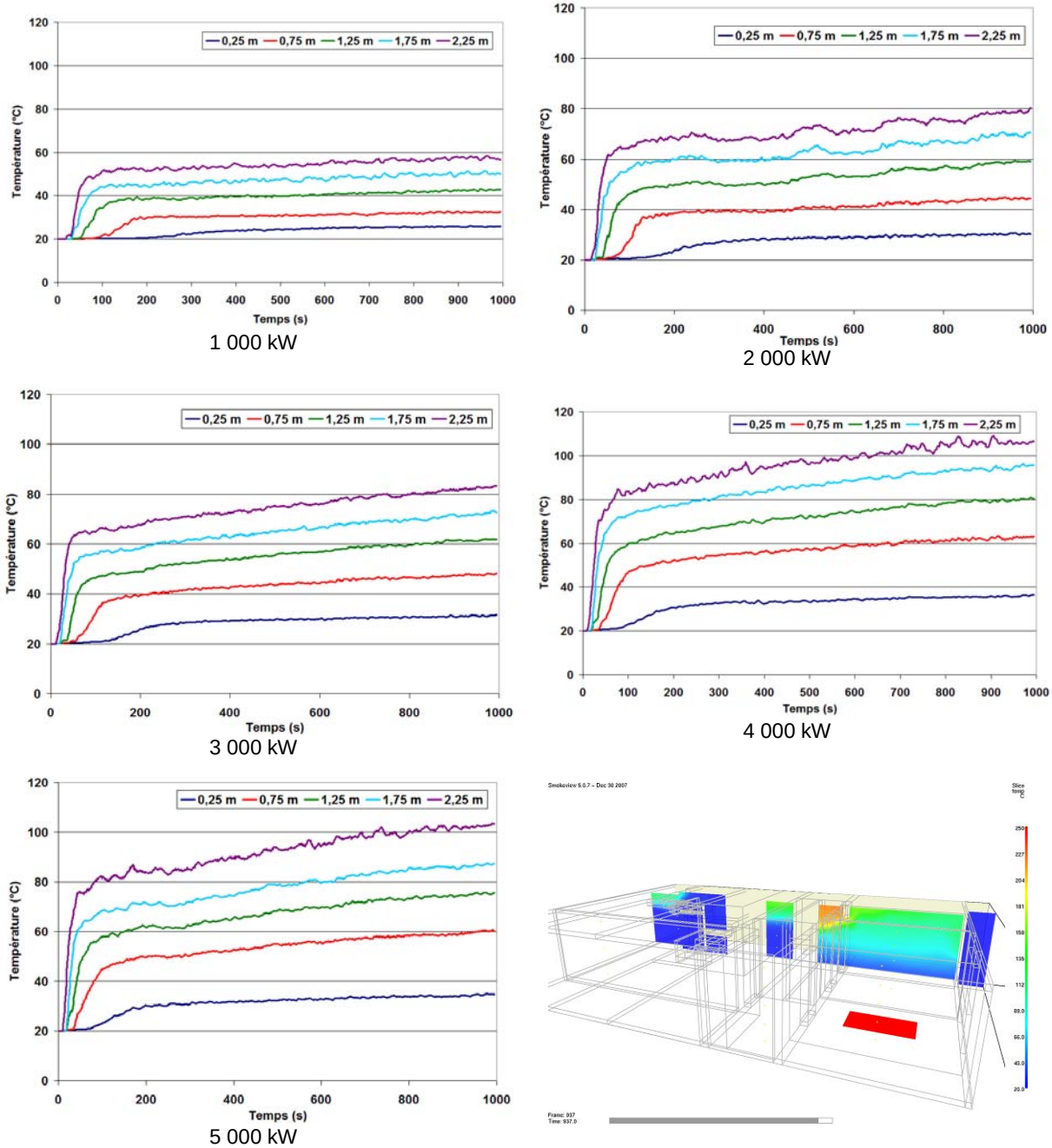
majorité des matières plastiques. Il en est de même pour la carcasse du moniteur, elle aussi en matière plastique. Le point de mesure situé juste au-dessus indique qu'elle a été exposée à des températures supérieures à 500°C pendant environ 40 secondes.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 9. Essais du Puy en Velay

Simulation en amont des essais : résultats des simulations pré-essais

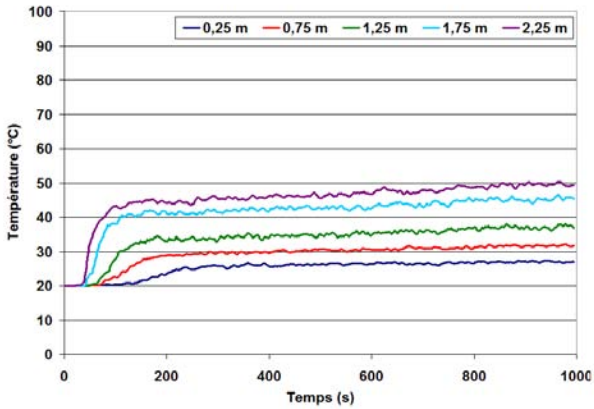
Lors de la campagne expérimentale du Puy en Velay, des simulations en amont des essais ont été réalisées afin de déterminer le ou les meilleurs emplacements où disposer les éléments à exposer pour caractériser les points de comparaison. Le protocole expérimental n'étant pas encore définitif au moment de la réalisation des simulations cinq puissances de foyer ont été choisies variant de 1 à 5MW. La porte de la chambre, la porte de palier de l'appartement, les portes des chambres et la fenêtre de la chambre sont ouvertes sur la totalité de la simulation.



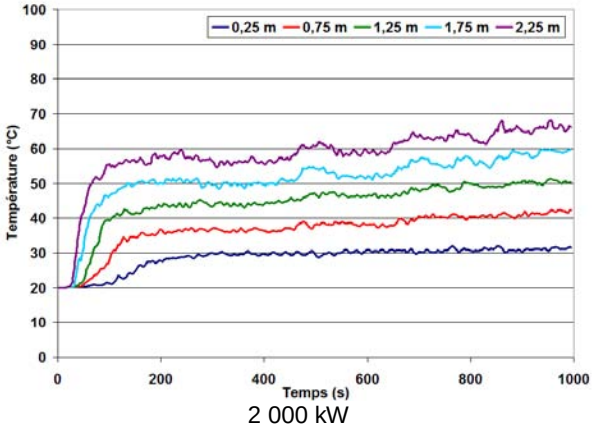
368. *Températures dans la chambre opposée à la chambre foyer*

Dans cette chambre opposée à celle contenant le foyer, les fumées sont stratifiées même si elles sont relativement froides. La température maximale de l'ordre de 110°C atteinte à 2,25 m de hauteur n'est pas suffisante pour entraîner de fortes dégradations sur tous les éléments d'usage courant. Placer des éléments verticalement dans cette pièce ne permettrait pas d'observer des niveaux de déformations graduels sur les éléments.

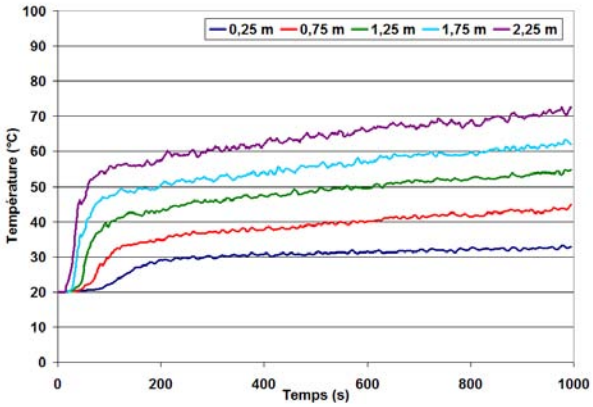
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



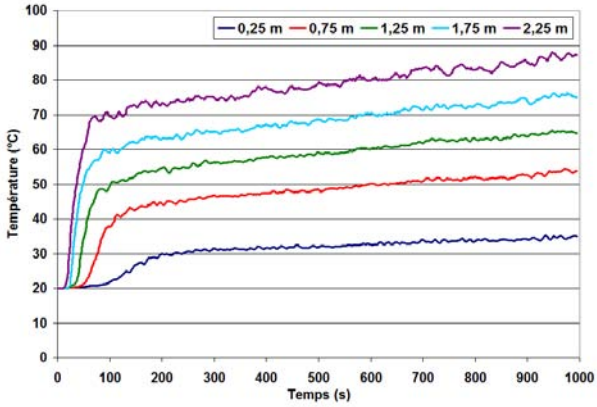
1 000 kW



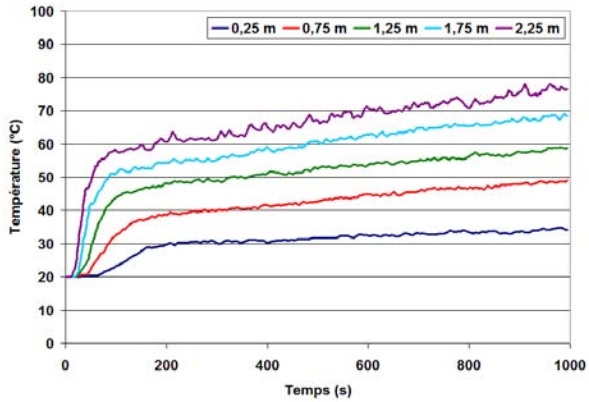
2 000 kW



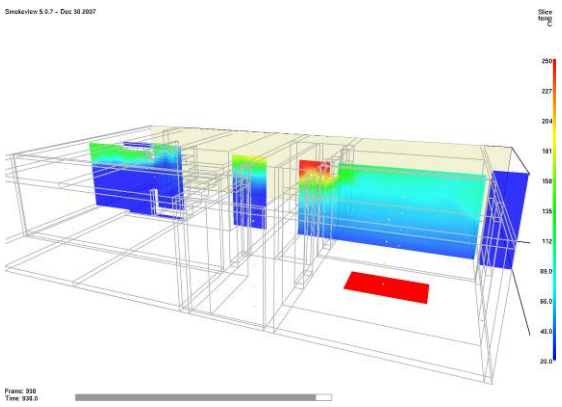
3 000 kW



4 000 kW



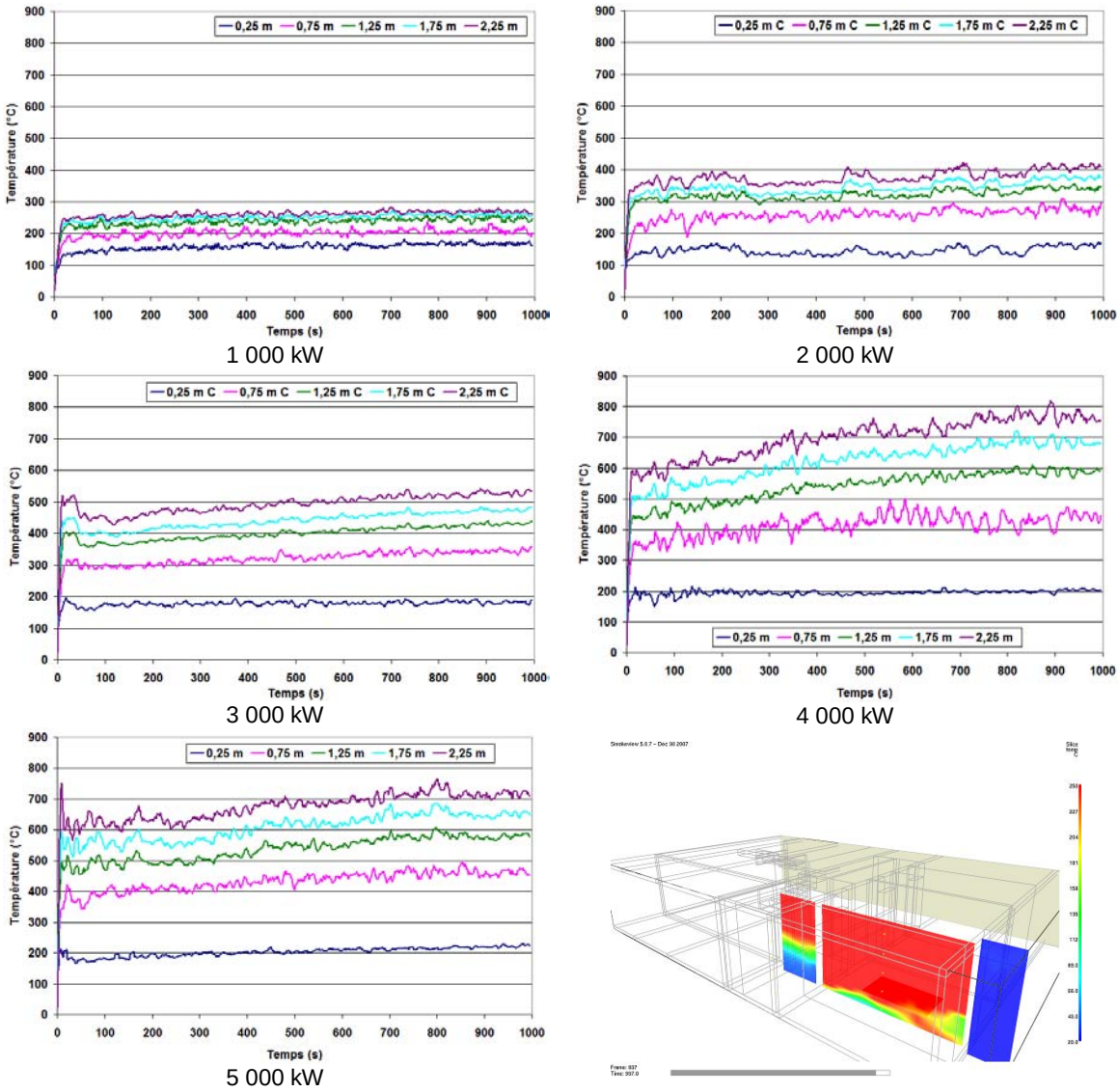
5 000 kW



369. *Températures dans la chambre adjacente à la chambre contenant le foyer*

Dans cette chambre adjacente à la chambre contenant le foyer, les fumées sont légèrement déstratifiées pour les puissances inférieures à 2 000 kW. La température maximale de l'ordre de 90°C atteinte à 2,25 m de hauteur n'est pas suffisante pour entraîner des dégradations sur tous les éléments d'usage courant. Placer des éléments verticalement dans cette pièce ne permettrait pas d'observer des niveaux de déformations graduels sur les éléments.

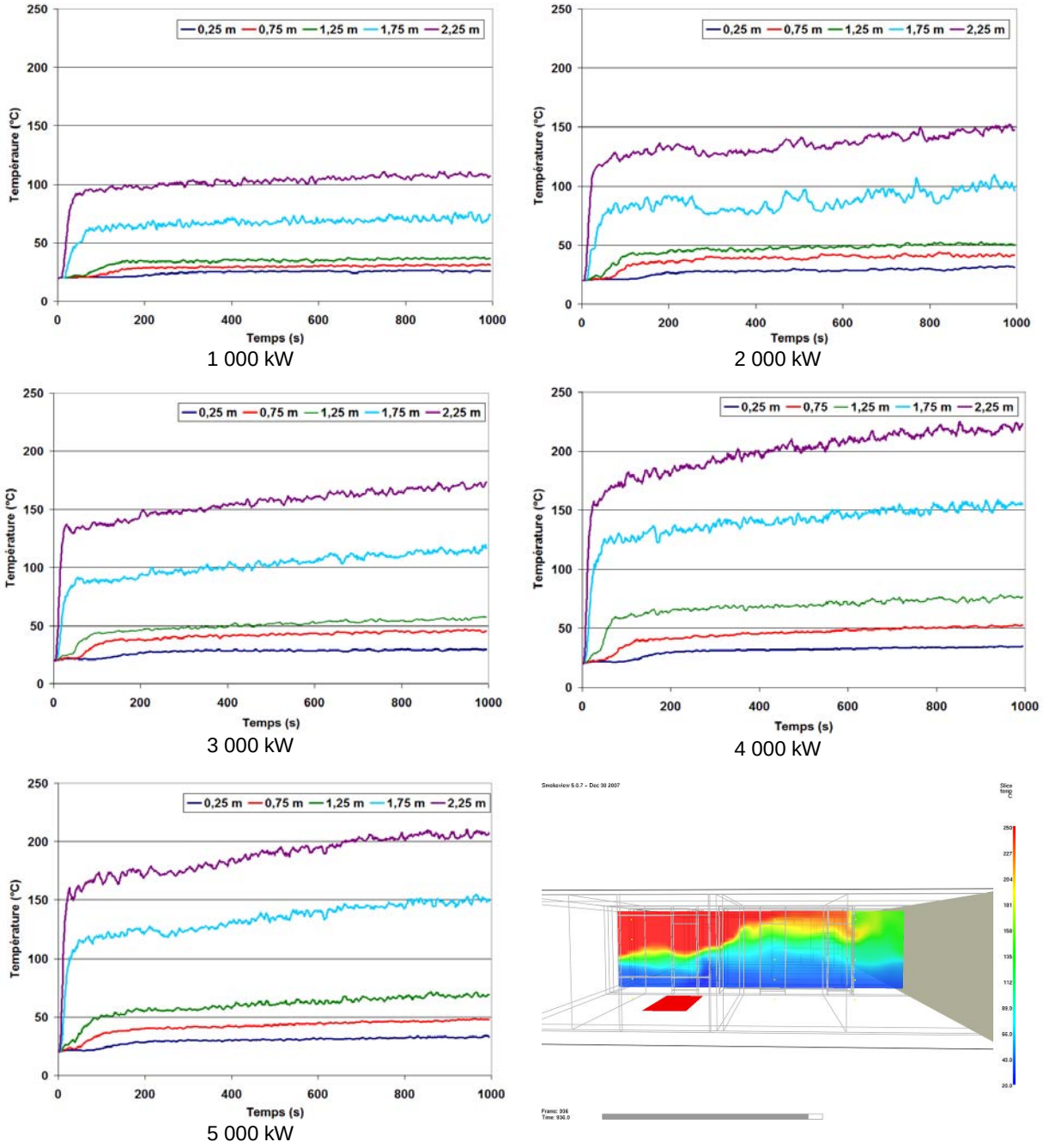
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



