



HAL
open science

Comportement au feu du matériau bois : auto-inflammation, dégradation et auto-extinction

Lucas Terrei

► To cite this version:

Lucas Terrei. Comportement au feu du matériau bois : auto-inflammation, dégradation et auto-extinction. Thermique [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0118 . tel-03011678

HAL Id: tel-03011678

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03011678>

Submitted on 18 Nov 2020

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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



SIMPPÉ



École doctorale n° 608 : Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'énergie (SIMPPÉ)

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

Mention "Énergie et mécanique"

Par Lucas TERREI

**Comportement au feu du matériau bois :
auto-inflammation, dégradation et
auto-extinction**

le 16 Octobre 2020

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Paul-Antoine SANTONI	Professeur, Université de Corse, SPE
	Sophie DUQUESNE	Professeur, Université de Lille, UMET
<i>Examineurs :</i>	Anne GANTEAUME	Directrice de recherche, INRAE, Aix-en-Provence
	José TORERO	Professor, University College London
	Eleni ASIMAKOPOULOU	Lecturer, University of Central Lancashire
<i>Directeur :</i>	Gilles PARENT	Professeur, Université de Lorraine, LEMTA
<i>Co-Directeur :</i>	Zoubir ACEM	Maître de conférences, Université de Lorraine, LEMTA
<i>Invité :</i>	Paul LARDET	Ingénieur de recherche, CSTB, Marne-la-Vallée

Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée - UMR 7563

Université de Lorraine

2 Avenue de la Forêt de Haye - BP90161 - 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France



Remerciements

Pour commencer, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse du LEMTA, Gilles Parent et Zoubir Acem, ainsi que mon encadrant du CSTB, Paul Lardet, pour leur implication quotidienne dans ces travaux, leur pédagogie et la confiance qu'ils ont pu m'accorder tout au long de la thèse. Je ne peux que vous remercier pour votre exemplarité autant sur le plan professionnel qu'humain. Vous êtes pour moi des modèles et je suis conscient de l'honneur d'avoir pu évoluer à vos côtés. Je souhaite à tout doctorant de s'épanouir dans de telles conditions.

Ma profonde gratitude va à Pascal Boulet, directeur du LEMTA et ancien chef de l'opération scientifique feux, pour sa confiance et pour m'avoir laissé l'opportunité de travailler avec l'équipe feux. Merci pour l'accueil ainsi que la bonne humeur quotidienne au sein du laboratoire.

Merci à Paul-Antoine Santoni et Sophie Duquesne d'avoir accepté de rapporter cette thèse avec tant de remarques constructives. Mes plus chaleureux remerciements vont à Eleni Asimakopoulou et José Torero pour avoir examiné mes travaux. Je tiens également à remercier Anne Ganteaume, présidente du jury, pour son implication et le temps consacré tant lors de cette soutenance de thèse que lorsque j'ai effectué mon stage de master, il y a plus de trois ans maintenant.

Un grand merci aux membres du CSTB et du LEMTA pour les bons moments passés à leurs côtés ainsi que pour leur aide quotidienne. Je pense notamment aux membres de l'équipe feux du LEMTA, Anthony Collin, Rabah Mehaddi, Thomas Villemain, Bouaza Lafdal, Racha Djebbar et Solange Ferriere tout comme les anciens, Samia Haouari Harrak, Alexis Marchand et Giacomo Erez. Merci tout particulièrement à Anthony Collin pour ses conseils, les nombreuses discussions et sa confiance accordée tout au long de ces trois ans. Également je remercie les équipes techniques du LEMTA, Jean-Yves Morel, Matthieu Weber, Hadrien Chaynes, Simon Becker, Jamal Ouhajjou, Jérémy Bianchin, Franck Demeurie, Eric Blaise et surtout Sébastien Lejeune avec qui j'ai passé de bons moments que ce soit lors de l'usinage du bois que pour les soudures des thermocouples. Je remercie également Valérie Reichhart, Laura Colle et Ludovic Buhler pour leur gentillesse et leur capacité à solutionner tous nos problèmes. Vous êtes tous toujours de bons conseils, disponibles et vous avez tous contribué au bon déroulement de la thèse. Enfin, merci à toutes les personnes du CSTB, Véronique Marchetti, Nicolas Pinoteau, Mara Tan, Romain Mege, Quentin Jullien, El Mehdi Koutaiba, Stéphane Hameury, Omar Almansouri, Maud Fusibet, Martial Bonhomme, l'équipe d'essai feux, qui ont participé au bon déroulement

de mon séjour au CSTB.