370. *Températures dans la chambre foyer*

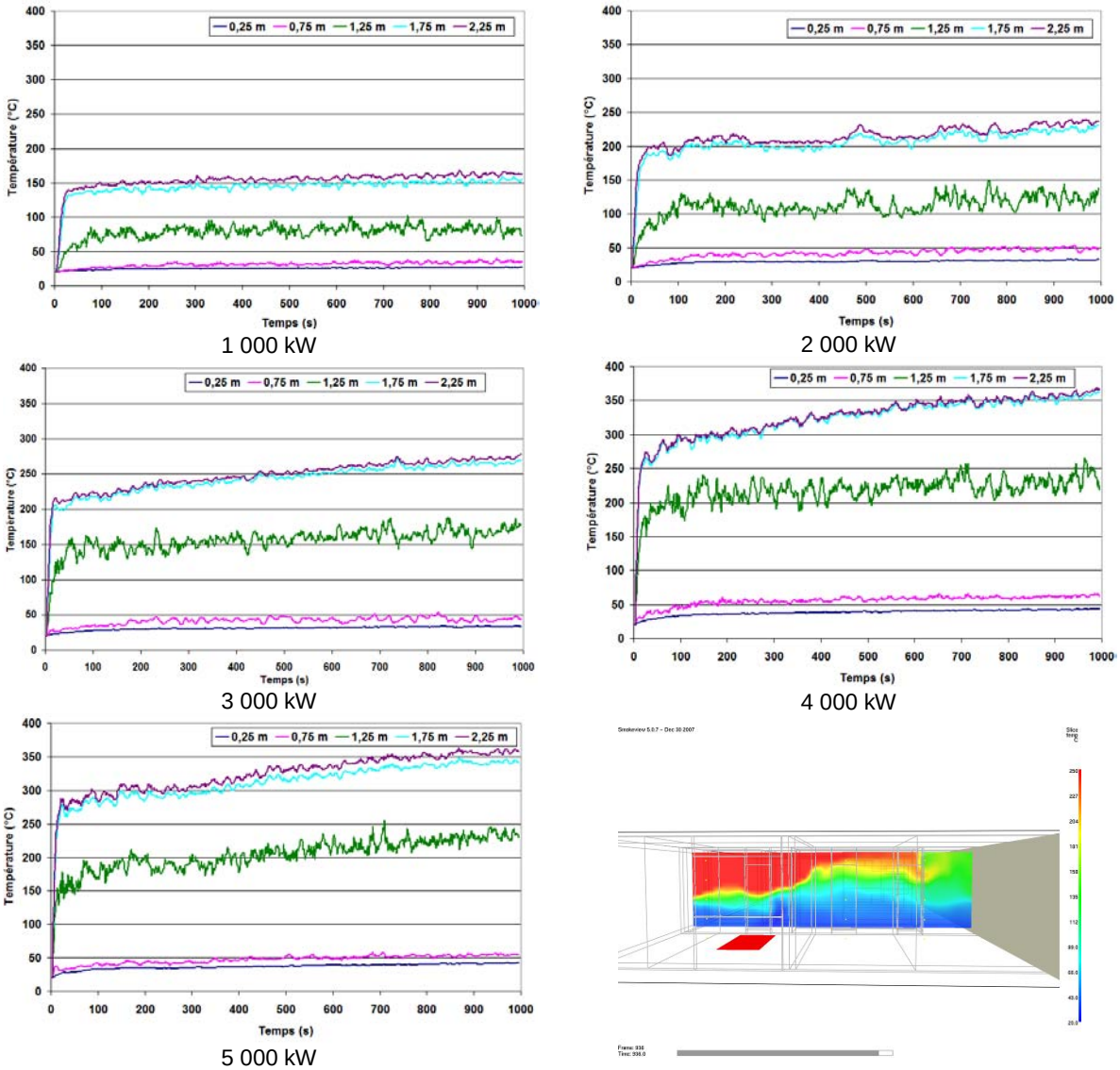
Dans la pièce dans laquelle se situe le foyer, les températures sont beaucoup trop élevées, quelle que soit la puissance calorifique considérée, pour observer un gradient de dégradation : à seulement 75 cm du sol, elles sont supérieures à 250°C pour tous les cas. Il a été dit précédemment vouloir placer les éléments d'usage courant dans une zone où les températures sont comprises entre 100°C et 250°C ; aucune ne correspond à cette gamme dans cette pièce. De plus placer les éléments dans cette pièce les exposerait au contact direct des flammes ainsi qu'à leur rayonnement ; cela n'est pas souhaitable dans la mesure où il est souhaité que les dégradations soient causées majoritairement par des effets convectifs

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



371. *Températures dans le couloir de l'appartement (1)*

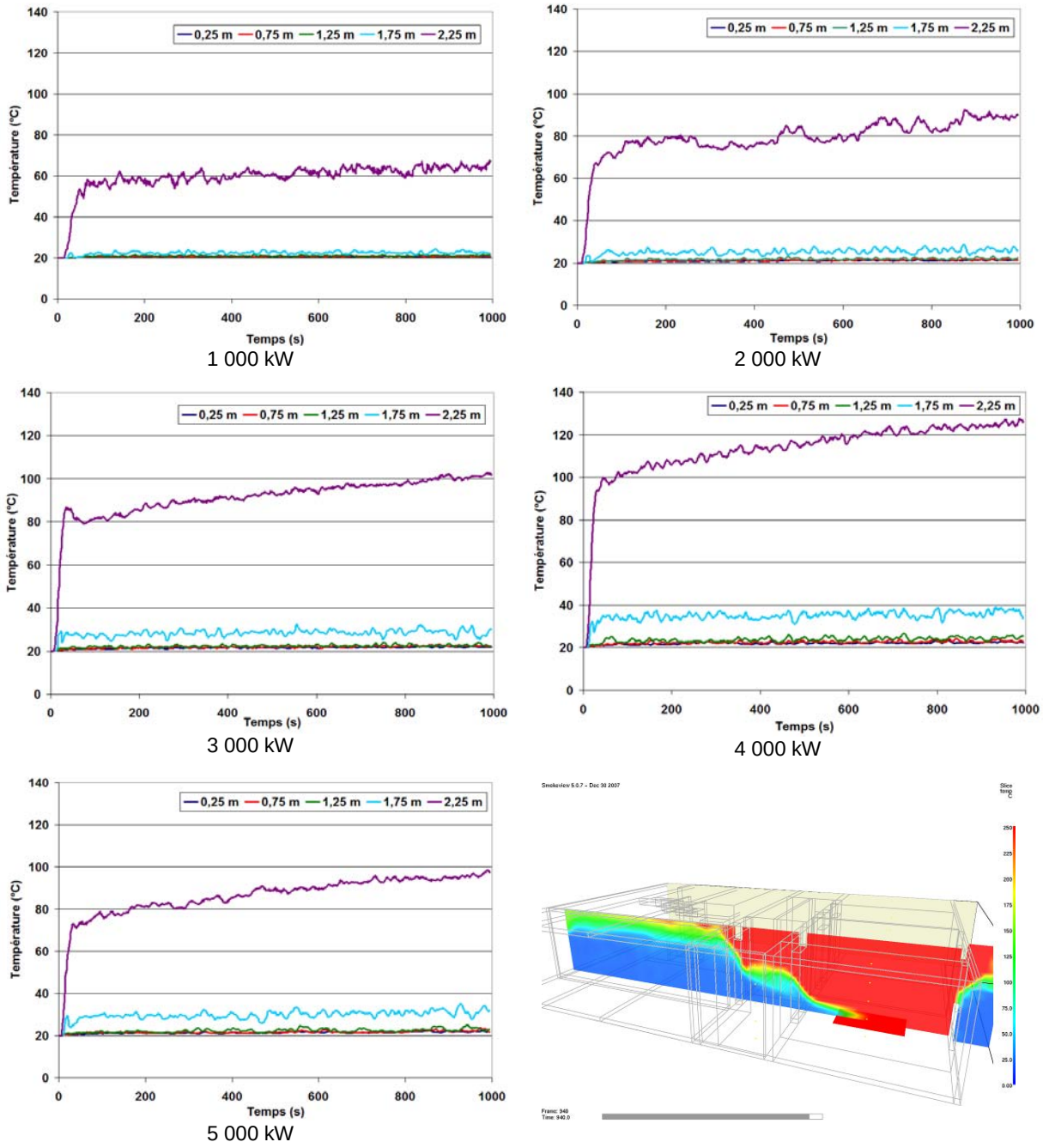
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



372. *Températures dans le couloir de l'appartement (2)*

Par rapport aux emplacements qui ont été étudiés précédemment, le couloir de l'appartement semble être le lieu le plus approprié pour observer des niveaux de déformations thermiques graduels sur les éléments d'usage courant. Placer les éléments dans le couloir sur le mur faisant face aux trois chambres semble la meilleure solution envisageable. Les éléments d'usage courant seront placés aux quatre hauteurs suivantes : 75 cm, 125 cm, 175 cm et 225 cm ; ainsi des niveaux graduels de déformation devraient être observables sur ces douze points de mesure.

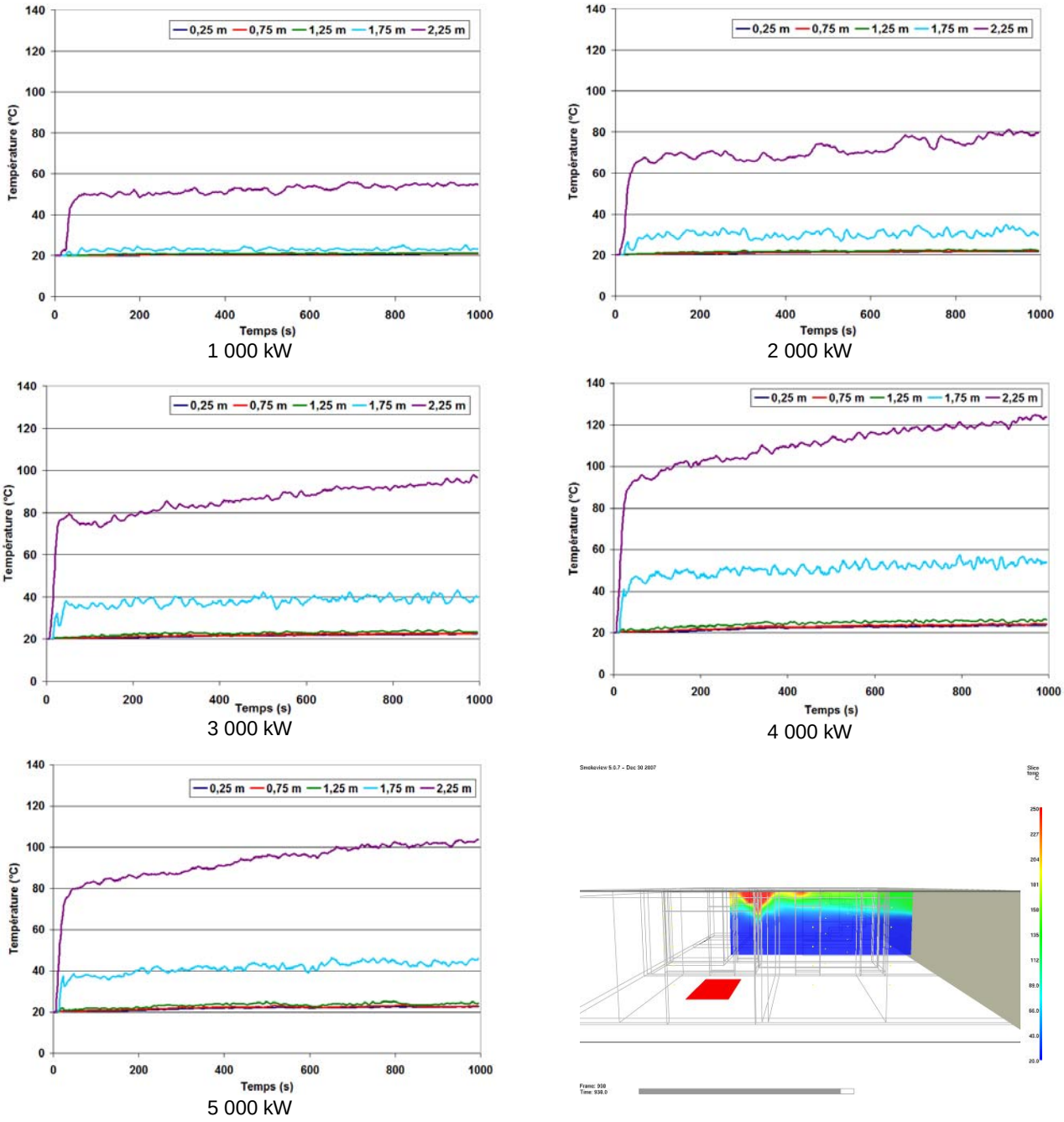
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



373. *Températures dans le couloir de la cage d'escalier (1)*

Au point de mesure (1) situé dans le couloir de la cage d'escalier, les températures maximales atteintes sous le plafond dans les simulations sont de l'ordre de 120°C. Comme pour les points de mesure situés dans les deux chambres ne contenant pas le foyer, cette valeur maximale n'est pas suffisante pour observer des niveaux graduels de déformations thermiques. Des éléments d'usage courant auraient pu être placés immédiatement après la porte d'entrée de l'appartement mais d'une part, cette zone est assez turbulente et cela n'est pas le plus adapté pour la stabilité des mesures thermiques et d'autre part, la protection par brouillard d'eau pourrait avoir une influence sur la déformation de l'élément (refroidissement rapide, protection thermique, …).

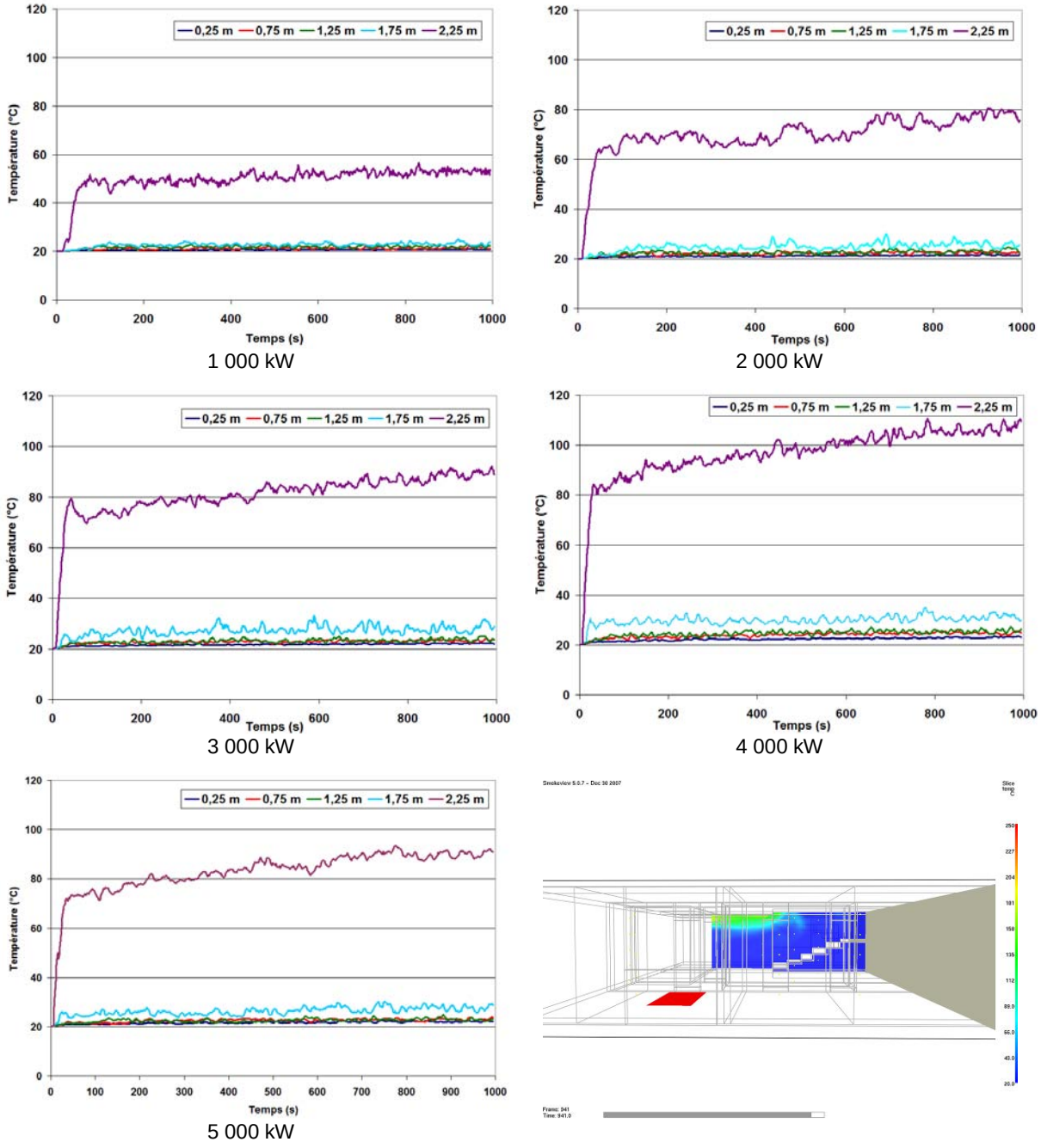
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



374. *Températures dans le couloir de la cage d'escalier (2)*

Au point de mesure (2) situé dans le couloir de la cage d'escalier, les températures maximales atteintes sous le plafond dans les simulations sont de l'ordre de 120°C. Comme pour les points de mesure situés dans les chambres 1 et 2, cette valeur maximale n'est pas suffisante pour observer des gradients de déformations thermiques.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



375. *Températures dans le couloir de la cage d'escalier, au pied de l'escalier*

D'une part, les températures à cet emplacement ne sont pas suffisamment élevées pour obtenir des déformations exploitables, mais de surcroît, il n'est pas pratique d'y fixer des éléments d'usage courant.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Simulation de l'essai B dans les conditions expérimentales

Parmi l'ensemble des essais réalisés, l'essai appelé B est considéré comme la référence pour ces travaux. Lors de la mise en place des expériences, le protocole expérimental a été modifié afin de prendre en compte certaines contraintes organisationnelles. Par rapport aux simulations présentées précédemment, les conditions opératoires ont donc changées :

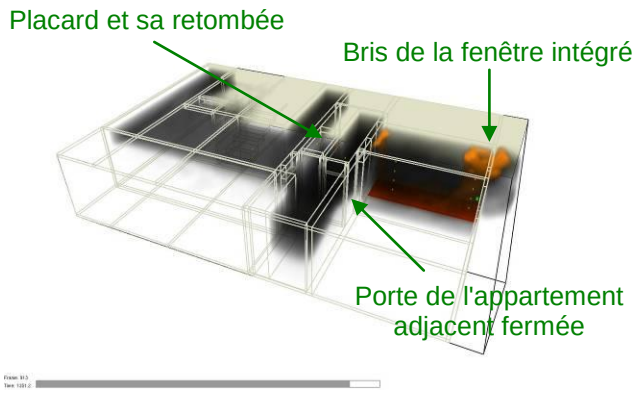
- les portes des chambres ne contenant pas le foyer sont fermées lors des essais,
- la fenêtre de la chambre foyer est fermée au débit de l'essai
- la charge calorifique a été clairement définie.

Deux stratégies concernant la gestion du bris de la fenêtre sont retenues pour les simulations de l'essai B. Dans un premier temps, la fenêtre va être enlevée lorsqu'une température critique est atteinte puis, dans un second temps, la fenêtre est enlevée à un temps identique à celui du bris des vitres lors de l'expérience.

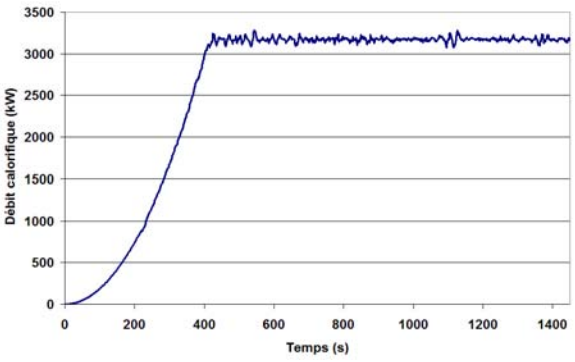
Bris simulé des fenêtres à une température donnée

Comme cela vient d'être évoqué, les conditions initiales de l'expérimentation ont changé. Les nouvelles caractéristiques de la simulation sont les suivantes :

- Le débit calorifique imposé est de 3 200 kW. Celui-ci a été évalué en fonction du combustible disposé dans la chambre.
- Le débit surfacique imposé est de 700 kW.m^{-2} sur une surface de 4,6 m²
- Le débit surfacique imposé suit une croissance en αt^2
- Les fenêtres se brisent lorsque la température ambiante dans son très proche voisinage atteint 400°C. Ceci n'est pas la méthode la plus réaliste pour simuler le bris d'un vitrage car l'inertie du matériau n'est pas prise en compte dans sa montée en température. De plus, il a été constaté que, pour ce type de fenêtres, le bris thermique du double vitrage se produit à une température similaire à celle de la ruine de l'huisserie PVC. Le phénomène n'est donc pas simple à simuler. Cependant, comme les températures maximales à l'étage sont obtenues en configuration "fenêtre de la pièce du foyer ouverte", configuration menant à l'embrasement généralisé de la chambre, et que ces simulations ne s'intéressent justement uniquement aux températures maximales atteintes, ce choix de température de bris de vitrage parait judicieux.