Encore merci à Yves Jannot et Yann Rogeau pour avoir accepté de faire parti de mon comité de suivi de thèse et pour les discussions scientifiques. Je me dois également de remercier Olivier Vauquelin et Fabien Candelier, professeurs à l'université de Marseille, sans qui je ne serais certainement pas là aujourd'hui.

D'un point de vue plus personnel, j'ai une chance extraordinaire d'être entouré de ma famille et des amis sur qui je peux compter à tout moment. Je ne vais malheureusement pas citer tout le monde mais je me dois de remercier toute ma famille et plus particulièrement mes grands-parents, Evelyne et Denis, ainsi que ma marraine, Myriam, pour tout et depuis toutes ces années. J'ai une pensée particulière pour mes parents, Bruno et Virginie, qui m'ont toujours soutenu, conseillé et appris à vivre avec une ligne de conduite ainsi que pour mes deux petits frères, Nino et Maximilien, avec qui j'ai une complicité et une relation très fraternelle malgré la distance. Vous êtes un pilier de ma vie et où que j'aille, vous êtes ma force.

J'adresse mes plus grands remerciements à mes amis. Je me rends compte aujourd'hui que vous êtes si nombreux que je ne sais pas par qui commencer. J'ai longtemps hésité à vous citer selon votre rang : du préféré à moins aimé, du plus débile au plus intelligent, du plus riche au plus pauvre, du plus alcoolique au buveur de thé... Mais il y aurait toujours des déçus. Je vais donc commencer par les premiers, ceux que j'ai rencontré il y a plus de 10 ans maintenant lorsque je vivais à Calais. Je pense particulièrement à vous Sullivan, Laurine, Duch, Louis, Tonton, Cyril. Je suis toujours autant comblé de vous revoir à chaque fois que je remonte et mes souvenirs d'enfance avec chacun d'entre vous me rendent toujours aussi heureux. Mes pensées viennent ensuite aux nordistes qui ont, comme moi déserté, Bruno, Julie et Audrey avec qui les relations amicales restent inchangées même si nous vivons aux quatre coins de la France. Je ne peux pas oublier tous les animaux de Marseille : Mehdi, Boris, Marion, Kesh, Vincent, Renato et Laetitia. J'ai l'impression de vous connaître depuis toujours tellement nos relations sont singulières. Je dois avouer que mon départ de Marseille pour Nancy a été difficile moralement mais j'ai eu l'occasion de rencontrer des collègues de travail et des personnes extraordinaires qui sont devenus des amis. Je pense à Julian, Anas, Giacomo, François, Bere et surtout à Mehdi et Sabah, devenus deux amis très proches. Sans ce départ pour Nancy, il y a trois ans, il n'y aurait pas eu de passage sur Paris qui a une nouvelle fois engendré des rencontres inédites où j'ai eu le privilège de faire partie d'une colloque familiale et bienveillante. Je vous remercie donc, ma famille parisienne, Renato et Lola, pour cette année de vie en votre compagnie riche en déconnes, sport, clopes et vin rouge. Merci également à la bande parisienne, Giacomo (encore toi ?), Tom, Pauline, Greg, Caro pour tous ces bons moments à vos côtés. Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans parler de toi, Laetitia. Tu es présente depuis maintenant quelques mois, tu as supporté une rédaction de manuscrit pendant un confinement. Tu me rends meilleur chaque jour et je n'ai aucun doute que ce n'est que le début d'une longue aventure.

Vous êtes tous de Calais, Marseille, Nancy, Paris ma famille et je me rends compte à quel point j'ai la chance de tous vous avoir.

Table des matières

Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1
1 État de l’art sur l’inflammation, la dégradation et l’extinction du bois	9
1.1 Présentation du matériau bois	10
1.2 Inflammation du bois	12
1.3 Dégradation du bois	22
1.4 Extinction du bois	32
1.5 Expériences sans inflammation	35
1.6 Le changement d’échelle	37
1.7 Récapitulatif et objectifs de la thèse	39
2 Matériel et Méthode	41
2.1 Les échantillons	42
2.2 Le cône calorimètre	43
2.3 Métrologie appliquée à l’étude de l’inflammation et de la dégradation de l’épicéa	47
2.4 La fenêtre saphir	53
2.5 La chambre à atmosphère inerte	54
2.6 Les essais panneaux radiants	55
2.7 Le Single Burning Item (SBI)	56
2.8 Le mini-SBI	58
3 Étude de l’auto-inflammation du bois	61
3.1 Flux critique d’auto-inflammation	62
3.2 Temps d’auto-inflammation	63
3.3 Température de surface au moment de l’inflammation	69
3.4 Influence des conditions expérimentales	73
3.5 Effet de l’humidité des échantillons	76
3.6 Effet de l’essence de bois sur les données d’auto-inflammation	78

3.7	Comparaison des temps d'inflammation avec les modèles existants	84
3.8	Résumé	86
4	Étude de la dégradation du bois	89
4.1	Dégradation sans inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface	90
4.2	Dégradation avec inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface	93
4.3	Température dans le matériau et front de carbonisation	95
4.4	Influence des conditions expérimentales	105
4.5	Résumé	116
5	Étude de l'auto-extinction du bois	119
5.1	Passage d'un flux de chaleur élevé à un flux nul	119
5.2	Étude de l'auto-extinction avec le double cône coulissant pour un temps d'exposition fixé	121
5.3	Influence du temps d'exposition du premier flux de chaleur sur l'auto-extinction du bois	127
5.4	Influence de l'essence de bois sur l'auto-extinction	131
5.5	Résumé	134
6	Le changement d'échelle	135
6.1	Les panneaux radiants	135
6.2	Le SBI	145
6.3	Résumé	146
	Conclusion générale	149
A	Modélisation de l'influence d'un thermocouple sur la mesure de la température dans le bois	153
A.1	Description générale	153
A.2	Données d'entrées dans COMSOL®	153
A.3	Résultats de l'étude paramétrique	156
A.4	Résumé	158
B	Mesure de la température de surface pendant sa dégradation	159
B.1	Dégradation sans inflammation	159
B.2	Dégradation avec inflammation	160
C	Changement d'échelle : le mini-SBI et le SBI	163
C.1	Le mini-SBI	163
C.2	Le SBI	168
	Bibliographie	178

D Livret des figures	I
D.1 État de l'art	II
D.2 Matériel et Méthode	IV
D.3 Étude de l'auto-inflammation	VI
D.4 Étude de la dégradation	XIII
D.5 Étude de l'auto-extinction des échantillons	XVII
D.6 Le changement d'échelle	XXI

Liste des figures

1	Photo de l'essai parking bois-béton mené par Arbonis et le CSTB en 2017.	4
2	Schéma simplifié de l'inflammation à l'extinction du bois.	5
1.1	Schéma de la structure du bois par une coupe transversale.	10
1.2	Mécanismes de transfert de chaleur et d'entraînement d'air lors d'un essai au cône calorimètre orienté (a) horizontalement ou (b) verticalement. . . .	14
1.3	Température de surface à l'auto-inflammation en fonction du flux de chaleur incident.	19
1.4	Absorptivité d'un échantillon de contreplaqué soumis à une dégradation thermique pendant les temps prescrits.	20
1.5	Absorptivité moyenne d'un échantillon de contreplaqué soumis à un flux de 30 kW.m^{-2} pendant 120 secondes.	21
1.6	Évolution du MLRPUA d'un échantillon de bois pour une exposition de 30 minutes à 60 kW.m^{-2}	22
1.7	Photo d'un échantillon de bois dégradé après une exposition à 60 kW.m^{-2} pendant 10 minutes.	23
1.8	Évolution de la vitesse de carbonisation pour deux flux imposés (25 et 50 kW.m^{-2}) en fonction de l'essence de bois.	24
1.9	Évolution de la température de surface de l'épicéa en orientation verticale pour des flux de 30 et 50 kW.m^{-2}	26
1.10	Intensité spectrale émise dans la flamme à 10 cm au-dessus de la végétation en feu pour trois tests différents.	27
1.11	Thermogrammes issus des travaux de Fahrni <i>et al.</i> obtenus à différentes profondeurs en fonction du type de thermocouple implémenté.	28
1.12	Évolution de la vitesse de carbonisation en fonction du flux de chaleur imposé et de l'essence de bois	30
1.13	Évolution de la température de surface et en profondeur en fonction de la quantité d'oxygène présent pour un flux imposé de 40 kW.m^{-2}	32
1.14	Évolution de la température dans le compartiment selon différentes configurations.	34
1.15	Évolution de la température de surface de l'épicéa exposé à 15 kW.m^{-2} . . .	36
1.16	Cartographie de la température à différentes profondeurs pour des panneaux de silicate de calcium.	38