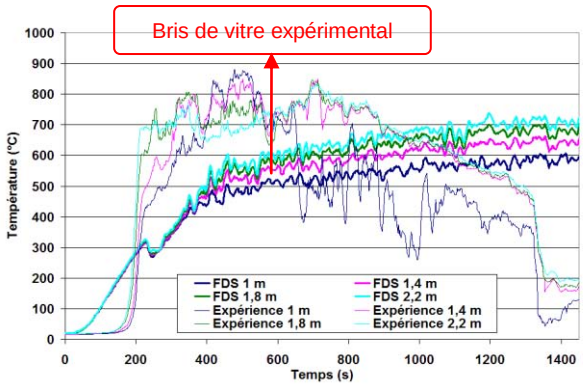
376. *Vue de la simulation de l'essai B après bris des vitrages*



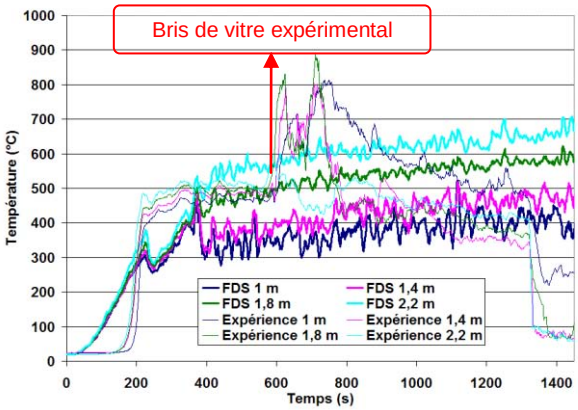
377. *Débit calorifique de la simulation de l'essai B*

Comme le montre l'image 376, les portes donnant vers les chambres adjacentes à la chambre foyer ont été maintenues fermées et le placard dans lequel sont disposés les éléments d'usage courant ainsi que sa retombée, ont été pris en compte.

Le débit calorifique imposé se retrouve bien en sortie du calcul (cf. graphique 377) : la majorité de la combustion a lieu dans la chambre foyer, les flammes sortent par intermittence par la fenêtre.



378. *Températures par simulation et expérience à l'entrée de la chambre*



379. *Températures par simulation et expérience dans le fond de la chambre*

Il est intéressant de remarquer, pour commencer, que la courbe de montée en température dans FDS sur les 200 premières secondes, qui est directement liée au débit calorifique imposé en entrée, est plus rapide par simulation que lors de l'expérience, même si la pente des courbes expérimentales est nettement supérieure une fois que les températures commencent à augmenter vers 180 s. Ceci pourrait en partie être expliqué expérimentalement par l'inertie des thermocouples mais également dans FDS par un coefficient α trop faible pour la définition de la croissance du foyer.

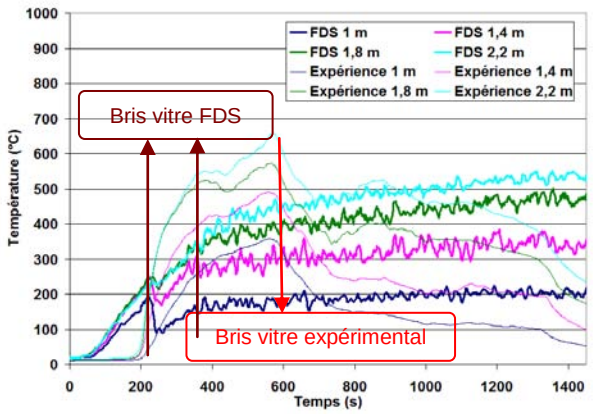
Dans la simulation, comme les deux bris de vitrage arrivent rapidement, après respectivement 230 et 380 s, il est difficile de comparer la simulation et l'expérience en conditions fenêtres fermées.

Les températures mesurées dans le fond de la chambre ont été perturbées par la chute des fenêtres sur l'arbre à thermocouple. Les températures après la chute du vitrage ne sont donc données qu'à titre indicatif.

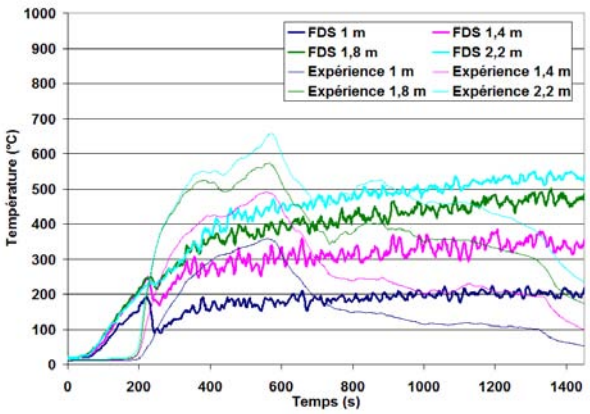
Les températures maximales données par FDS à l'entrée de la chambre, sont sous-estimées d'une centaine de degrés environ.

Expérimentalement, après le bris de la fenêtre, les thermocouples disposés à 1,4, 1,8 et 2,2 m mesurent des températures identiques aux erreurs expérimentales près. Les températures dans FDS sont moins homogènes et présentent une différence de 30°C entre chaque courbe. Elles sont parfaitement hiérarchisées verticalement, le point placé le plus haut atteignant la température maximale. Toujours après le bris de la fenêtre, le thermocouple placé à 1 m lors de l'expérience mesure des températures beaucoup plus fluctuantes que les 3 autres. Ces températures à 1 m sont inférieures de 200°C en moyenne. Une couche de fumée à température homogène occupe l'espace entre le plafond et 1,4 m. À 1 m, le point de mesure se situe près de l'interface entre les fumées chaudes sortant de la pièce et l'air frais entrant. C'est pourquoi les températures mesurées expérimentalement à cette hauteur fluctuent autant et qu'une différence de 200°C environ existe avec les températures mesurées aux autres hauteurs. Pour FDS, les températures maximales près du sol sont de l'ordre de 300°C en fin de simulation.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



380. *Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'appartement*



381. *Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'escalier*

Dans le couloir de l'appartement (cf. graphique 380), les températures maximales expérimentales à 1,8 et 2,2 m sont supérieures de 100°C environ. À 1 et 1,4 m, les températures maximales calculées sont sous-évaluées respectivement de 130 °C et 100 °C.
Cependant, les températures expérimentales maximales sont obtenues avant que la fenêtre ne cède et diminuent ensuite ce qui n'est pas le cas numériquement.

Dans le couloir de l'escalier, les températures maximales simulées à 2,2 m sont inférieures de 60% environ par rapport aux températures mesurées expérimentalement. Comme pour le couloir de l'appartement, les températures maximales expérimentales sont obtenues avant que la fenêtre de la chambre foyer ne cède, ce qui n'est pas le cas numériquement.

Une fois les fenêtres de la chambre foyer brisées, les températures maximales sont du même ordre expérimentalement et numériquement. À 1,4 m et 1 m, les températures simulées surévaluent de 100°C environ celles mesurées. Avant le bris de vitre, les températures maximales mesurées à l'emplacement des points de calages sont supérieures de 300°C à celles mesurées après le bris. Les fumées qui ne pouvaient s'évacuer que vers le couloir avant le bris de fenêtre, s'échappent ensuite vers l'extérieur, ce qui explique cette diminution des températures mesurées. Comme le bris de vitre apparaît très tôt dans la simulation en comparaison de l'expérience, il n'est pas possible d'observer le même phénomène sur la simulation.

Il est important de noter qu'expérimentalement, avant le bris des fenêtres, les températures mesurées à l'emplacement des points de calage sont très proches à 1 m et 2,2 m et inférieures de 100 °C à celles mesurées à 1,4 et 1,8 m. Cela pourrait s'expliquer par un effet de cantonnement en partie haute du placard dans lequel sont placés les points de calage, effet qui n'a pu être reproduit par les simulations présentées.

En conclusion de ces calculs :

- Dans la chambre et le couloir, les températures maximales simulées à 1,8 et 2,2 m sont inférieures de 100°C environ par rapport celles obtenues par expérimentation.
- Dans le couloir de la circulation, les températures maximales mesurées expérimentalement sont supérieures de 60%.
- Il est difficile de comparer simulation et expérimentation car les bris de fenêtre ne se produisent pas au même moment du développement de l'incendie. Cependant, certains phénomènes physiques tels que le cantonnement dans le placard ou la dynamique de l'écoulement au niveau de la porte de la chambre ne semblent pas être correctement reproduits.
- La température de bris de vitre a été choisie relativement faible pour du double vitrage sur armature PVC en se basant sur le postulat que les températures maximales étaient atteintes fenêtre ouverte. Or, cela n'a jamais été observé expérimentalement sur les cinq emplacements de mesure. Les températures avant le bris de vitre ont toujours été supérieures à celles après le bris (excepté pour les températures dans le fond de la chambre, mais cela ne

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

peut être pris en compte suite au mouvement des thermocouples provoqué par la chute de la fenêtre sur l'arbre).
- Jusqu'à la fin des simulations à 1 480 s, les températures ne cessent d'augmenter. Ceci n'est pas en soi un problème puisque seules les températures maximales atteintes sont utiles, mais il aurait été intéressant d'étudier à une phase de décroissance.
- Pour vérifier que FDS reproduit bien la dynamique de l'écoulement, il serait intéressant de simuler un bris de vitre non plus thermique comme cela vient d'être fait, mais à un temps identique à l'expérimentation.

Les différences dans la dynamique de l'écoulement peuvent provenir de la dégradation de l'appartement après les premiers essais qui n'a pas été prise en compte dans les simulations. En effet, la cloison entre les deux premières chambres a été partiellement détruite en partie haute par le premier incendie et une partie des fumées a donc été évacuée de la chambre foyer vers la chambre adjacente et de la chambre adjacente par la fenêtre laissée ouverte.
De plus lors de certains essais, le vent parfois assez soutenu a du changer considérablement les distributions de champ de pression dans l'immeuble et son environnement. Le vent n'a ni été mesuré, ni pris en compte dans la simulation.

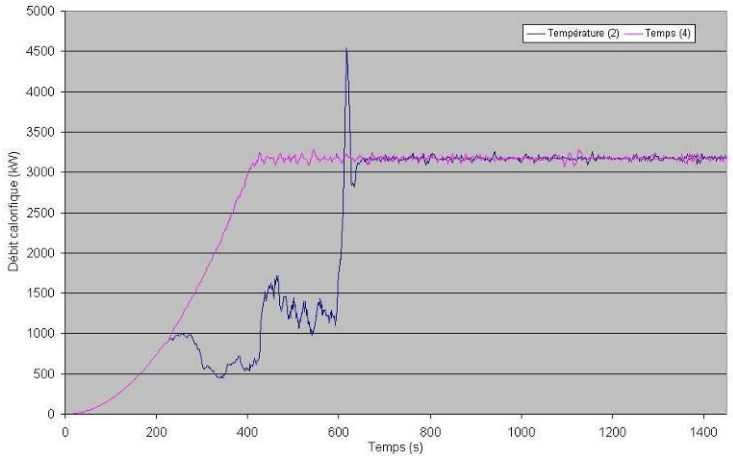
Bris simulé des fenêtres à un temps donné

Mis à part pour le bris des fenêtres, les conditions initiales sont les mêmes que dans la simulation précédente. Les caractéristiques de la simulation sont les suivantes :

- Le débit calorifique imposé est de 3 200 kW. Celui-ci a été évalué en fonction du combustible disposé dans la chambre.
- Le débit surfacique imposé est de 700 kW.m^{-2} sur une surface de 4,6 m²
- Le débit surfacique imposé suit une croissance en αt^2

Cependant, comme dans le cas présenté précédemment les fenêtres sont ôtées de la simulation beaucoup trop tôt par rapport à l'expérimental pour pouvoir permettre une comparaison probante, une suppression des vitrages dans FDS 600 s après le début de l'essai est effectué comme cela a été observé expérimentalement. Par conséquent, la dynamique des écoulements simulés et expérimentés devrait être comparables et des conclusions dressées quant à la capacité de FDS à simuler ce cas.

- Ouverture simultanée des deux fenêtres de la chambre 600 secondes après l'allumage



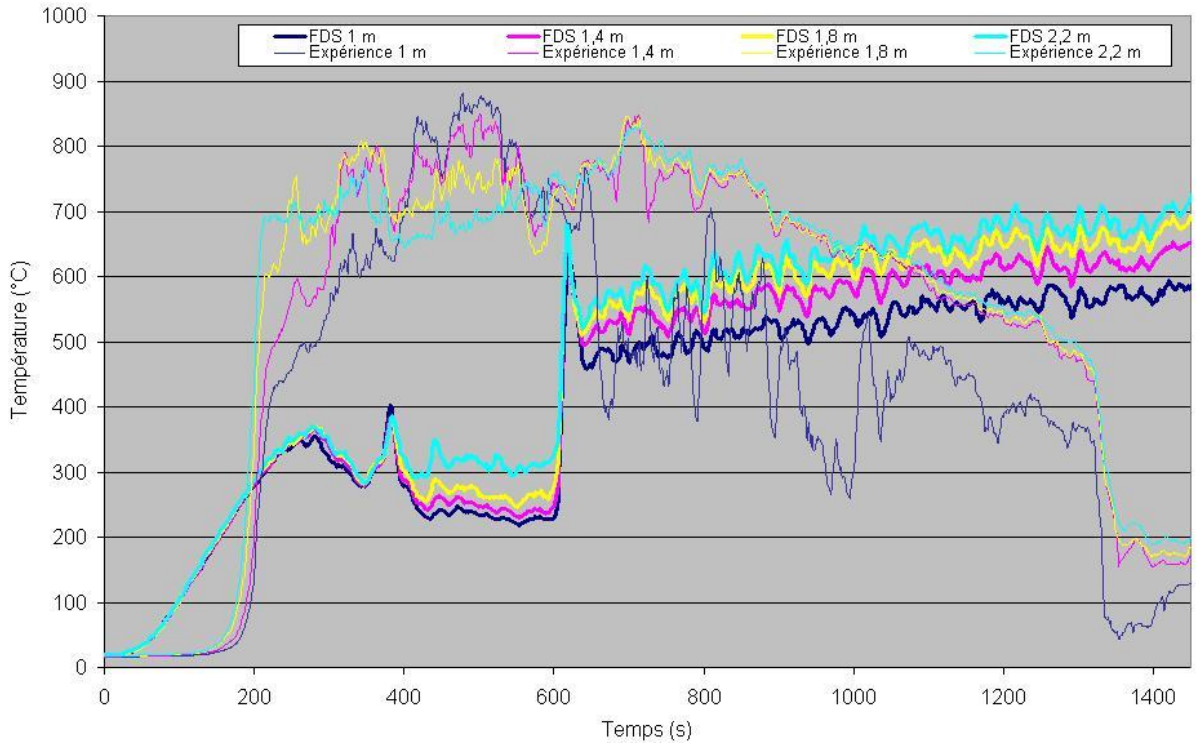
382. *Débit calorifique des simulations de l'essai B (bris des fenêtres à un temps ou à une température imposés)*

Pour la première simulation, lorsque le bris de vitre est asservi à une température maximale atteinte en un point, les fenêtres disparaissent en deux temps, 230 et 380 s environ. Sur les 400 premières secondes de ce calcul, pendant la phase de croissance en αt^2, le foyer est toujours correctement oxygéné. Toute la combustion a lieu à l'intérieur de la chambre contenant à l'origine le combustible. La courbe de débit calorifique du second cas (voir le graphique 382) montre au contraire que pour cette simulation, le feu devient sous-ventilé dès 200 secondes. Le siège de la combustion se déplace

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

ensuite progressivement de la chambre vers les zones plus riches en comburant, c'est à dire le couloir de l'appartement puis celui du palier, jusqu'à ce que les fenêtres s'ouvrent à 600 s. Une fois la fenêtre ouverte, les deux cas se retrouvent dans la même configuration de feu ventilé.

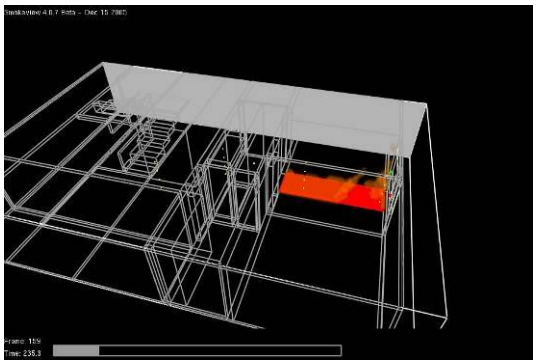
Grâce aux enregistrements vidéos dans le couloir de l'appartement et de la cage d'escalier, bien que les caméras soient localisées en partie basse et que le plafond ne soit pas visible, il est possible d'affirmer que sur l'essai B, les flammes restent majoritairement localisées expérimentalement dans la chambre foyer. Avant le bris de la fenêtre, quelques flammes sortent de la chambre vers le couloir de l'appartement, mais il est improbable d'en observer dans le couloir de la cage d'escalier à la sortie de l'appartement. Le déplacement de la zone de combustion dans FDS n'est donc pas observable expérimentalement.



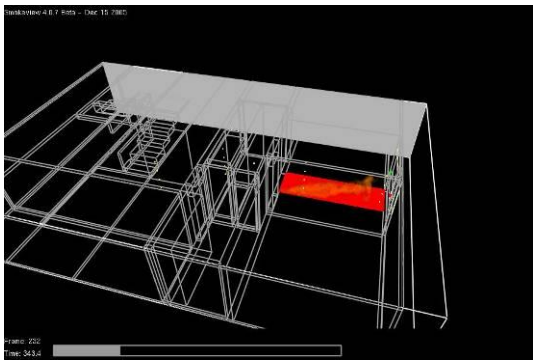
383. *Températures par simulation et expérience à l'entrée de la chambre*

Avant le bris du vitrage à 600 s, les températures à l'entrée de la pièce varient du simple au double entre la simulation (environ 300°C en moyenne) et l'expérience (700°C en moyenne). Cette forte différence peut s'expliquer par une sous-évaluation de la charge calorifique dans la chambre. Ce n'est pas le cas, car alors que le débit calorifique imposé continue à augmenter jusqu'à 400 s, les températures commencent à se stabiliser en même temps que le débit calorifique. Cette sous-estimation de la température s'explique en partie par le manque de comburant dans la chambre (comburant disponible épuisé puis apport de comburant jusqu'au foyer difficile), et le déplacement progressif de la surface de flamme vers le couloir (voir les images 384). Le dégagement d'énergie dans le domaine se déplace ainsi également vers le couloir et les températures dans la chambre sont sous-estimées. C'est également par ce phénomène qu'à partir de 325 s, les températures dans le couloir de l'appartement suivent une forte augmentation.