2.1	Photos des deux essences de bois utilisées lors des expériences au cône calorimètre.	42
2.2	Photo du double cône coulissant.	44
2.3	Évolution du flux mesuré en fonction de la configuration du cône.	45
2.4	Évolution du flux de chaleur mesuré avec le double cône coulissant.	46
2.5	Image infrarouge enregistrée avec la caméra TELOPS.	50
2.6	Thermocouples utilisés lors des expériences.	51
2.7	Étape d'usinage du bois afin de disposer des thermocouples soudés et non gainés de 0,1 mm de diamètre.	52
2.8	Comparaison de l'évolution du MLRPUA avec et sans présence de thermocouple (tc).	53
2.9	Photo d'un échantillon enflammé avec la présence de la fenêtre saphir entre l'échantillon et le cône.	54
2.10	Photo de l'enceinte à atmosphère contrôlée placée devant le cône.	55
2.11	Photos du dispositif expérimental mis en place pour les essais d'Épinal.	56
2.12	Photo d'une éprouvette disposée sur le SBI.	58
3.1	Histogramme des temps d'auto-inflammation pour les 4 flux pour lesquels l'auto-inflammation s'est produite.	63
3.2	Cartographie de la probabilité d'auto-inflammation en fonction du temps d'inflammation et du flux de chaleur imposé par le cône.	64
3.3	Temps d'inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons d'épicéa.	65
3.4	Photos d'une auto-inflammation au niveau des gaz de pyrolyse.	67
3.5	Photos d'une auto-inflammation au niveau de la surface exposée.	67
3.6	Photos d'une inflammation des gaz de pyrolyse pilotée par les spires du cône.	68
3.7	Variation de l'émissivité de l'épicéa à 2564 cm^{-1} pour différents temps d'exposition et flux prescrits.	70
3.8	Température de surface en fonction du temps d'inflammation.	71
3.9	Température de surface à l'inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons.	72
3.10	Photos d'une auto-inflammation au niveau des gaz.	74
3.11	Photos d'une inflammation pilotée par les spires du cône.	74
3.12	Photos de l'inflammation d'un échantillon d'épicéa exposé à 60 kW.m^{-2} avec la présence de la fenêtre saphir.	75
3.13	Temps d'auto-inflammation en fonction de l'humidité des échantillons.	77
3.14	Température de surface en fonction du $t_{in,fl}$ et de l'humidité des échantillons.	78
3.15	Temps d'auto-inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons de hêtre (H) et d'épicéa (E) pour des flux imposés de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	79
3.16	Images visibles et infrarouges avec un filtre CO_2 de l'inflammation par les spires du cône d'un échantillon de hêtre exposé à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	81

3.17	Images visibles et infrarouges avec le filtre CO ₂ d'une auto-inflammation dans gaz de pyrolyse d'un échantillon de hêtre exposé à 82,5 kW.m ⁻²	82
3.18	Température de surface en fonction du temps d'inflammation pour les essais avec des échantillons d'épicéa et de hêtre.	84
3.19	Comparaison des t_{infl} en fonction des modèles empiriques et semi-empiriques de la littérature.	85
4.1	Champ de température de surface en Kelvin et zone étudiée (cercle blanc) à différents temps d'exposition pour des flux de 16,5 et 38,5 kW.m ⁻²	90
4.2	MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés à 4 flux différents pendant une heure.	91
4.3	MLRPUA et température de surface pour deux échantillons exposés à 16,5 kW.m ⁻²	92
4.4	MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés pendant une heure à 4 flux différents.	93
4.5	MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés à 49,5 et 60 kW.m ⁻² pendant une heure.	94
4.6	Évolutions de la température de surface (caméra IR) et interne du matériau (thermocouples noyés) pour des flux de 16,5 et 38,5 kW.m ⁻²	96
4.7	Comparaison des thermogrammes de deux tests effectués à 16,5 kW.m ⁻² à trois profondeurs dans les échantillons.	97
4.8	Thermogramme à différentes profondeurs dans le matériau en fonction du flux appliqué.	97
4.9	Comparaison des profils de température dans le matériau pour différents temps d'exposition en fonction du flux appliqué (16,5 et 38,5 kW.m ⁻²).	98
4.10	Comparaison des profils de température dans le matériau pour différents temps d'exposition en fonction du flux appliqué.	99
4.11	Comparaison de l'évolution de la température dans le bois (à 2, 4, 6 et 8 mm de profondeur) en fonction de l'implantation des capteurs de température et du flux imposé. Légende; S : thermocouple gainé, W : thermocouple noyé.100	100
4.12	Comparaison de l'évolution de la température dans le bois (à 2, 4, 6 et 8 mm de profondeur) en fonction de l'implantation des capteurs de température et du flux imposé. Légende; S : thermocouple gainé, W : thermocouple noyé.101	101
4.13	Positions des fronts de charbon mesurés avec une règle et déduites de l'isotherme à 300 °C fournies par les thermocouples gainés et noyés.	102
4.14	Taux de carbonisation calculés à partir des fronts de charbon mesurés avec la règle et déduits de l'isotherme à 300 °C des thermocouples noyés.	103
4.15	Front de carbonisation en fonction du temps pour différents flux de chaleur. Points : données expérimentales - Courbes en pointillés : ajustement de la loi de puissance - Lignes simples : courbe tangente à la position $X = 10\text{mm}$.104	104
4.16	Taux de carbonisation pour différents flux de chaleur.	105

4.17	Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur en fonction du dispositif expérimental pour un flux de $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$	106
4.18	Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur pour un essai sous air et un essai sous argon à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$	107
4.19	Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur en fonction de la quantité d'oxygène présent dans l'environnement à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$	108
4.20	Comparaison des MLRPUA et températures de surface en fonction des conditions expérimentales pour la caractérisation du flux supplémentaire généré par la combustion solide.	109
4.21	Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidités étudiées.	109
4.22	Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.	110
4.23	Comparaison des thermogrammes en profondeur en fonction des différentes humidité étudiées.	111
4.24	Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidité étudiées.	112
4.25	Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.	112
4.26	Comparaison des thermogrammes en profondeur en fonction des différentes humidités étudiées.	113
4.27	Comparaison des profondeurs de charbon en fonction des différentes humidités étudiées.	114
4.28	MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa et de hêtre exposés à 2 flux différents.	115
4.29	Comparaison des thermogrammes à différentes profondeurs et des profils de température entre l'épicéa et le hêtre pour un flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	115
5.1	Évolution des MLRPUA pour un flux appliqué de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 5, 10, 15, 30 et 60 minutes.	120
5.2	Photos de deux échantillons de bois (A et B) après 15 minutes d'exposition à $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$. t_0 : moment où le flux de chaleur est retiré, t_1 : 20 s après t_0	122
5.3	Pourcentage d'extinction de flamme en fonction du flux de chaleur appliqué à l'échantillon lors de la deuxième étape.	123
5.4	Température de surface et MLRPUA pour un premier flux de chaleur de $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ imposé pendant 15 min, suivi d'un second flux (60 et 47 kW.m^{-2}) imposé pendant 5 min.	124
5.5	Champ de température en Kelvin et zone étudiée (cercle blanc) à différents temps d'exposition pour deux flux de chaleur différents ($82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 900 s et 44 kW.m^{-2} de 902 s à 1200 s).	125
5.6	Détermination d'un MLRPUA moyen mesuré après coulissement des cônes pour 15 minutes d'essai.	127

5.7	Pourcentage d’extinction de la flamme en fonction du temps d’exposition et du flux thermique appliqué à l’échantillon lors de la deuxième étape. . .	128
5.8	Épaisseur de charbon en fonction du flux de chaleur conduisant à l’auto-extinction de la flamme.	129
5.9	MLRPUA mesuré après le coulissement du cône pendant quatre temps d’exposition.	130
5.10	Proportion d’extinction de la flamme et nombre de tests réalisés en fonction du MLRPUA enregistré pour chaque essai (173 essais).	130
5.11	Pourcentage d’extinction de la flamme en fonction du temps d’exposition et du flux thermique appliqué à l’échantillon lors de la deuxième étape (55 tests) pour un premier flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	131
5.12	Comparaison du pourcentage d’extinction de la flamme en fonction de l’essence de bois.	132
5.13	Détermination du MLRPUA critique d’auto-extinction mesuré expérimentalement pour les échantillons de hêtre après le coulissement du cône. . . .	133
5.14	MLRPUA mesuré pour les échantillons de hêtre après le coulissement du cône pour un flux appliqué de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	133
6.1	Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d’onde du CO_2 d’une auto-inflammation par les gaz éloignés de la surface exposée pour un flux de $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$	138
6.2	Température de surface au moment de l’inflammation.	139
6.3	Comparaison des MLRPUA et T_{surf} entre les essais aux panneaux radiants et au cône calorimètre pour des flux identiques.	140
6.4	Thermogrammes de deux échantillons exposés à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 25 minutes et comparaison avec les essais au cône.	142
6.5	Comparaison des évolutions de la température en fonction de la localisation des thermocouples noyés pour un flux de 60 kW.m^{-2}	143
6.6	Comparaison des thermogrammes pour des échantillons exposé à 60 kW.m^{-2} selon l’échelle étudiée.	143
6.7	Comparaison de la position du front de charbon dans les échantillons en fonction de l’échelle étudiée pour un flux imposé de 60 kW.m^{-2}	144
6.8	Comparaison de la position du front de charbon en fonction du flux imposé avec les essais aux panneaux radiants.	145
6.9	Comparaison de la position du front de charbon en fonction du dispositif expérimental.	146
A.1	Propriétés de l’échantillon d’épicéa utilisées dans COMSOL en fonction de la température.	154
A.2	Modélisation de l’échantillon ainsi que du thermocouple disposé à 2 mm par rapport à la surface exposée au flux de chaleur.	155
A.3	Comparaison des évolutions des températures en fonction de l’orientation des thermocouples.	156