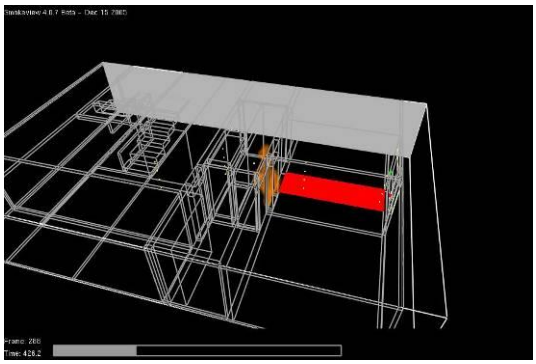
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



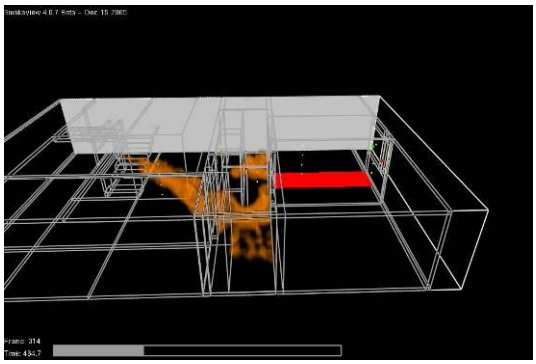
253 secondes (Fenêtre fermée)



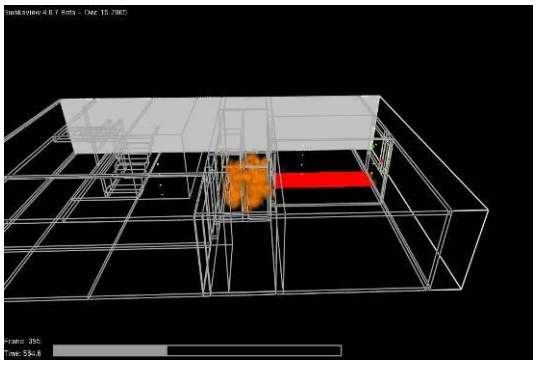
343 secondes (Fenêtre fermée)



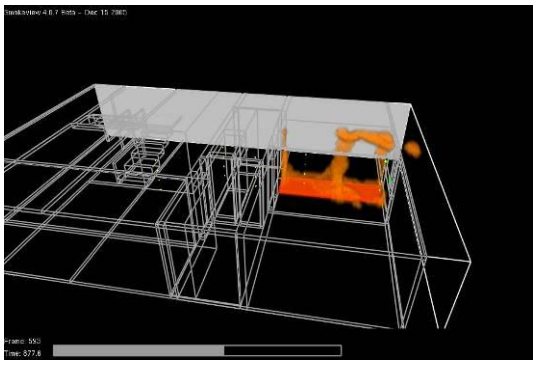
426 secondes (Fenêtre fermée)



464 secondes (Fenêtre fermée)



584 secondes (Fenêtre fermée)



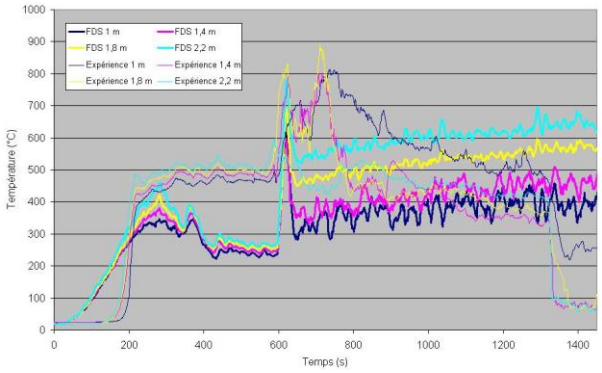
877 secondes (Fenêtre ouverte)

384. *Débit calorifique par unité de volume (280 kW.m^{-3})*

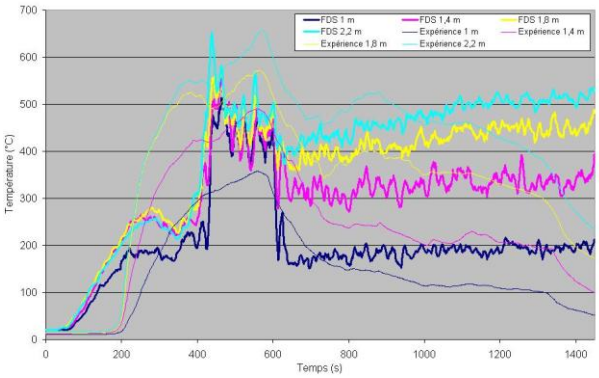
Lorsque les fenêtres se brisent à 600 s, les températures simulées, sous-estimées dans la chambre à cause de la sous-ventilation, augmentent de près de 300°C en moyenne suite à l'apport massif de comburant. Comme cela a été montré précédemment, expérimentalement, après le bris de fenêtre, les températures mesurées à 1,4 m, 1,8 m et 2,2 m sont identiques aux incertitudes de mesure près. Les trois thermocouples se situent dans une couche chaude homogène sur au moins 1 m de hauteur. La température mesurée à 1 m se dissocie des trois précédentes avec des températures inférieures d'une centaine de degrés en moyenne et qui fluctuent beaucoup plus. Ce point de mesure se situe à proximité de l'interface entre l'air frais arrivant du couloir vers la chambre et les gaz de combustion chaud s'échappant vers la cage d'escalier. Numériquement, FDS reproduit moins une telle homogénéité dans les températures et la dissociation entre le point de mesure à 1 m et les 3 autres points n'est pas aussi visible.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Une nouvelle fois, aucune phase de décroissance n'a été considérée pour le foyer.



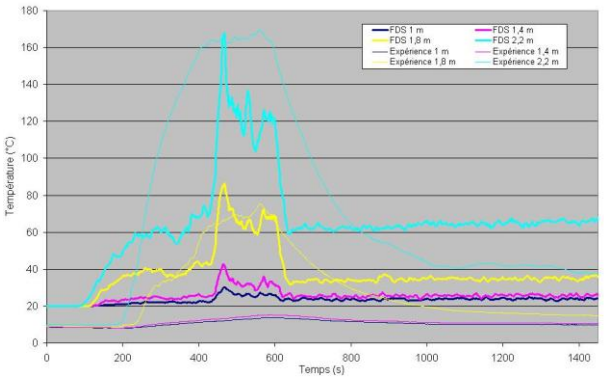
385. *Températures par simulation et expérience dans le fond de la chambre*



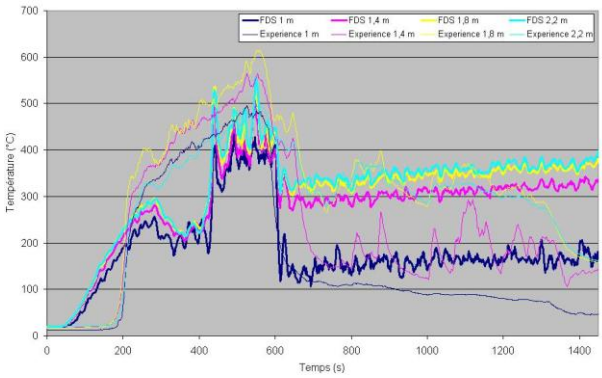
386. *Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'appartement*

Comme précédemment, les températures dans le fond de la chambre ne sont données qu'à titre indicatif jusqu'au bris de fenêtre car les thermocouples ont bougé pendant l'expérience à la suite de la chute de la fenêtre.

Dans le couloir de l'appartement, sur les 400 premières secondes, les températures sont sous-évaluées d'environ 50% par FDS (cf. graphique 386). Le siège de la combustion se déplace ensuite de la chambre vers le couloir de l'appartement. C'est pourquoi les températures suivent une si brusque augmentation aux quatre points de mesure peu après 400 s. Alors que l'écoulement est stratifié expérimentalement, les températures de la simulation sont homogènes de 1 à 2,2 m ; la combustion a lieu sur l'ensemble du couloir et non plus uniquement dans la chambre foyer. En considérant que la décroissance de la puissance du foyer n'est pas prise en compte dans la simulation, la température maximale simulée à 2,2 m est légèrement sous évaluée de 100°C environ après l'ouverture de la fenêtre dans la chambre. La température maximale à 1,8 m est quand à elle du même ordre de grandeur (400°C). À 1,4 et 1 m, les températures simulées sont surestimée respectivement de 75 et 50 °C par rapport à l'expérimentation.



387. *Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'escalier*



388. *Températures par simulation et expérience à l'emplacement des points de comparaison*

Dans le couloir de l'escalier, comme pour le couloir de l'appartement, FDS sous-estime de plus de 50% la température en partie haute entre 200 et 400 secondes, tant que la combustion ne s'est pas déplacée de la chambre foyer vers le fond du couloir de l'appartement (cf. graphique 387). Les températures à 2,2 m ne sont alors plus sous-estimées que de 40°C environ par rapport à l'expérimentation. À 1,8 m, les températures sont correctement simulées. À 1,4 et 1 m, les températures FDS sont surévaluées mais c'est uniquement parce que la température ambiante au début de la simulation est différente de celle des conditions expérimentales. Il est plus important de noter pour ces deux hauteurs qu'il n'y pas de forte augmentation des températures au cours de la simulation comme c'est le cas expérimentalement : les gaz chauds restent en partie haute.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Après les 400 premières secondes, les températures maximales sont globalement du même ordre entre la simulation et l'essai à l'emplacement des points de comparaison (cf. graphique 388). Après le bris thermique de la vitre, la température à 1,4 m est cependant surestimée de 100°C.

Malgré une dynamique de l'écoulement pas toujours correctement reproduite, les températures maximales à l'emplacement des points de comparaison aurait pu être déterminée correctement à condition d'avoir évalué sans trop d'erreur le temps auquel le bris de la fenêtre se produit.

Les différences importantes entre simulation et expérimentation dans la dynamique de l'écoulement ainsi que dans la combustion pourraient être en partie expliquées par une mauvaise évaluation de la charge calorifique dans la chambre foyer. En effet, le déplacement du siège de la combustion vers le couloir de l'appartement et de la cage d'escalier pourrait être provoqué par une surévaluation de la source prescrite définie. Trop de matière est dégagée pour l'oxygène disponible ainsi que pour l'apport possible en fonction de la taille des ouvertures. Le foyer ne dispose donc pas d'assez d'oxygène pour que toute la combustion ait lieu dans la chambre. Il manque d'autant plus d'oxygène par rapport à l'expérience, qu'aucune fuite vers l'extérieur, les chambres adjacentes (par les portes, la cloison endommagée en partie haute de la chambre foyer, etc.) ou encore les étages supérieurs n'est considérée dans l'ensemble du domaine.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 10. Caractérisation des points de comparaison lors des essais du Puy en Velay

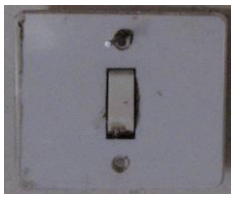
Essai A

Le foyer se situe dans la première chambre équipée d'un canapé en mousse placé sur quatre palettes de bois. Une table et un petit meuble en bois ainsi qu'un ensemble informatique complètent le mobilier. La porte de la chambre et celle du palier sont ouvertes, le brouillard d'eau est installé sur la circulation du palier. L'allumage s'effectue en attaquant la mousse du canapé par sa partie inférieure.

Le tableau 389 récapitule l'emplacement des éléments testés, les dégradations observées et les photos avant et après l'essai.

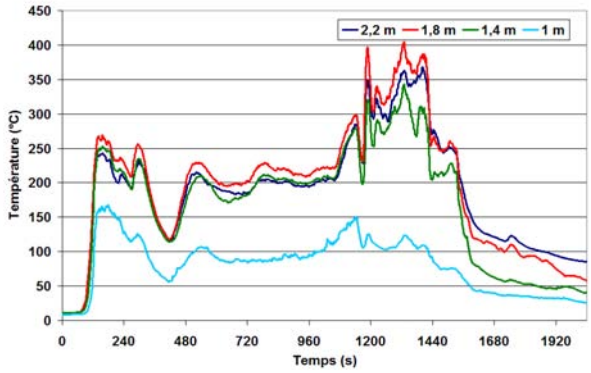
Nature et position de l'élément testé	Photo avant l'essai	Photo après l'essai	Dégradation observée
Interrupteur 2,2 m			Enjoliveur noirci par les fumées mais très peu dégradé. Bouton poussoir légèrement fondu
Prise de courant 2,2 m			Enjoliveur noirci par les fumées mais très peu dégradé. Fiche légèrement fondu
Prise de courant 2,2 m			Aucune partie de fondue. Enjoliveur noirci par les fumées mais très peu dégradé.
Interrupteur 1,8 m			Enjoliveur noirci par les fumées et matériau plastique légèrement endommagé : il devient fragile, craquant. Le bouton est fondu et commence à couler.
Prise de courant 1,8 m			Enjoliveur noircie par les fumées et matériau plastique légèrement endommagé : il devient fragile, craquant. Les fiches sont fondues et commencent à couler.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

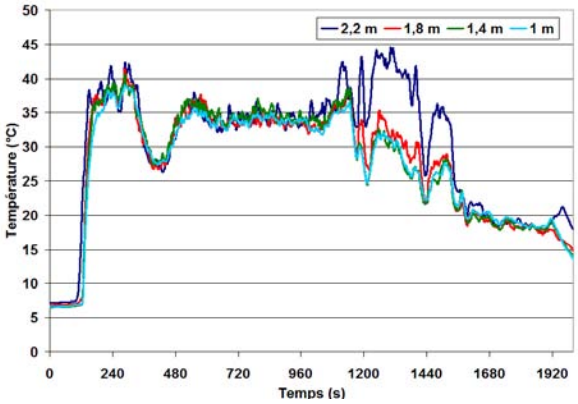
Prise de courant 1,8 m			Aucune partie de fondue. Enjoliveur noirci par les fumées légèrement dégradé.
Interrupteur 1,4 m			Noirci par les fumées. Bouton poussoir très proche d'afficher des déformations.
Interrupteur 1 m			Jauni. Pas de déformations
Bloc autonome d'éclairage de sécurité 1,9 m			La vasque et le système de fonctionnement interne a disparu en se désolidarisant de la partie fixée au mur qui est elle-même déformée et présente de fortes coulures.
Diffuseur d'alarme 2,1 m			L'élément est déformé et montre des traces de fonte et de combustion
Interrupteur Circulation 2,2 m			Intact, léger dépôt de fumée
Interrupteur Circulation 1,8 m			Intact, léger dépôt de fumée
Cibles 4ème étage			Aucune dégradation n'est constatée au 4ème étage et plus.

389. *Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai A*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



390. *Températures à proximité des éléments d'usage courant*



391. *Températures dans la circulation de l'escalier*

Les interrupteurs dans la circulation de l'escalier n'ont subi aucun dommage. La température à 1,8 et 2,2 m ne dépassent jamais 45°C, valeur qui est inférieure aux températures théoriques susceptibles de mener à des déformations d'un plastique (cf. graphique 391). Il est également important de souligner qu'à cet emplacement, les interrupteurs ont été protégés par le brouillard d'eau lorsqu'il s'est déclenché dans la circulation du palier.

La couleur de l'interrupteur placé à 1 m dans le couloir de l'appartement est passée du blanc au jaune/brun, sans que l'élément n'ait subi de déformations. Il a été exposé 90 s à des températures supérieures à 150°C avec un maximum très ponctuel à 170°C et 280 s (200 puis 80 s) à plus de 110°C (cf. graphique 390).

Celui placé juste au-dessus à 1,4 m est soumis jusqu'à ce que la fenêtre de la chambre cède, aux mêmes températures que les éléments placés à 1,8 et 2,2 m plus ou moins 15°C. Il est supposé que c'est la sollicitation thermique après les 19 premières minutes d'essai qui différencie les états de dégradation. Ainsi, l'interrupteur à 1,4 m est soumis 245 s à des températures supérieures à 250°C avec un maximum très ponctuel à 340°C. Cette exposition mène donc à un noircissement et un cloquage de l'enjoliveur et le bouton est à la limite de commencer à fondre.

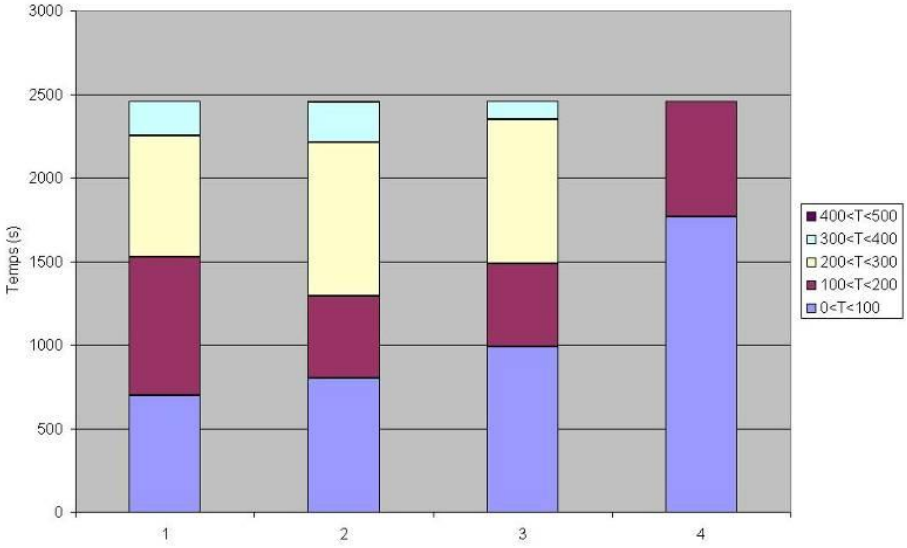
Les interrupteurs placés à 1,8 et 2,2 m présentent des dégradations quasi-identiques, celles de l'élément disposé à 1,8 m étant légèrement plus avancées au niveau de la partie supérieure de l'enjoliveur et de la fonte du bouton. L'interrupteur à 2,2 m est soumis 250 s à des températures supérieures à 290°C avec un maximum très ponctuel encore une fois à 365°C. Celui à 1,8 m, 245 s à plus de 305°C avec un maximum en 400°C.

Les prises de courant placées à 1,8 et 2,2 m étant constituées des deux mêmes matériaux distincts (fiche + enjoliveur) que les interrupteurs traités précédemment présentent des dégradations identiques.

La dernière prise de courant située à 2,2 m est également soumise pendant 250 s à des températures supérieures à 290°C avec un maximum en 365°C. Seul l'enjoliveur est dégradé, de la même façon que celui de l'autre interrupteur placé à 2,2 m.

Le bloc autonome d'éclairage de sécurité est constitué de deux parties enclenchées l'une dans l'autre. Après l'essai, seule la partie arrière en ABS est encore visible au mur. La partie avant étant tombée à un temps indéterminé de l'incendie, les dégradations qu'elle présente ne peuvent être reliées aux températures mesurées. La partie arrière a été soumise pendant 430 s à des températures supérieures à 250°C avec un maximum stable pendant près de 2 min à 400°C.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



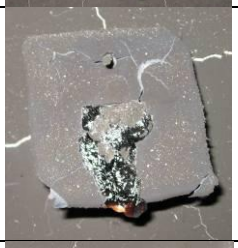
392. *Cumul des températures à 2,2, 1,8, 1,4 et 1 m*

Essai B

Sur cet essai, le foyer se situe dans la deuxième chambre équipée d'un canapé en mousse placé sur quatre palettes de bois. Une table et un petit meuble en bois ainsi qu'un ensemble informatique complètent le mobilier. L'allumage s'effectue en attaquant la mousse du canapé par sa face inférieure. La configuration est identique à celle de l'essai A sauf qu'aucun dispositif de brouillard d'eau n'est actif.