A.4	Évolution de la température en fonction de l'orientation, du diamètre du thermocouple ainsi que de la résistance de contact.	157
A.5	Température à 2 mm de profondeur en fonction de son l'implantation, son diamètre et sa résistance de contact.	158
B.1	Comparaison des températures de surface à 22 kW.m^{-2} en fonction de la valeur de l'émissivité et de la technique de mesure (thermocouple ou caméra infrarouge).	159
B.2	Comparaison des température de surface à 60 kW.m^{-2} en fonction de la valeur de l'émissivité et de la technique de mesure.	160
C.1	Schéma de la position des fluxmètres et cartographie des flux mesurés au mini-SBI sur une paroi incombustible pour une puissance de 7,7 kW.	164
C.2	Schéma permettant de visualiser la position des thermocouples dans les échantillons. Les points rouges représentent les soudures des thermocouples, où les mesures seront enregistrées.	165
C.3	Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs et comparaison en fonction de l'implantation pour la hauteur inférieure des éprouvettes.	165
C.4	Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs et comparaison en fonction de l'implantation pour la hauteur supérieure des éprouvettes.	166
C.5	Comparaison des profils de température selon la hauteur des thermocouples dans les éprouvettes.	167
C.6	Comparaison du front de charbon lors des essais mini-SBI.	168
C.7	Photo de la plaque de silicate de calcium percée (à gauche) et schéma de la position des mesures de flux (à droite).	169
C.8	Cartographie des flux mesurés pour des puissances de brûleur allant de 15 à 50 kW sur une plaque incombustible.	169
C.9	Photos d'éprouvettes après 15 minutes d'essai exposées à différentes puissances de brûleur.	171
C.10	Détermination des zones de dégradation des échantillons de bois après essai.	172
C.11	Évolution de la zone très dégradée pour différentes puissances de brûleur à deux temps d'exposition.	173
C.12	Évolution de la zone très dégradée en fonction de la puissance du brûleur.	173
C.13	Schémas de la position des thermocouples dans l'éprouvette pour les essais SBI.	174
C.14	Évolution de la température dans le bois à différentes profondeurs pour une puissance de 30 kW.	175
C.15	Front de carbonisation et vitesse de carbonisation issus des essais SBI.	176
C.16	Comparaison de la couche de charbon entre la petite et la grande aile.	177
D.1	Schéma détaillé du cône calorimètre orienté verticalement.	II

D.2	Évolution de la température de surface et en profondeur mesurée par des thermocouples pour un flux de 38 kW.m^{-2} .	III
D.3	Images de la flamme dans le visible et dans l'infrarouge autour de 3,8, 4,45 et 7,83 μm .	III
D.4	Histogramme de la masse volumique des échantillons d'épicéa.	IV
D.5	Évolution du pourcentage d'humidité des échantillons de bois en fonction de l'environnement salin.	IV
D.6	Évolution des Digital Levels en fonction de la luminance calculée avec la température du corps noir pour un nombre d'onde de 2564 cm^{-1} (3,9 μm).	V
D.7	Photo d'un échantillon rainuré avant l'insertion de thermocouples noyés non gainés.	V
D.8	Variation de l'émissivité des échantillons d'épicéa pour trois temps d'exposition à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sur tout le spectre infrarouge.	VI
D.9	Images de la face exposée au cône d'un échantillon d'épicéa enregistrées par la caméra rapide visible d'une inflammation proche de la surface exposée.	VII
D.10	Valeurs des températures de surface en fonction t_{infl} normalisé à ± 1 seconde.	VIII
D.11	Valeur de la température de surface à l'inflammation en fonction de l'émissivité imposée.	IX
D.12	Comparaison du MLRPUA pendant une exposition d'une heure avec et sans fenêtre saphir.	IX
D.13	Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde des suies d'une auto-inflammation par les gaz d'un échantillon de hêtre exposé à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.	X
D.14	Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde du CO_2 d'une auto-inflammation proche de la surface exposée au cône d'un échantillon de hêtre à 60 kW.m^{-2} .	XI
D.15	Valeurs des températures de surface en fonction t_{infl} normalisé à ± 1 seconde.	XII
D.16	Thermogrammes des thermocouples noyés pour le test 2 à un flux de 16,5 kW.m^{-2} .	XIII
D.17	Comparaison du MLRPUA ainsi que de la température de surface entre des essais sous air et sous argon pour un flux de $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sous argon.	XIII
D.18	Comparaison du MLRPUA ainsi que de la température de surface entre des essais sous air et sous argon pour un flux de 60 kW.m^{-2} sous argon.	XIV
D.19	Thermogrammes des thermocouples noyés pour le test $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sous argon.	XIV
D.20	Évolution de la température mesurée dans l'épicéa pour une valeur de flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.	XV
D.21	Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidités étudiées.	XV
D.22	Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.	XVI
D.23	Évolution de la température mesurée dans le hêtre pour une valeur de flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.	XVI