Nature et position de l'élément testé	Photo avant l'essai	Photo après l'essai	Dégradation observée
Interrupteur 2,2 m			Les boutons ont fondu et ont totalement disparu. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante.
Interrupteur 2,2 m			Le bouton a fondu en coulant sur l'enjoliveur de l'interrupteur. Cet enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante.
Interrupteur 2,2 m			Le bouton a fondu et a totalement disparu. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

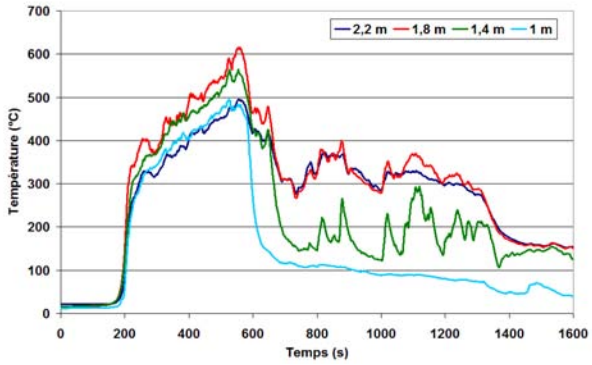
Interrupteur 1,8 m			Le bouton a fondu et a partiellement disparu. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante.
Interrupteur 1,8 m			Le bouton a fondu et a totalement disparu. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante
Interrupteur 1,8 m			L'enjoliveur de l'interrupteur est dégradé en surface, mais ne présente pas d'aspect cassant dans la profondeur du matériau. La majorité du bouton est brûlée.
Interrupteur 1,4 m			Le bouton a partiellement fondu et des traces de coulures sont visibles sur l'enjoliveur qui est lui-même endommagé en surface et présente une structure cassante par endroits.
Interrupteur 1,4 m			Le bouton a totalement fondu mais quelques traces de coulures subsistent sur l'enjoliveur qui est lui même endommagé en surface et présente une structure cassante par endroits.
Interrupteur 1 m			L'enjoliveur est légèrement dégradé en surface et le bouton a commencé à fondre.
Diffuseur d'alarme 1,4 m			La face avant est déformée après avoir fondu et présente de très légères traces de carbonisation. La face arrière est quant à elle quasiment intacte, le circuit imprimé ayant protégé

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

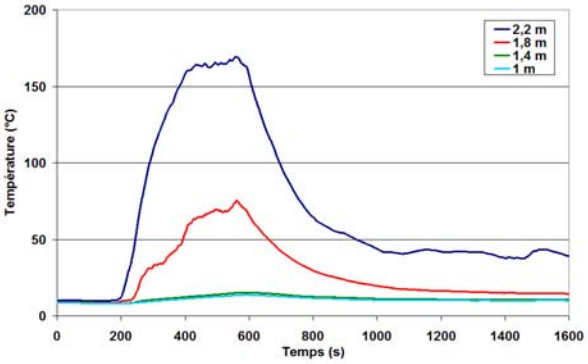
			l'intérieur du dispositif.
Bloc autonome d'éclairage de sécurité 1,9 m			Les parties plastiques se sont totalement déformées et présentent par endroit des traces de carbonisation. Les composants électroniques sont tout à fait identifiables et ne présentent que peu de dégradations, en particulier les circuits imprimés seulement recouverts de suies.
Interrupteur Circulation 2,2 m			Se situait dans la partie haute des fumées stratifiées dans la circulation. Légèrement noirci en surface.
Interrupteur Circulation 1,8 m			Se situait dans la partie basse des fumées stratifiées dans la circulation. Aucune dégradation n'est à constater.
Cibles 4ème étage			Aucune dégradation n'est constatée au 4ème étage et plus.
Prise de courant – Chambre foyer 0,2 m			Prise totalement carbonisée. Seules les parties métalliques sont encore visibles.
Ensemble ordinateur - Chambre foyer			Aucune matière plastique n'est encore visible. Les éléments sont totalement carbonisés et seules les parties métalliques sont encore visibles.

393. *Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai B*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011



394. *Températures à proximité des éléments d'usage courant*



395. *Températures dans la le couloir de l'escalier*

L'interrupteur placé à 1,8 m dans le couloir de l'escalier n'est pas dégradé. La température maximale à laquelle il est soumis est de l'ordre de 80°C (cf. graphique 395). Ces températures ne sont pas susceptibles de dégrader le PC et l'ABS dont les températures de transition vitreuse sont de l'ordre respectivement de 150 et comprise entre 105 et 115°C.

L'interrupteur placé à 2,2 m de hauteur dans le couloir de l'escalier a son enjoliveur qui a commencé à légèrement noircir en surface. Il a été soumis environ 220 s à des températures supérieures à 150°C avec un maximum de 170°C et 375 s à des températures supérieures à 110°C (cf. graphique 395).

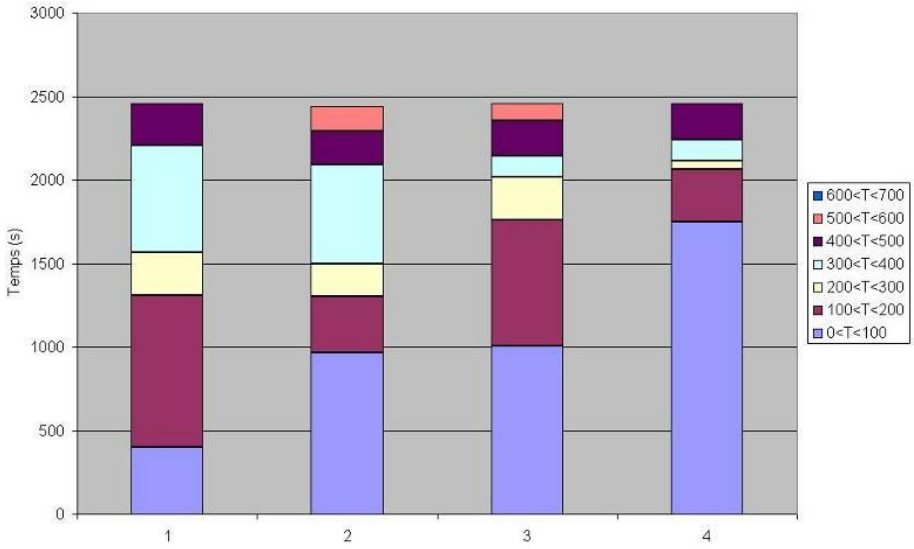
Sur cet essai B, les éléments à 1 et 1,4 m dans le couloir de l'appartement ont des sollicitations thermiques assez proches (différence de 50°C environ) lors des 10 premières minutes. Ils sont exposés pendant 275 s à des températures supérieures à 250°C avec un maximum en 500°C à 1 m et 550°C à 1,4 m (cf. graphique 394). Les éléments placés à 1,4 m sont soumis 70 s de plus à des températures supérieures à 250°C. Exposer plus longtemps l'élément à des températures supérieures à 250°C engendre donc en plus, l'aspect cassant de l'enjoliveur.

Les interrupteurs placés à 1,8 et 2,2 m permettent de mettre en avant un paramètre susceptible d'induire des erreurs lors de l'analyse de dégradations post-incendies d'élément d'usage courant : la quantité de matière de certaines parties. En effet, les boutons étant constitués du même matériau d'un interrupteur à l'autre, les plus petits ont totalement fondus et ont disparu, alors que les plus gros ont également totalement fondu mais sont toujours visibles sur les enjoliveurs. Pourtant, ces interrupteurs sont soumis à la même exposition thermique à savoir plus de 1 110 s à des températures supérieures à 250°C avec un maximum de 610°C à 1,8 m et 500°C à 2,2 m.

L'état de la prise de courant dans la chambre à 20 cm du sol est caractéristique d'un élément qui a été au contact direct des flammes pendant un temps très long. Des conditions d'embrasement généralisé ayant été atteintes dans la chambre, il n'est pas étonnant de retrouver l'élément dans cet état de dégradation.

L'ensemble du bloc autonome d'éclairage de sécurité est tombé à un temps indéterminé. Sous l'effet de la température, la partie arrière se déforme autour des points de fixation.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

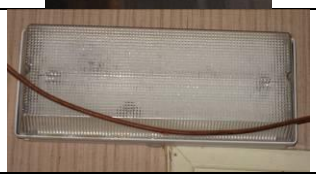


396. *Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m*

Essai C

Nature et position de l'élément testé	Photo avant l'essai	Photo après l'essai	Dégradation observée
Interrupteur 2,2 m			Aucune dégradation (TC30)
Prise de courant 2,2 m			Aucune dégradation (TC30)
Prise de courant 1,8 m			Aucune dégradation (TC39)
Interrupteur 1,8 m			Aucune dégradation (TC39)

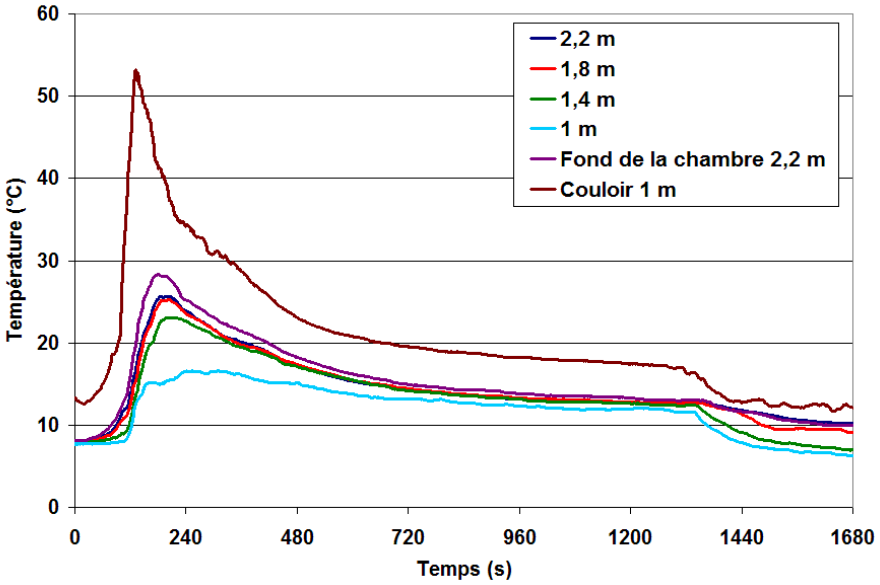
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Prise de courant 1,8 m			Aucune dégradation (TC39)
Interrupteur 1,4 m			Aucune dégradation (TC37)
Interrupteur 1,4 m			Aucune dégradation (TC37)
Interrupteur 1 m			Aucune dégradation (TC35)
Bloc autonome d'éclairage de sécurité 1,9 m			Aucune dégradation (TC30)
Bloc autonome d'éclairage de sécurité 1,4 m			Aucune dégradation (TC37)
Télécommande KAUFEL			Aucune dégradation (TC19)
Diffuseur alarme sonore			Aucune dégradation (TC19)
Bloc autonome d'éclairage de sécurité 2,1 m			Aucune dégradation (TC19)

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Ensemble ordinateur			Aucune dégradation (TC56)

397. *Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai C*

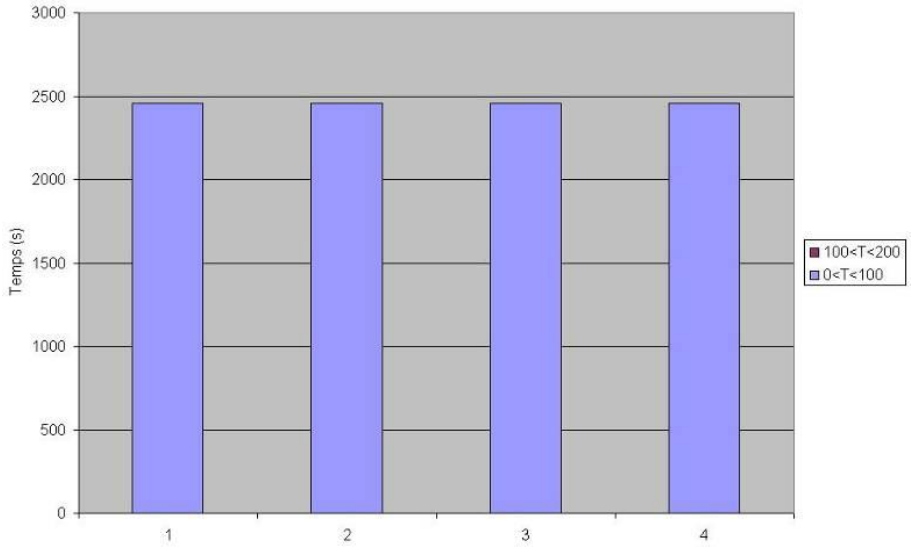


398. *Températures à proximité des éléments d'usage courant*

Aucun élément n'a été dégradé. Les éléments d'usage courant n'ont jamais été exposés à des températures supérieures à 30°C. Cet essai n'a pas apporté d'informations supplémentaires concernant la dégradation des éléments d'usage courant, car il est déjà connu (par expérience du quotidien !) qu'ils ne sont pas dégradés à ces températures ambiantes sur des temps aussi courts que ceux des essais. Une exposition infiniment plus longue à la lumière peut mener à un changement de couleur de l'élément.

Un ensemble ordinateur soumis à une température maximale de l'ordre de 55°C pendant moins de 30s n'est pas dégradé. Ceci est également normal, puisque dans le cadre normal d'utilisation d'un ensemble ordinateur, il arrive que certaines parties soient soumises à des températures de cet ordre sur des temps beaucoup plus longs (de l'ordre de l'heure plutôt que de la seconde).

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

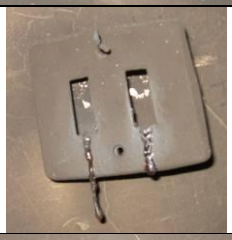
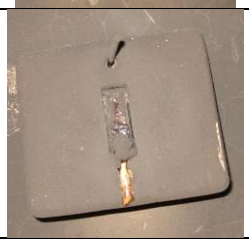
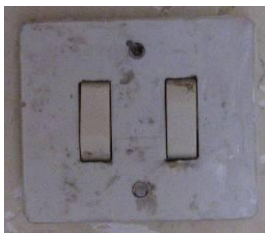


399. *Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m*

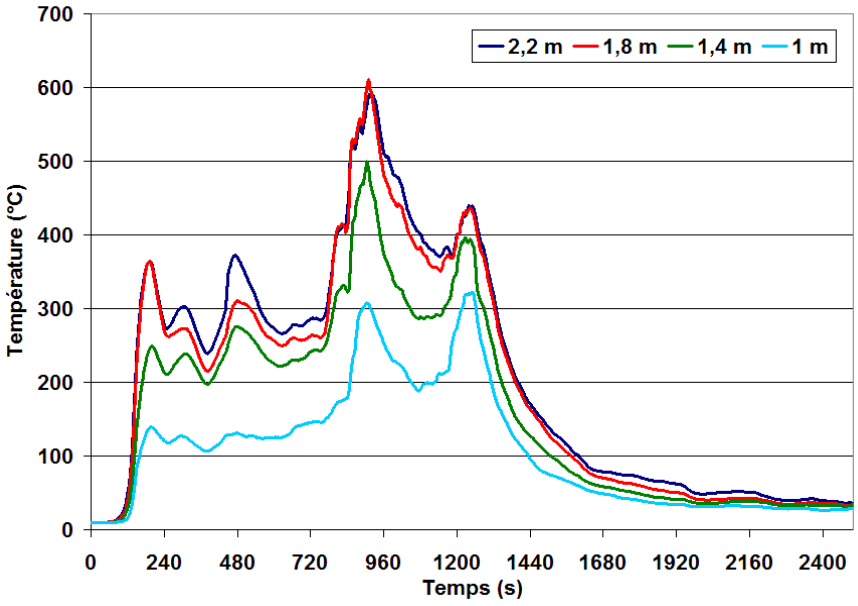
Essai F

Nature et position de l'élément testé	Photo avant l'essai	Photo après l'essai	Dégradation observée
Interrupteur 2,2 m			Un bouton a fondu et a totalement disparu. Une très petite partie fondue du premier est encore visible. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante et des fissures sont apparentes.
Prise de courant 2,2 m			La prise est déformée, noircie et partiellement carbonisée. Elle présente une structure cassante et des fissures sont apparentes.
Prise de courant 1,8 m			La prise est déformée, noircie et partiellement carbonisée. Elle présente une structure cassante et des fissures sont apparentes.
Interrupteur 1,8 m			Un bouton a fondu et a totalement disparu. Une très petite partie fondue du premier est encore visible. L'enjoliveur est déformé, noirci et partiellement carbonisé. Il présente une structure cassante et des fissures sont apparentes.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Prise de courant 1,8 m			La prise est déformée, noircie et partiellement carbonisée. Elle présente une structure cassante en surface.
Interrupteur 1,4 m			Les boutons ont fondu et presque totalement disparu. L'enjoliveur est noirci, légèrement déformé et présente en surface une structure cassante par endroit.
Interrupteur 1,4 m			Le bouton a fondu et coulé vers la partie inférieure de l'interrupteur mais est encore visible dans son ensemble. L'enjoliveur est noirci, légèrement déformé et la structure de la surface est dégradée.
Interrupteur 1 m			Les boutons ont commencé à noircir et à se déformer. La zone inférieure de l'enjoliveur est noircie et les premières dégradations sont légèrement visibles. La zone supérieure est quant à elle plus endommagée et sa structure présente les premières dégradations surfaciques menant à une structure cassante. Cette exposition est vraiment l'état intermédiaire entre dégradation et non dégradation

400. *Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai F*



tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

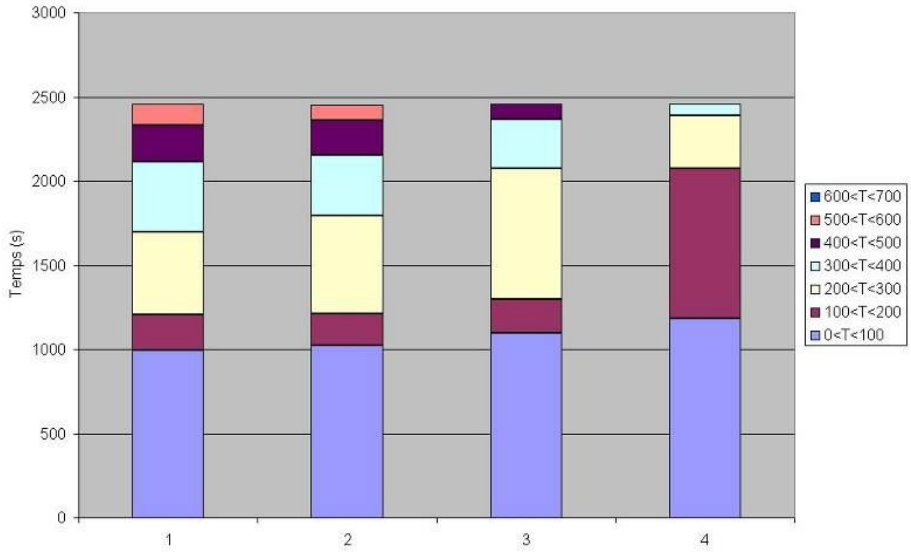
401. *Températures à proximité des éléments d'usage courant*

L'interrupteur à 1 m est soumis pendant 200 s (100 + 100 s) à des températures supérieures à 250°C avec un maximum de 320°C (cf. graphique 401). Cela peut également être interprété par une exposition à plus de 190°C pendant 472 s avec toujours un maximum de 320°C. Comme je l'indique précédemment, cet état est intermédiaire entre les différents états de dégradation.

L'interrupteur à un bouton placé à 1,4 m est soumis 550 s à des températures supérieures à 250°C avec un maximum en 500°C. Celui à deux boutons à 1,4 m est donc en théorie soumis à des températures du même ordre. Cependant, les dégradations qu'il présente sont légèrement supérieures à l'interrupteur un bouton. En effet, le matériau constituant l'enjoliveur est légèrement plus endommagé en surface pour l'interrupteur type deux boutons. Le matériau est plus fragilisé. De plus les deux boutons ont totalement fondu de leur emplacement initial, seule une petite coulée subsiste sur le bas de l'enjoliveur.