D.24 Pourcentage d'extinction de la flamme en fonction du temps d'exposition et du flux thermique appliqué à l'échantillon lors de la deuxième étape (le premier flux imposé est de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$).	XXVIII
D.25 MLRPUA mesuré après le coulissement du cône pour un temps d'exposition de 9 minutes.	XIX
D.26 Détermination de la distance panneaux/échantillons et de la séparation entre les panneaux de façon a obtenir le flux souhaité sur le bois.	XXI
D.27 Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde du CO_2 d'une auto-inflammation proche de la surface exposée aux panneaux radiants à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$	XXII
D.28 Représentation des MLRPUA enregistrées pendant les essais aux panneaux radiants.	XXIII
D.29 Thermogrammes pour un échantillons exposé à 60 kW.m^{-2} dont les thermocouples se situe en partie centrale de l'échantillon.	XXIV
D.30 Thermogrammes pour un échantillons exposé à 60 kW.m^{-2} dont les thermocouples se situe en partie haute de l'échantillon.	XXIV

Liste des tableaux

2.1	Sels mélangés à l'eau afin d'augmenter l'humidité du bois.	43
3.1	Temps d'auto-inflammation en fonction de la localisation de l'inflammation pour chaque flux imposé.	68
3.2	Comparaison des valeurs des t_{infl} , en seconde, entre les deux orientations.	73
3.3	Temps d'inflammation en fonction de la localisation de l'inflammation pour chaque flux imposé pour les tests équipés de la fenêtre saphir.	75
3.4	Gamme des températures d'inflammation en fonction du temps d'inflammation et de l'humidité des échantillons.	78
3.5	Temps d'inflammation en fonction de l'essence de bois étudiée.	79
5.1	MLRPUA à l'auto-extinction pour des flux de 60 et 82,5 kW.m ⁻² en fonction du temps d'exposition.	120
5.2	Étude de l'extinction de l'épicéa sur 95 tests pour une exposition de 15 minutes.	122
5.3	Délai moyen d'extinction en seconde lorsque l'auto-extinction se produit en fonction des flux de chaleur exposés.	124
5.4	Température de surface (°C) à l'auto-extinction en fonction des flux imposés.	126
6.1	Temps d'auto-inflammation en fonction de l'échelle.	137
C.1	Valeurs moyennes et écarts-types des flux enregistrés en fonction de la puissance du brûleur.	171
D.1	Modèles de prédiction du temps d'inflammation piloté.	II
D.2	Nombre d'essai réalisé en fonction des flux appliqués et de la variation de l'humidité dans les échantillons d'épicéa.	IX
D.3	Résultats des 36 essais sur l'extinction de l'épicéa effectués pour un temps d'exposition de 6 minutes au premier flux de chaleur.	XVII
D.4	Résultats des 36 essais sur l'extinction de l'épicéa effectués pour un temps d'exposition de 9 minutes au premier flux de chaleur.	XVII
D.5	Résultats des 37 essais sur l'extinction de l'épicéa effectués pour un temps d'exposition de 18 minutes au premier flux de chaleur.	XVIII
D.6	Résultats des 10 essais sur l'extinction du hêtre effectués pour un temps d'exposition de 90 secondes au premier flux de chaleur.	XIX

D.7	Résultats des 24 essais sur l'extinction du hêtre effectués pour un temps d'exposition de 9 minutes au premier flux de chaleur.	XIX
D.8	Résultats des 24 essais sur l'extinction du hêtre effectués pour un temps d'exposition de 15 minutes au premier flux de chaleur.	XX
D.9	Distance panneaux/échantillons et séparation entre les panneaux.	XXI

Introduction générale

Contexte général

En raison de l'augmentation continue de la population, le besoin de construire ou reconstruire des logements ne cesse de s'accroître. La transition écologique et la modernisation des plans urbains conduisent à trouver de nouvelles alternatives concernant les matériaux de construction. En effet, depuis l'accord de Paris en 2015, notre société a pour ambition de produire des bâtiments à énergie positive et à faible empreinte carbone. L'objectif principal du parc immobilier français tend à ce que les émissions de CO₂ soit nulles d'ici 2050, de la construction à son utilisation. En conséquence, une volonté politique s'est tournée vers l'utilisation du matériau bois dans la construction des bâtiments, aussi bien d'habitation que de travail. La part de marché de la construction bois s'est ainsi vue doubler dans les quinze dernières années.