Les différences perceptibles entre ces deux cas peuvent remettre en cause soit la méthode des points de calage dans son application, soit la disposition des éléments lors de l'expérimentation. En effet, les deux interrupteurs ayant les mêmes références, il serait normal de s'attendre à avoir des dégradations identiques entre les deux. Comme ce n'est pas le cas, il est possible de se demander si cette méthode d'évaluation des dégradations sur un élément d'usage courant est applicable à coup sûr pour comparer à des incendies réels, des scénarios d'incendie simulés.
Cette méthode ne doit pas être remise en cause suite aux légères différences de comportement des deux interrupteurs. Ces différences proviennent plus certainement de la position occupée par les éléments sur la paroi, l'un se situant plus près de la porte donnant vers la chambre dans laquelle est située le foyer que l'autre et par conséquent certainement légèrement plus exposé aux gaz chauds.

Les éléments placés à 1,8 et 2,2 m sont considérés comme soumis à des conditions thermiques identiques. Pendant environ 1 200 s, la température est supérieure à 250°C avec un maximum de l'ordre de 600°C. Les mêmes dégradations sont visibles sur les interrupteurs et les prises de courant.

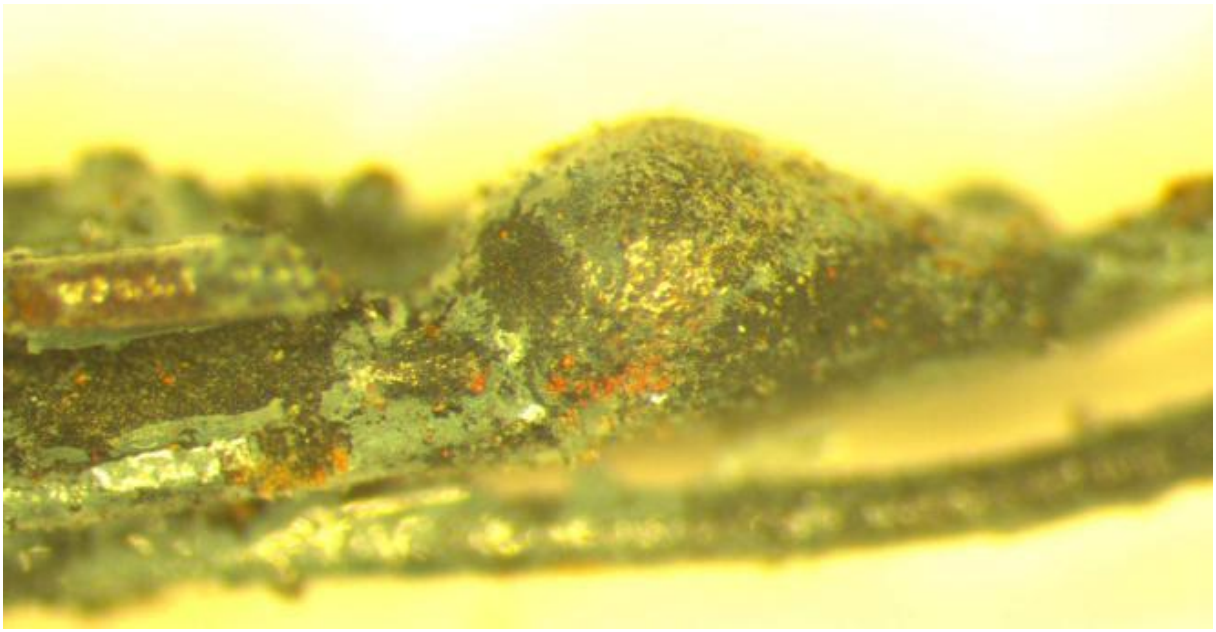


402. *Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 11. Photographies prises lors de l'analyse en laboratoire du lampadaire halogène impliqué dans l'incendie du chapitre 5

403. *Fragments du lampadaire halogène collectés sur les lieux de l'incendie*



404. *Perlage trouvé sur un conducteur électrique au niveau de la fixation d'un des deux tubes supportant la vasque sur l'articulation métallique*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

405. *Perlage trouvé sur un conducteur électrique au niveau de la fixation d'un des deux tubes supportant la vasque sur l'articulation métallique*

406. *Vasque fortement corrodée*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 12. Complément des données d'entrée du cas fictif de la chambre d'hôtel

Réaction chimique

Dans les simulations, l'ensemble des matériaux combustibles réagit selon la même réaction chimique, tant celui du lit que celui du fauteuil ou de l'armoire dans notre cas. Ceci peut être considéré comme une des limitations du code utilisé. Pour la réaction chimique unique du cas d'application un combustible de masse molaire *M* égale à 130,3 g.mol^{-1} est considéré. Il réagit selon la réaction (73) dans laquelle les coefficients stœchiométriques idéaux valent 7,02, 6,3 et 3,55 respectivement pour le dioxygène, le dioxyde de carbone et l'eau. La fraction massique de combustible convertie en particules de suies est de 0,1 g/g. Celle de monoxyde de carbone est déduite de celle de suie par la corrélation (74) de Köylu et Faeth [KOYLU et FAETH 1991]

$$\text{(73).} \qquad C_x H_y O_z + \nu_{O_2} O2 \rightarrow \nu_{CO_2} CO_2 + \nu_{H_20} H_2 0 + \nu_{CO} CO + \nu_{Soot} Soot$$

$$\text{(74).} \qquad y_{CO} = \frac{12x}{M_f \nu_f} 0{,}0014 + 0{,}37 y_s$$

Verre de la vitre

Pour prendre en compte les caractéristiques physiques du verre composant la vitre de la chambre, les valeurs fixées par défaut pour ce matériau dans la base de données de FDS sont utilisées. Il y est défini comme incombustible et thermiquement épais et les caractéristiques suivantes lui sont imposées :

- une capacité thermique massique constante et égale à 0,84 kJ.kg^{-1}.K^{-1}
- une conductivité thermique constante et égale à 0,76 W.m^{-1}.K^{-1}
- une épaisseur de 0,005 m
- une masse volumique de 2 700 kg.m^{-3}
- une température initiale de 20 °C

Béton des parois

Comme pour le verre, les valeurs disponibles dans la base de données de FDS sont utilisées pour définir les caractéristiques du béton des murs. Elles sont très proches de celles du verre : seules les valeurs numériques changent. Le béton a :

- une capacité thermique massique constante et égale à 0,88 kJ.kg^{-1}.K^{-1}
- une conductivité thermique constante et égale à 1 W.m^{-1}.K^{-1}
- une épaisseur de 0,1 m
- une masse volumique de 2100 kg.m^{-3}
- une température initiale de 20°C.

Bois du lit, de l'armoire et du fauteuil

Le bois est également défini comme un matériau combustible :

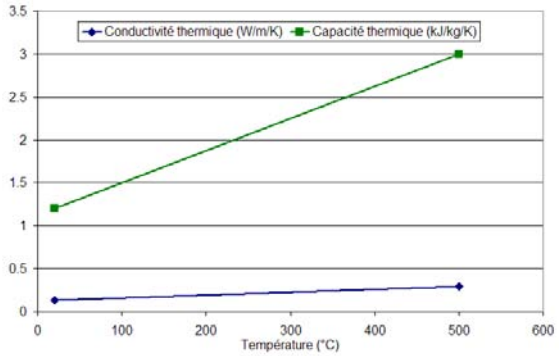
- sa température d'auto-inflammation est de 360 °C
- son enthalpie de vaporisation vaut 500 kJ.kg^{-1}
- sa vitesse maximale de combustion est de 0,1 kg.m^{-2}.s^{-1}

Cependant, le matériau n'est plus considéré comme un solide thermoplastique comme l'était la mousse, mais comme un matériau ayant la faculté de se consumer en produisant des charbons s'il y a combustion. Un mince front de pyrolyse peut se déplacer à l'intérieur du combustible solide et sépare la partie vierge de la partie charbonneuse : le matériau n'est plus considéré comme un solide homogène. Le matériau vierge est défini comme solide thermiquement épais et ses caractéristiques sont les suivantes :

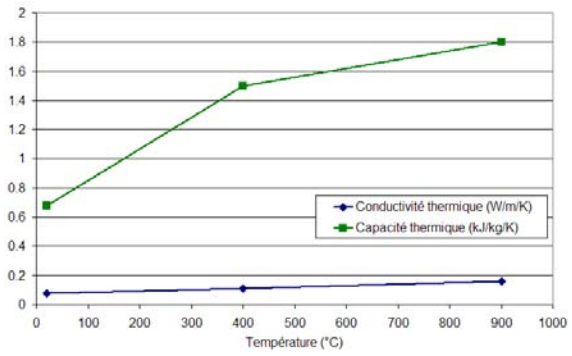
- une température initiale de 20 °C
- une masse volumique de 450 kg.m^{-3}
- une épaisseur de 0,028 m
- une fraction massique d'eau 0,01 kg/kg
- une capacité thermique massique et une conductivité thermique variables en fonction de la température comme indiqué sur le graphique 407.

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

La masse volumique de la phase charbonneuse est de 120 kg.m^{-3}, et sa capacité et sa conductivité thermique varient en fonction de la température comme cela est tracé sur le graphique 408.



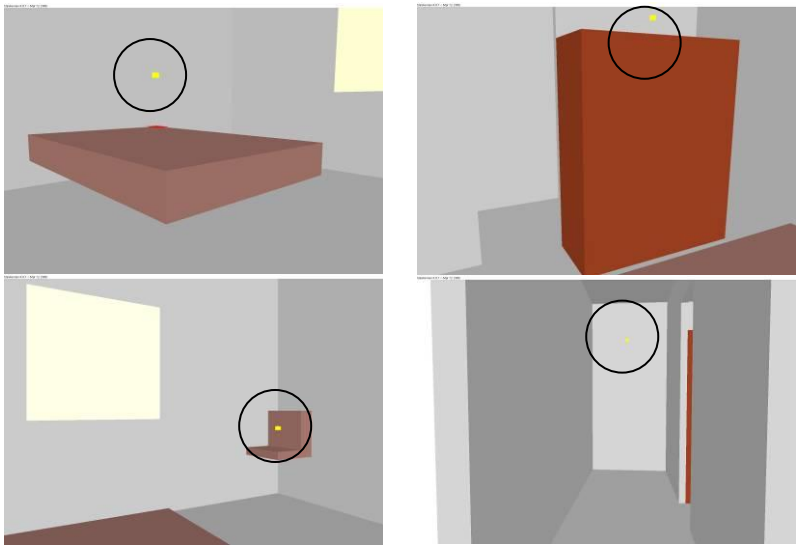
407. *Évolution, en fonction de la température, de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique du bois*



408. *Évolution, en fonction de la température, de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique des charbons du bois*

Sorties FDS

Quatre points de mesures enregistrant en fonction du temps la température, la concentration massique en suie et la fraction de mélange sont placés dans le couloir et au-dessus du lit, de l'armoire et du fauteuil (cf. images 409). Des coupes de température en fonction du temps dans des plans verticaux séparant le couloir à sa moitié dans la longueur et passant par le milieu de la porte et divisant la chambre sont demandées. La température des parois solides et le flux thermique incident sur toutes les surfaces solides sont enregistrés en fonction du temps.



409. *Emplacement des points de mesure*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 13. Test de Belstein

Caractéristiques des flammes lors de la combustion de matières plastiques

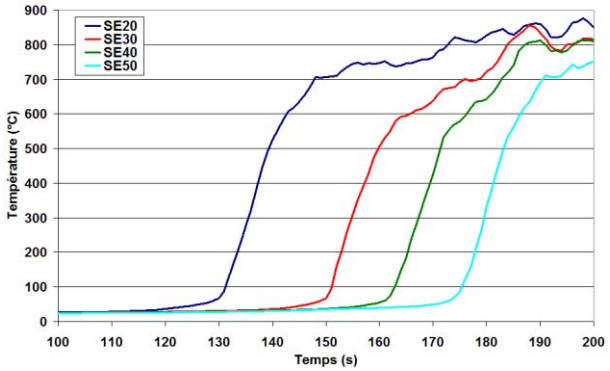
Matière	Abréviation	Inflammation	Auto-extinguible	Caractère de la flamme	Comportement du matériau	Odeur
Polyéthylène	PE	Relativement rapide	Non	Bleue à pointe jaune, flamme faiblement lumineuse	Fond, coule	Bougie éteinte
Polypropylène	PP	Relativement rapide	Non	Jaune à base bleue, flamme faiblement lumineuse	Fond, coule	Bougie éteinte, encens
Polystyrène	PS	Relativement rapide	Non	Jaune-orange, fort dégagement de suie	Se ramollit	Styrène, odeur douceâtre
Styrène butadiène	SB	Relativement rapide	Non	Jaune-orange, fort dégagement de suie	Se ramollit	Styrène, caoutchouc
Styrène acryl nitrile	SAN	Relativement rapide	Non	Jaune-orange, fort dégagement de suie	Se ramollit	Styrène
Acryl butadiène styrène	ABS	Relativement rapide	Non	Jaune-orange, fort dégagement de suie	Se ramollit	Styrène, caoutchouc
Cellulose acétate	CA	Relativement rapide	Non	Jaune foncé, légère fumée noire, les gouttes continuent à brûler	Fond, coule	Papier brûlé, vinaigre
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Relativement rapide	Non	Jaune à la face, inférieure bleue, légère fumée noire et étincelles	Se ramollit, ne coule la plupart du temps pas, légère carbonisation après extinction	Fruitée, aigre
Polycarbonate	PC	Lent	Parfois	Jaune, fort dégagement de suie	Fond sous formation de cloches	Légèrement phénolique
Polyocétal	POM	Relativement rapide	Non	Incolore, pratiquement invisible	Fond, coule	Très forte odeur piquante de formol
Polyamide	PA	Pas rapide	Oui	Bleue à pointe jaune	Fond, coule	Cornée
Polychlorure de vinyle	PVC	Très lente	Oui	Jaune, verte à la base, étincelles vertes et jaunes, forte fumée blanche ou noire, flamme lumineuse	Se ramollit, se carbonise	Acide chlorique prononcé

410. *Caractéristiques des flammes lors de la combustion de matières plastiques*

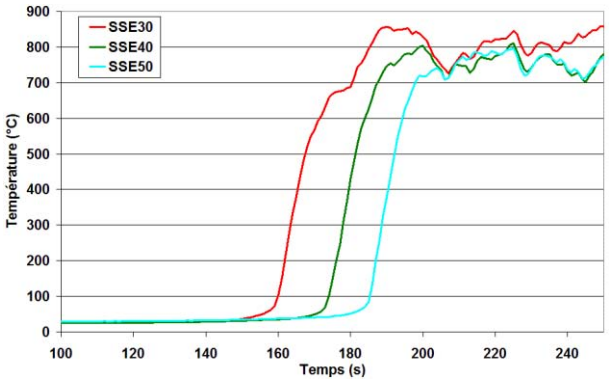
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 14. Températures mesurées à la surface du matelas pour l'expérience dans le caisson de transport maritime

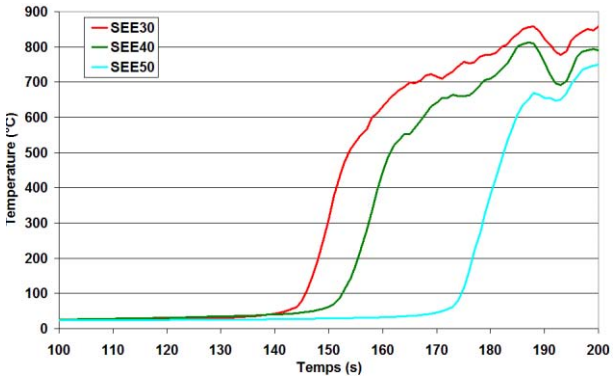
Les températures mesurées dans les directions S, SE, SSE, SEE, et O lors de l'expérience dans le caisson de transport maritime sont tracées dans les graphiques 411 à 415. Elles complètent les températures mesurées dans les directions N et E présentées précédemment.



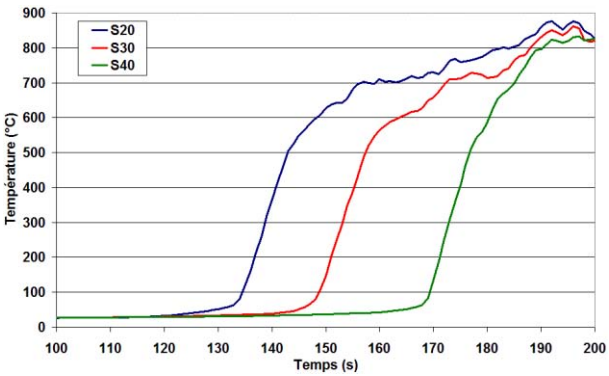
411. *Températures mesurées dans la direction Sud-est (SE)*



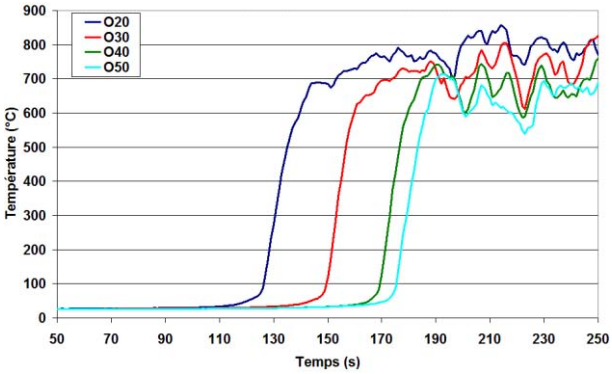
412. *Températures mesurées dans la direction Sud Sud-est (SSE)*



413. *Températures mesurées dans la direction Sud-est est (SEE)*



414. *Températures mesurées dans la direction Sud (S)*

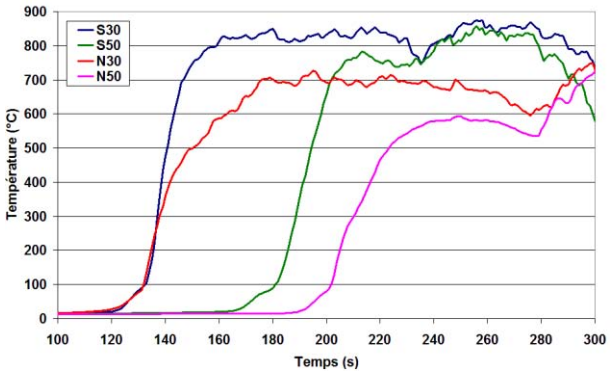


415. *Températures mesurées dans la direction Ouest (O)*

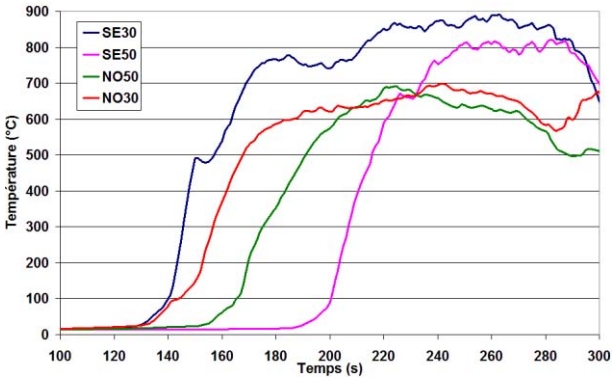
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 15. Températures mesurées à la surface du matelas pour l'expérience dans l'appartement

Les températures mesurées à la surface du matelas dans les directions N, S, SE et NO lors de l'expérience dans l'appartement sont tracées dans les graphiques 416 et 417. Elles complètent les températures mesurées dans les directions E, O, SO, et NE présentées précédemment.



416. *Températures mesurées sur l'axe N/S*

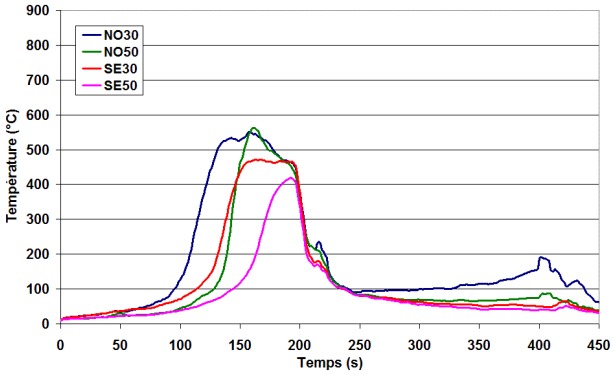


417. *Températures mesurées sur l'axe NO/SE*

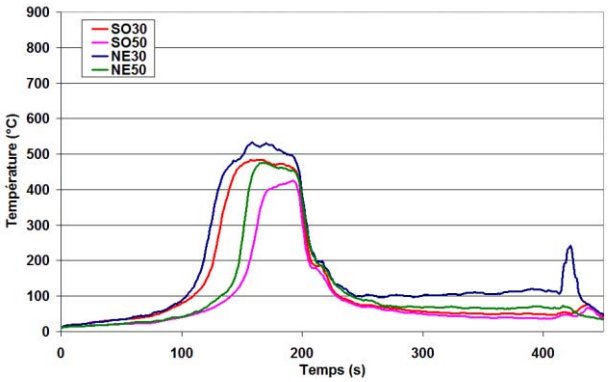
tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 16. Températures simulées à la surface du matelas pour l'expérience dans l'appartement

Les températures simulées à la surface du matelas dans les directions NO, SE, SO, et NE lors de la reconstitution de l'expérience dans l'appartement sont tracées dans les graphiques 418 et 419. Elles complètent les températures simulées dans les directions SE, NO, E, O, N et S présentées précédemment.



418. *Températures simulées dans les directions SE et NO de l'appartement*



419. *Températures simulées dans les directions SO et NE de l'appartement*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Annexe 17. Photos complémentaires de l'investigation sur l'incendie d'un appartement

Les photos 421 à 424 complètent celles qui sont disposées précédemment. Elles ont toutes été prises dans la pièce principale du studio de l'appartement sinistré. Plusieurs points de comparaison sont visibles sur chacune d'entre-elles.

420. *Luminaire à cinq ampoules situé à proximité du lit*

421. *Éléments retrouvés entre le mur et l'arrière de la table de nuit accolée au lit*

422. *Téléviseur fortement détruit placé sur la table de nuit accolée au lit*

423. *Balais en métal et en matières plastiques partiellement fondus*

424. *Fils électriques intacts entre la tête de lit et le mur*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Index des tableaux, figures et photographies

1. *Schéma du processus d'inflammation pilotée (adapté de [DRYSDALE 1999a])* 6
2. *Schéma du processus d'auto-inflammation (adapté de [DRYSDALE 1999a])* 6
3. *Illustration de l'auto-inflammation d'une commode lors du développement d'un incendie dont la cause est l'inflammation d'un sapin - Image du NIST* 7
4. *Principaux processus physiques et chimiques ayant lieu lors de l'inflammation d'un solide par une source de chaleur rayonnante [BABRAUSKAS 2003]* 8
5. *Propriétés thermiques de quelques matériaux communs (adapté de [DRYSDALE 1999a])* 9
6. *Changements physiques et chimiques se produisant lors de la décomposition thermique [BEYLER 2002]* 11
7. *Représentation schématique d'une combustion lente stationnaire le long d'un cylindre horizontal de cellulose (adapté de [MOUSSA 1977])* 15
8. *Vue de l'emplacement du lit à l'origine du sinistre* 16
9. *Déformation d'une fenêtre suite principalement à l'action des gaz chauds* 16
10. *Dépôt sur toutes les surfaces des imbrûlés de la combustion du matelas* 16
11. *Diagramme de limite d'inflammabilité en fonction de la concentration en combustible et de la température [LASSUS 2009]* 18
12. *Schéma de la combustion d'un liquide [LASSUS 2009]* 18
13. *Représentation schématique de la zone de réaction* 18
14. *Représentation des trois régimes du panache thermique de McCaffrey* 19
15. *Définition d'une hauteur de flamme moyenne en utilisant l'intermittence [HESKESTAD 2002]* 19
16. *Représentation schématique de l'écoulement dans le panache thermique [HESKESTAD 2002]* 20
17. *Écoulement idéalisé de jet sous plafond [KARLSSON 2000]* 22
18. *Effet du confinement sur la vitesse de combustion d'une plaque de PMMA [FRIEDMAN 1975]* 24
19. *Débit calorifique illustrant les phases d'un feu en milieu confiné-ventilé [LASSUS 2009]* 26
20. *Températures mesurées lors des deux essais à 40 et 240 cm du sol. (FO = flashover ; NFO = pas de flashover)* 27
21. *Vue de la chambre après l'essai pour lequel l'embrasement généralisé n'est pas atteint* 27
22. *Vue de la chambre après l'essai pour lequel l'embrasement généralisé est atteint* 27
23. *Principales caractéristiques du code FDS* 31
24. *Phases de modélisation et de simulation [SCHLESINGER 2000]* 32
25. *Décomposition multiblocs du système complexe pour l'objectif de validation [AIAA 1998]* 32
26. *Géométrie de la maison utilisée dans [BOUNAGUI 2003]* 34
27. *Températures dans le panache pour 4 tailles de mailles sur l'expérience simulée par Friday et confrontation aux valeurs expérimentales [FRIDAY et AL 2001]* 36
28. *Vue de dessus de la chambre d'hôtel fictive* 37
29. *Vue d'ensemble de la chambre d'hôtel fictive* 37
30. *Caractéristiques des maillages de la chambre d'hôtel* 37
31. *Propagation du feu pour les huit simulations de la chambre d'hôtel* 38
32. *Évolutions temporelles du débit calorifique pour les cas Chambre 41 (famille B), 7 (famille A) et 10 (famille C)* 39
33. *Évolutions temporelles du débit calorifique pour les cas de la famille B* 40
34. *Taille de maille de chacun des cas et famille à laquelle ils appartiennent.* 40
35. *Vitesses horizontales perpendiculaires au plan du chambranle de la porte séparant la chambre du couloir pour le cas Chambre 41 (famille B)* 41
36. *Energie totale dégagée en fonction de la taille de maille* 42
37. *Température moyenne entre 0 et 1000 s en fonction de la taille de maille aux quatre points de mesure* 42
38. *Température au-dessus du lit pour la famille C* 43
39. *Température au-dessus de l'armoire pour la famille C* 43
40. *Température au-dessus du fauteuil pour la famille C* 44
41. *Température dans le couloir pour la famille C* 44
42. *Temps de calcul pour toutes les configurations de la chambre d'hôtel* 45
43. *Débit calorifique surfacique imposé au brûleur pendant les 100 premières secondes de la simulation pour les cas brûleur 1 à 8 et pour les 400 premières secondes pour brûleur 0* 46
44. *Débit calorifique surfacique imposé au cas brûleur 0* 46
45. *Nom, coordonnées spatiales et visualisation des points de mesure disposés dans la chambre d'hôtel* 47

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

46. Énergie dégagée et état de la propagation des flammes au mobilier 47
47. Débits calorifiques des neuf cas simulés 48
48. Débits calorifiques recalés des six cas ayant une propagation 48
49. Températures près de la fenêtre 49
50. Températures recalées près de la fenêtre 49
51. Températures dans la chambre 49
52. Températures recalées dans la chambre 50
53. Températures dans le couloir 50
54. Températures recalées dans le couloir 50
55. Exemple d'évolution temporelle de débit calorifique 51
56. Caractéristiques des maillages des cas Chambre 1 et Chambre 2 52
57. Conditions de température et fraction volumique limite d'oxygène pour déterminer l'occurrence de la combustion 53
58. Relation d'état pour le propane 53
59. Débit calorifique en fonction du temps pour les simulations porte fermée – Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et de 5 cm pour Chambre 2 54
60. Débit calorifique pour les simulations en configuration porte ouverte et fermé - Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et 41 et de 5 cm pour Chambre 2 et 6 55
61. Température au-dessus du lit en fonction du temps pour les simulations porte fermée – Cellules de 10 cm pour Chambre 1 et de 5 cm pour Chambre 2 55
62. Débit calorifique par unité de volume supérieur à 100 kW.m^{-3} - Hauteur maximale de flamme avec cinq simulations utilisant des tailles de maille différentes 57
63. Corrélations pour le calcul des hauteurs moyennes de flamme en fonction du nombre de Froude [HESKESTAD 2002] 58
64. Vue de dessus du dispositif expérimental [WALTON 1993] 63
65. Températures mesurées expérimentalement sur l'axe du foyer [WALTON 1993] 63
66. Vue d'ensemble du cas simulé avec FDS4 64
67. Caractéristiques des maillages utilisés dans les simulations FDS4 64
68. Température moyennée sur 60 s sur l'axe du foyer pour tous les cas simulés 64
69. Intermittence à 520°C sur l'axe du foyer pour tous les cas simulés 65
70. Hauteurs moyennes de flamme pour les simulations FDS de l'expérience 66
71. Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^* 66
72. Représentation schématique d'un foyer et de son panache 68
73. Valeur des constantes des équations du panache de McCaffrey 69
74. Emplacement des points de mesure de température dans le panache thermique [NUREG-1824 2007] 70
75. Températures mesurées expérimentalement et modélisées avec FDS dans le panache pour trois des essais de l'expérimentation ICFMP BE #2 [NUREG-1824 2007] 70
76. Températures modélisées avec FDS et mesurées expérimentalement dans le panache pour les 3 essais de l'expérimentation FM/SNL [NUREG-1824 2007] 71
77. Comparaison des températures mesurées dans le panache avec les températures calculées avec FDS [NUREG-1824 2007] 71
78. Températures expérimentales et calculées par FDS dans le panache pour le test 5 du cas FM/SNL [NUREG-1824 2007] 72
79. Températures dans le panache pour la simulation $R^* = 0,05$, l'expérience et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad 73
80. Températures dans le panache pour la simulation $R^* = 0,05$, l'expérience et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad, une fois le régime établi 73
81. Influence de la taille de maille sur les températures dans le panache sur l'axe du foyer en régime établi 74
82. Températures dans le panache sur l'axe du foyer en régime établi 74
83. Température sur l'axe du foyer pour les cas utilisant des mailles de 10 cm ($R^*=0,06$), 20 cm ($R^*=0,12$) et 30 cm ($R^*=0,18$) 75
84. Température à 5,1 m en fonction du R^* en régime établi 76
85. Vitesses moyennées dans le panache pour la simulation $R^* = 0,05$ et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad en régime établi 76
86. Vitesses moyennées dans le panache pour la simulation $R^* = 0,05$ et les corrélations de McCaffrey et d'Heskestad en régime établi 76
87. Vitesses moyennées dans le panache à la verticale du foyer en régime établi 77

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

88. Vitesses moyennées dans le panache à la verticale du foyer en régime établi _____ 77
89. Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^* _____ 77
90. Représentation schématique du foyer débitant sous un plafond _____ 79
91. Essai FM/SNL : position des points de mesure utilisés pour la confrontation avec l'expérience des valeurs calculées par FDS [NUREG-1824 2007] _____ 80
92. Position du point de mesure utilisé pour la confrontation avec l'expérience dans le calcul FDS du cas ICFMP BE#3 [NUREG-1824 2007] _____ 80
93. Températures calculées avec FDS dans le jet sous plafond en fonction des températures mesurées [NUREG-1824 2007] _____ 80
94. Températures mesurées lors de l'essai en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m [WALTON 1993] _____ 82
95. Moyenne des températures entre 20 et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour l'expérience, la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm _____ 82
96. Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 30 cm (R^*=0,18) _____ 82
97. Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 20 cm (R^*=0,12) _____ 83
98. Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 15 cm (R^*=0,09) _____ 83
99. Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 10 cm (R^*=0,06) _____ 83
100. Température simulée en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0, 2,7, 5,5, 8,2 et 11,0 m pour le calcul utilisant des cellules de 8 cm (R^*=0,05) _____ 84
101. Moyenne des températures simulée entre 20 et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour l'expérience, la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm _____ 84
102. Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 30 cm (R^*=0,18) _____ 85
103. Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 20 cm (R^*=0,12) _____ 85
104. Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 15 cm (R^*=0,09) _____ 86
105. Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 10 cm (R^*=0,06) _____ 86
106. Vitesse en fonction du temps aux abscisses horizontales de 0 m, 2.7 m, 5.5 m, 8,2 m et 11.0 m pour le calcul utilisant des cellules de 8 cm (R^*=0,05) _____ 86
107. Moyenne des vitesses entre 20 s et 60 s en fonction de la distance radiale au centre du foyer pour la corrélation d'Alpert, et les simulations pour des tailles de cellules de 8 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 30 cm ____ 87
108. Temps de calcul en fonction de la taille de maille et du R^* _____ 87
109. Récapitulatif des caractéristiques géométriques et physiques des essais étudiés issus de la bibliographie 89
110. Maillage du cas de référence _____ 90
111. Vue de haut et vue générale du maillage du cas horizontal _____ 91
112. Vue de haut et vue générale du maillage du cas horizontal 2 _____ 91
113. Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs1 _____ 92
114. Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs2 _____ 92
115. Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs3 _____ 92
116. Vue de haut et vue générale du maillage du cas multiblocs4 _____ 93
117. Débit calorifique calculé pour les différentes stratégies de raffinement _____ 94
118. Énergie totale dégagée pour les différentes stratégies de raffinement. Chambre 9 correspond à la référence _____ 94
119. Température au-dessus du lit pour la configuration horizontale _____ 95
120. Température au-dessus du fauteuil pour la configuration horizontale _____ 95
121. Température au-dessus de l'armoire pour la configuration horizontale _____ 95
122. Température dans le couloir pour la configuration horizontale _____ 96
123. Température moyenne entre 200 et 500 s _____ 96

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

124. Température au-dessus du lit pour la configuration multiblocs _____ *97*
125. Température au-dessus du fauteuil pour la configuration multiblocs _____ *97*
126. Température au -dessus de l'armoire pour la configuration multiblocs _____ *97*
127. Température dans le couloir pour la configuration multiblocs _____ *98*
128. Température moyenne entre 200 et 500 s _____ *98*
129. Discontinuité du champ de températures dans une coupe horizontale à 90 cm du sol pour le cas multiblocs1 _____ *99*
130. Nombre de mailles et temps de calcul pour les différentes stratégies de raffinement du maillage _____ *99*
131. Vues latérale et de face du maillage du cas de référence _____ *100*
132. Vue du maillage du cas multiblocs conforme, sans chevauchement _____ *100*
133. Vue du maillage du cas multiblocs avec chevauchement _____ *101*
134. Vue du cas multiblocs utilisant un maillage conforme sans chevauchement avec une taille de cellule différente dans le sens de l'écoulement pour les deux blocs _____ *101*
135. Vue du cas multiblocs utilisant un maillage avec chevauchement avec une taille de cellule différente pour les deux blocs dans le sens de l'écoulement _____ *101*
136. Temps de calcul et nombre de cellules _____ *102*
137. Énergie totale libérée dans les simulations _____ *102*
138. Température dans un plan de coupe à 400 s pour le cas de référence et multiblocs avec et sans chevauchement _____ *103*
139. Pression dans un plan de coupe à 400 s pour le cas sans chevauchement avec des maillages différents 103
140. Vue du maillage du cas de référence _____ *104*
141. Caractéristiques du maillage du bloc 2 pour les cas non-conformes et le cas de référence _____ *104*
142. Vue du maillage du cas rapport 2 _____ *105*
143. Vue du maillage du cas rapport 3 _____ *105*
144. Vue du maillage du cas rapport 4 _____ *105*
145. Emplacement des points de mesure _____ *105*
146. Coordonnées des points de mesure _____ *105*
147. Temps de calcul et nombre de cellules _____ *105*
148. Énergie totale libérée _____ *106*
149. Température moyenne sur 350 s aux points de mesure CJ35, CJ45 et CJ55 _____ *106*
150. Température au point CJ35 pour les maillages non-conformes _____ *107*
151. Température au point CJ45 pour les maillages non-conformes _____ *107*
152. Température au point CJ55 pour les maillages non-conformes _____ *107*
153. Champ de température à 250s pour le cas rapport2 _____ *108*
154. Champ de température à 220s pour le cas rapport3 _____ *108*
155. Champ de température à 100s pour le cas rapport4 _____ *108*
156. Champ de pression à 200s pour le cas rapport2 _____ *108*
157. Champ de pression à 300s pour le cas rapport3 _____ *108*
158. Champ de pression à 170s pour le cas rapport4 _____ *108*
159. Champ de vitesse verticale à 250s pour le cas rapport2 _____ *108*
160. Champ de vitesse verticale à 330s pour le cas rapport3 _____ *108*
161. Champ de vitesse verticale à 100s pour le cas rapport4 _____ *108*
162. Sens du déplacement de la frontière _____ *109*
163. Rapport 2 _____ *109*
164. Frontière 2 _____ *109*
165. Frontière 3 _____ *109*
166. Frontière 4 _____ *109*
167. Position du brûleur par rapport à la frontière et aux parois du parallélépipède _____ *110*
168. Emplacement du point de mesure supplémentaire (cercle vert sur la figure) _____ *110*
169. Température au point de mesure supplémentaire _____ *110*
170. Pression au point de mesure supplémentaire _____ *111*
171. Fraction de mélange au point de mesure supplémentaire _____ *111*
172. Vitesse au point de mesure supplémentaire _____ *111*
173. Température moyenne, pression moyenne, fraction de mélange moyenne et vitesse moyenne au point de mesure supplémentaire _____ *112*
174. Température au point de mesure CJ35 _____ *112*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

175. Pression au point de mesure CJ35 112
176. Température moyenne, pression moyenne au point de mesure CJ35 113
177. Températures et vecteurs vitesses à 116 s dans le plan X=1 m pour le cas de référence 113
178. Température pour le cas de référence dans un plan horizontal à 1,5 m du sol 114
179. Température pour le cas de frontière 2 rapport 4 dans un plan horizontal à 1,5 m du sol 114
180. Vue générale et latérale du cube obstrué 115
181. Maillage de l'ouverture pour le cas de référence 115
182. Maillage de l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 2 115
183. Maillage de l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 4 115
184. Débit calorifique pour les cas obstrué et le cas de référence 115
185. Débit massique à travers l'ouverture pour les cas référence, frontière 2 rapport 2 et frontière 2 rapport 4 116
186. Champ de vitesses perpendiculaires à l'ouverture pour le cas de référence 117
187. Champ de vitesses perpendiculaires à l'ouverture pour le cas frontière 2 rapport 4 117
188. Vue extérieure depuis une cour intérieure d'une façade du bâtiment sinistré 121
189. Conditions d'embrasement généralisé non atteintes 122
190. Conditions d'embrasement généralisé atteintes 122
191. Côté gauche du salon 123
192. Centre du salon 123
193. Côté droit du salon 123
194. Démarche d'évaluation, utilisant des points de comparaison, d'un scénario d'incendie simulé numériquement 131
195. Point de comparaison 'dépôt de suies avec stratification des fumées' 132
196. Illustration de la dégradation de suies déposées sur les parois 132
197. Temps d'exposition minimal de suies pour obtenir leur dégradation à une température donnée [CNPP2007] 132
198. Bris mécanique 133
199. Bris thermique 133
200. Changements de couleur du béton en fonction d'un changement de température [SCHROEDER et AL 2003] 135
201. Température d'auto-inflammation des bois [BABRAUSKAS 2003C] 137
202. Tissus d'ameublement soumis au rayonnement des gaz chauds 138
203. Flux incident minimum pour obtenir l'auto-inflammation non pilotée des matériaux [MOWRER 2003] 139
204. Temps maximum d'exposition pour observer l'auto-inflammation non pilotée des matériaux aux flux incidents indiqués dans le tableau 203 139
205. Température de fusion (°C) des métaux les plus courants 140
206. Chaîne hi-fi, téléviseur et lampe ayant subi les effets d'un incendie. 140
207. Prise de courant ayant subi les effets d'un incendie 141
208. Températures de transition vitreuse et de fusion des thermoplastiques (°C) et leurs applications diverses 142
209. Dégradation d'un bloc autonome d'éclairage de sécurité pris dans un incendie 143
210. Valeurs de température d'inflammation mesurées au four Setchkin [BABRAUSKAS 2003] 143
211. Interrupteur exposé à un flux radiatif incident de 36 $kW.m^{-2}$ au cône calorimètre 147
212. Schéma du dispositif expérimental 148
213. Températures mesurées dans l'enceinte lors d'un essai sur un interrupteur 148
214. Enceinte expérimentale isolée, disposée sous la résistance chauffante du cône calorimètre 148
215. Températures caractéristiques du polycarbonate et de l'ABS 148
216. Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les interrupteurs 150
217. Plan du 3ème étage de l'immeuble 151
218. Volume expérimental recréé et charge combustible disposée 151
219. Disposition des prises et des interrupteurs dans le volume recréé 152
220. Disposition des prises de courant, interrupteurs et bloc autonome de sécurité sur le palier de l'appartement 152
221. Synthèse des essais de la rue Boinod 153
222. Vue de l'immeuble 155
223. Potentiel calorifique 155
224. Plan d'étage : cage d'escalier et appartement test 155

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

225. Vue Smokeview de la géométrie des lieux, obtenue avec FDS 155
226. Vue Smokeview après bris des vitrages de la simulation de l'essai 156
227. Débit calorifique en fonction du temps calculé par FDS 156
228. Température en fonction du temps pour la simulation numérique en amont de l'expérience 158
229. Emplacement sur le plan, des éléments à exposer 158
230. Température à l'emplacement des éléments à exposer 158
231. Synthèse des dégradations remarquables sur les éléments exposés lors de l'ensemble des essais 162
232. Catalogue des déformations d'un élément en fonction de la sollicitation thermique <temps - température> 165
233. Cumul des températures en une sortie FDS 165
234. Exemple d'exposition d'un élément 166
235. Traitement graphique de l'exposition FDS d'un élément en utilisant des données catalogue 166
236. Débit calorifique obtenu par la simulation de la combustion d'un matelas comparé aux courbes en αt^2 de la NFPA et à la courbe triangulaire [BABRAUSKAS 1985] 170
237. Vue extérieure du caisson de transport maritime utilisé pour la combustion d'un matelas 172
238. Emplacement et dimensions du matelas dans le caisson de transport maritime 172
239. Vue de dessus de la répartition des thermocouples dans le matelas 172
240. Vues du matelas 90 et 150 secondes après l'allumage 173
241. Détails de la propagation des flammes 173
242. Contours de la zone de pyrolyse d'une mousse polyuréthane allumée en son centre en fonction du temps [BABRAUSKAS 1985] 173
243. Températures mesurées dans la direction Est (E) 174
244. Températures mesurées dans la direction Nord (N) 174
245. Vitesse moyenne de propagation du front de flamme obtenues expérimentalement dans cinq directions et à quatre distances du centre du matelas 175
246. Évolution en fonction du temps de la position du front de flamme pour l'expérience, pour la corrélation issue de l'expérience et pour la loi établie à partir des mesures 177
247. Températures moyennées sur les trois thermocouples placés à 1 mm au-dessus de l'échantillon lors de quatre essais au cône calorimètre à un flux thermique incident de 45 kW/m^2 178
248. Débit calorifique par unité de surface mesuré avec le cône calorimètre pour trois échantillons 179
249. Caractéristiques du polyuréthane utilisées dans la simulation 179
250. Vue extérieure du maillage de caisson de transport maritime 180
251. Vitesses de propagation du front de flamme obtenues avec FDS pour une température d'inflammation de 305°C 181
252. Vitesses de propagation du front de flamme obtenues avec FDS pour une température d'inflammation de 280°C 181
253. Températures dans la direction E pour les simulations utilisant des températures d'inflammation de 280 et 305°C 182
254. Températures dans la direction N pour les simulations utilisant des températures d'inflammation de 280 et 305°C 182
255. Plan du niveau où se tient l'expérience 183
256. Charge calorifique disposée dans la chambre foyer 183
257. Vue de dessus de la disposition des thermocouples dans le matelas (en rouge : la zone d'allumage, en gris : le matelas) 184
258. Photo du foyer 110 s après l'allumage : les flammes se propagent au coussin 184
259. Concentration en dioxygène, monoxyde et dioxyde de carbone à 1,5 m dans la pièce foyer 185
260. Vitesses moyennes expérimentales de propagation du front de flamme (cm/s) mesurées dans huit directions et à deux distances du centre du matelas 185
261. Températures mesurées dans les directions SE et NO 186
262. Températures mesurées dans les directions E et O 186
263. Vue de la modélisation de l'expérience dans l'appartement 187
264. Températures expérimentale et simulée dans la direction SE à 30 cm du centre du matelas 187
265. Vitesse moyenne de propagation du front de flamme dans huit directions 187
266. Températures simulées (°C) dans les directions SE et NO de l'appartement 188
267. Températures simulées (°C) dans les directions E et O de l'appartement 188
268. Températures simulées (°C) dans les directions N et S de l'appartement 188
269. Débit calorifique (kW) dégagé dans le domaine de calcul 189

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

270. Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 130 s dans le caisson de transport maritime 190
271. Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 190 s dans le caisson de transport maritime 190
272. Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 150 s dans l'appartement 190
273. Vecteur vitesse et température 5 cm au-dessus du matelas à 190 s dans l'appartement 190
274. Isosurface de fraction de mélange à la stœchiométrie à 190 s 190
275. Isosurface de fraction de mélange à la stœchiométrie à 260 s 190
276. Températures à 30 cm du centre du matelas dans la direction E pour l'expérience et la simulation du caisson de transport maritime et de l'appartement 191
277. Températures mesurées à l'entrée de la chambre 192
278. Températures mesurées au fond de la chambre 192
279. Températures simulées à l'entrée de la chambre 193
280. Températures simulées au fond de la chambre 193
281. Températures mesurées dans le couloir de l'appartement 193
282. 193
283. 194
284. Températures mesurées dans la circulation désenfumée 194
285. 194
286. Températures simulées dans le couloir de l'appartement 194
287. 194
288. 194
289. Températures simulées dans la circulation désenfumée 194
290. 194
291. Vue extérieure du bâtiment et de l'appartement sinistré au rez-de-chaussée haut 196
292. Plan en 2D des lieux touchés par le sinistre (parties privée et commune) 197
293. Plan en 3D des lieux touchés par le sinistre (parties privée et commune) 197
294. Chronologie supposée de l'incendie 197
295. Direction des photographies indiquée par l'œil – Le chiffre 1 sur le plan correspond à la photo 296, 2 à 297, 3 à 298, 4 à 299, 5 à 300, 6 à 301, 7 à 302 et 8 à 303 198
296. Vue d'ensemble de la cuisine de l'appartement voisin de l'appartement sinistré 199
297. Vue d'ensemble de la cuisine de l'appartement sinistré 199
298. Vue de la tête de lit et du mur contre lequel il était disposé 200
299. Vue des mobiliers disposés entre le lit et la cuisine 200
300. Vue de la salle de bain depuis la pièce principale de l'appartement 201
301. Vue de la salle de bain 201
302. Vue de l'entrée de l'appartement depuis la circulation commune 202
303. Vue de la circulation commune 203
304. Échantillon de points de comparaison envisageables 203
305. Vue smokeview de l'emplacement de l'origine supposée de l'incendie 204
306. Dimensions des locaux et des principaux éléments mobiliers 205
307. Maillage utilisé pour les simulations des scénarios départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant et après la chute d'un rideau enflammé 206
308. Maillage utilisé pour la simulation du départ de feu dans la cuisine 206
309. Caractéristiques matériaux du bois et le mousse d'ameublement 207
310. Emplacement de la source d'allumage dans la simulation 207
311. Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage 207
312. Emplacement de la source d'allumage dans la simulation 208
313. Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage 208
314. Propagation des flammes sur la surface de l'assise d'un fauteuil avec quatre revêtements de coussin (tissus à base d'alcène de masse surfacique 360 ou 560 g/m^2, de coton de masse surfacique 110 ou 650 g/m^2 et aucun revêtement) pour trois types de mousse (polyuréthane ordinaire, polyuréthane ignifugé et néoprène) [BABRAUSKAS 1985] 209
315. Emplacement de la source d'allumage dans la simulation 209
316. Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage 209
317. Emplacement de la source d'allumage dans la simulation 210
318. Débit calorifique surfacique imposé à la source d'allumage 210

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

319. Débit calorifique dans le domaine de calcul pour les quatre scénarios (les traits verticaux en pointillés marquent l'ouverture de la porte de l'appartement) 211
320. Bloc autonome d'éclaire de sécurité disposé dans la circulation horizontale commune 212
321. Températures simulées à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 212
322. Puzzle disposé dans la circulation horizontale commune à la sortie de l'appartement sinistré 213
323. Température à l'emplacement du puzzle pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 213
324. Température à 400 s sur la verticale du centre du puzzle pour le scénario de départ de feu sur le lit avec accélérant 213
325. Support du miroir dans la salle de bain de l'appartement sinistré 214
326. Température à l'emplacement du support du miroir pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 214
327. Interphone et interrupteurs (lumières et stores) dans la pièce principale de l'appartement sinistré 215
328. Température à l'emplacement de l'interphone pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 215
329. Prise de courant et interrupteur dans la pièce principale de l'appartement sinistré à la sortie de la salle de bain216
330. Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 216
331. Interrupteur dans la pièce principale de l'appartement sinistré 217
332. Température à l'emplacement de l'interrupteur pour les scénarios de départ de feu sur le lit avec ou sans accélérant 217
333. Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu sur le lit - Températures moyennées entre 200 et 800 s 218
334. Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu sur le lit avec accélérant – Températures moyennées entre 200 et 800 s 218
335. Emplacement des points de mesure dans le couloir 218
336. Température à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 220
337. Température à l'emplacement du puzzle pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 220
338. Température à l'emplacement du support du miroir pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 220
339. Température à l'emplacement de l'interphone pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 221
340. Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant à la sortie de la salle de bain pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 221
341. Température à l'emplacement de l'interrupteur près du coin cuisine pour le scénario de départ de feu dans la cuisine 221
342. Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de dans la cuisine à 500 s 222
343. Température à l'emplacement du bloc autonome d'éclairage de sécurité dans la circulation horizontale commune pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 223
344. Température à l'emplacement du puzzle pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 224
345. Température à l'emplacement du support du miroir pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 224
346. Température à l'emplacement de l'interphone pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 224
347. Température à l'emplacement de l'interrupteur et de la prise de courant à la sortie de la salle de bain pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 225
348. Température à l'emplacement de l'interrupteur près du coin cuisine pour le scénario de départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 225
349. Profils de température au centre du couloir aux emplacements indiqués sur le plan 335 pour le scénario de départ de feu après la chute du rideau - Températures moyennées entre 400 et 1 000 s 226
350. Température maximale de la paroi dans le coin inférieur gauche pour le cas simulant un départ de feu sur le lit 227
351. Température maximale de la paroi dans le coin inférieur gauche pour le cas simulant un départ de feu après la chute d'un rideau enflammé 227

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

352. Mur entre le lit et la paroi extérieure _____ 227
353. Représentation schématique d'un dispositif LIFT _____ 264
354. Schéma du cône calorimètre [BABRAUSKAS 2003A] _____ 265
355. Représentation schématique en coupe transversale de la résistance chauffante du cône calorimètre [BABRAUSKAS 2003A] _____ 266
356. Four tubulaire chauffant un échantillon à 603°C _____ 268
357. Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les interrupteurs _____ 270
358. Résultats expérimentaux des essais conduits en laboratoire sur les prises de courant _____ 272
359. Températures au cinquième et dernier étage de la cage d'escalier _____ 273
360. Températures à l'intérieur et sur la verrine des blocs autonomes d'éclairage de sécurité disposés dans la chambre et le couloir _____ 273
361. Températures dans la chambre _____ 273
362. Températures au niveau des interrupteurs disposés dans la chambre _____ 273
363. Températures au niveau des prises de courant disposées dans la chambre _____ 273
364. Températures au niveau des prises de courant et de l'interrupteur disposés dans le couloir _____ 273
365. Photos après l'essai des interrupteurs disposés dans la chambre correspondant de gauche à droite aux matériels placés respectivement du plus haut au plus bas sur le mur _____ 274
366. Photos après l'essai des prises de courant disposées dans la chambre correspondant de gauche à droite aux matériels placés respectivement du plus haut au plus bas sur le mur _____ 274
367. Ensemble informatique placé dans la chambre avant et après l'expérience _____ 274
368. Températures dans la chambre opposée à la chambre foyer _____ 276
369. Températures dans la chambre adjacente à la chambre contenant le foyer _____ 277
370. Températures dans la chambre foyer _____ 278
371. Températures dans le couloir de l'appartement (1) _____ 279
372. Températures dans le couloir de l'appartement (2) _____ 280
373. Températures dans le couloir de la cage d'escalier (1) _____ 281
374. Températures dans le couloir de la cage d'escalier (2) _____ 282
375. Températures dans le couloir de la cage d'escalier, au pied de l'escalier _____ 283
376. Vue de la simulation de l'essai B après bris des vitrages _____ 284
377. Débit calorifique de la simulation de l'essai B _____ 284
378. Températures par simulation et expérience à l'entrée de la chambre _____ 285
379. Températures par simulation et expérience dans le fond de la chambre _____ 285
380. Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'appartement _____ 286
381. Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'escalier _____ 286
382. Débit calorifique des simulations de l'essai B (bris des fenêtres à un temps ou à une température imposés) _____ 287
383. Températures par simulation et expérience à l'entrée de la chambre _____ 288
384. Débit calorifique par unité de volume (280 $kW.m^{-3}$) _____ 289
385. Températures par simulation et expérience dans le fond de la chambre _____ 290
386. Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'appartement _____ 290
387. Températures par simulation et expérience dans le couloir de l'escalier _____ 290
388. Températures par simulation et expérience à l'emplacement des points de comparaison _____ 290
389. Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai A _____ 293
390. Températures à proximité des éléments d'usage courant _____ 294
391. Températures dans la circulation de l'escalier _____ 294
392. Cumul des températures à 2,2, 1,8, 1,4 et 1 m _____ 295
393. Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai B _____ 297
394. Températures à proximité des éléments d'usage courant _____ 298
395. Températures dans la le couloir de l'escalier _____ 298
396. Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m _____ 299
397. Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai C _____ 301
398. Températures à proximité des éléments d'usage courant _____ 301
399. Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m _____ 302
400. Présentation des dégradations sur les éléments exposés lors de l'essai F _____ 303
401. Températures à proximité des éléments d'usage courant _____ 304
402. Cumul des températures à 2.2, 1.8, 1.4 et 1 m _____ 304
403. Fragments du lampadaire halogène collectés sur les lieux de l'incendie _____ 305

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

404. Perlage trouvé sur un conducteur électrique au niveau de la fixation d'un des deux tubes supportant la vasque sur l'articulation métallique _____ *305*
405. Perlage trouvé sur un conducteur électrique au niveau de la fixation d'un des deux tubes supportant la vasque sur l'articulation métallique _____ *306*
406. Vasque fortement corrodée _____ *306*
407. Évolution, en fonction de la température, de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique du bois _____ *308*
408. Évolution, en fonction de la température, de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique des charbons du bois _____ *308*
409. Emplacement des points de mesure _____ *308*
410. Caractéristiques des flammes lors de la combustion de matières plastiques _____ *309*
411. Températures mesurées dans la direction Sud-est (SE) _____ *310*
412. Températures mesurées dans la direction Sud Sud-est (SSE) _____ *310*
413. Températures mesurées dans la direction Sud-est est (SEE) _____ *310*
414. Températures mesurées dans la direction Sud (S) _____ *310*
415. Températures mesurées dans la direction Ouest (O) _____ *310*
416. Températures mesurées sur l'axe N/S _____ *311*
417. Températures mesurées sur l'axe NO/SE _____ *311*
418. Températures simulées dans les directions SE et NO de l'appartement _____ *312*
419. Températures simulées dans les directions SO et NE de l'appartement _____ *312*
420. Luminaire à cinq ampoules situé à proximité du lit _____ *313*
421. Éléments retrouvés entre le mur et l'arrière de la table de nuit accolée au lit _____ *313*
422. Téléviseur fortement détruit placé sur la table de nuit accolée au lit _____ *313*
423. Balais en métal et en matières plastiques partiellement fondus _____ *313*
424. Fils électriques intacts entre la tête de lit et le mur _____ *313*

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

tel-00557898, version 1 - 20 Jan 2011

Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie

Résumé

Devant le besoin de nouveaux outils d'aide à l'investigation post-incendie, cette thèse se propose d'évaluer le recours à des modèles numériques pour apprécier un scénario proposé par un expert. Pour cela, les conditions d'utilisation de la version 4 de Fire Dynamics Simulator (FDS) ont été déterminées dans une optique de reconstitution de sinistres. Une méthode a ensuite été développée afin de confronter les résultats des simulations aux observations faites lors de l'investigation : cette méthode se base sur l'utilisation de multiples points de comparaison qui sont des effets thermiques ou mécaniques remarquables sur un matériau.
Les résultats obtenus ont ensuite été utilisés pour la simulation de deux cas réels. Le premier s'attache à comparer, à des simulations, des mesures de propagation de flammes à la surface d'un matelas dans deux configurations différentes. Cela est réalisé afin d'évaluer le modèle de combustion solide de FDS dans différentes conditions de ventilation. La seconde application est la reconstitution d'un incendie ayant fait une victime dans un appartement. Ce second cas a été choisi dans le but d'évaluer les méthodes de simulation et d'utilisation des points de comparaison établies dans les premiers chapitres.

Mots-clés

Investigation incendie, simulation numérique, CFD, combustion, feu de compartiment, point de comparaison

Use of numerical models to assess fire scenarios in investigation framework

Abstract

This work is intended to evaluate the use of numerical models to assess fire scenarios proposed by investigators. First chapter of this thesis is about theoretical fire phenomenon useful in the investigation frame. The second chapter is devoted to the validation of a CFD tool named Fire Dynamics Simulator (FDS) for fire reconstruction purposes. Guidance is developed in the third chapter in order to compare modelling results to degradations observed on fire scenes. It is explained how the accuracy of a scenario could be assessed using several comparison points, the thermal or mechanical effects on materials after a fire.
Results obtained in previous chapters are finally applied on two cases. The first one is the comparison of fire spread velocities measured on two different experiments with simulations. This study is carried out to test FDS combustion model under ventilated and underventilated conditions. The second case is the reconstruction of a fire which killed the occupant of an apartment, the purpose of this work being to apply modelling and investigation guidance to a real case.

Keywords

Fire investigation, fire numerical simulation, CFD, combustion, compartment fire, comparison point