Un projet concret de construction, tel que les infrastructures d'accueil des jeux olympiques de 2024, en France, est directement concerné par l'utilisation des produits bois structurels et d'aménagements d'intérieurs. Différents types de bâtiments de plusieurs étages (R+3 pour rez de chaussée plus 3 étages) sont envisagés : 54 226 m² de logement R+1 à R+3 (construction ossature bois), 235 275 m² de logement R+4 à R+8 (poteaux poutres bois avec façade bois et/ou solutions mixtes structure béton et façade bois) et 110 453 m² d'immeuble de bureaux supérieur à R+9 (structure poteaux poutres, poutrelles acier, plancher Cross Laminated Timber (CLT)).

Le bois est une bonne alternative aux matériaux couramment utilisés grâce à deux atouts en matière de lutte contre le changement climatique :

- Le stockage : le bois contient du carbone pris à l'atmosphère lors de la croissance de l'arbre. Ce carbone reste stocké dans le matériau pour toute la durée de vie du produit (de quelques décennies à un siècle). Ces durées de stockage du carbone dans le bois d'œuvre sont significatives au regard de la lutte contre le changement climatique. Le carbone ainsi stocké dans le bois n'est plus présent dans l'atmosphère sous forme de CO₂ pendant cette longue période et ne participe donc plus au réchauffement climatique. Les augmentations de stock de bois dans la construction peuvent ainsi être comptabilisées comme puits de carbone.
- La substitution : cet effet permet d'éviter les émissions issues d'énergies fossiles pour la production d'énergie et de matériau. La réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi obtenue est appelée effet de substitution. À titre d'exemple, le coût

énergétique de la production d'acier ou du béton armé sont respectivement de 20 et 5 GJ/tonne. Selon une étude de 2016, Climwood20302, réalisée au niveau européen, "l'utilisation des produits bois entraîne une baisse des émissions de gaz à effet de serre fossile sur l'ensemble du cycle de vie de l'ordre de 1,5 à 3,5 tonnes de CO₂ par tonne de produits bois, par comparaison à des produits alternatifs".

Au niveau écologique, le bois est donc un matériau intéressant pour être utilisé dans la construction [1]. Cependant, celui-ci doit tout d'abord satisfaire les exigences fixées par la réglementation du secteur de la construction. En effet, tout matériau de construction doit démontrer, avant utilisation, ses performances dans différents domaines allant de l'acoustique à la tenue mécanique de la structure en passant par le comportement en situation d'incendie et l'étanchéité. La démonstration se fait généralement au moyen d'essais techniques normés ou encore de calculs réalisés par des organismes reconnus compétents tels que le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Lorsque les méthodes normées ne permettent pas de démontrer les performances d'un élément de construction, il est nécessaire d'employer des méthodes spécifiques. À titre d'exemple, le CSTB propose la délivrance d'Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) afin de contribuer au développement des innovations dans le bâtiment. Cette ATEX peut aussi bien porter sur un produit, un matériau, un composant, un équipement, ou un procédé innovant pour lequel il n'est pas possible ou pas encore possible d'instruire un Avis Technique.

Classement des matériaux de construction

Le désir d'utiliser le bois dans la construction conduit à de nombreuses interrogations en particulier concernant le comportement au feu des bâtiments d'habitation ou des Immeubles de Grande Hauteur (hauteur supérieure à 50 m en habitation, ou à 28 m pour les autres catégories). En effet, le bois est un matériau dont les propriétés sont complexes, et qui présente évidemment la particularité d'alimenter l'incendie en cas de sinistre.

La sécurité incendie des bâtiments et ouvrages est, de manière générale, traitée en France par des réglementations prescriptives en ce qui concerne la conception, les matériaux de construction utilisés, la réduction des risques de départ d'incendie, l'évacuation des occupants et l'intervention des services de secours. Les grands principes relatifs à la sécurité contre l'incendie dans les bâtiments sont dictés par de nombreux codes et arrêtés. Cependant, depuis 2004 en France, l'approche performancielle d'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI) permet de compléter l'approche prescriptive. L'ISI adapte au cas par cas les solutions traditionnelles en identifiant par exemple les risques en terme de probabilités. Les ouvrages peuvent donc être redimensionnés et adaptés en fonction des résultats obtenus. Néanmoins, l'approche prescriptive reste encore la plus utilisée en ce qui concerne la sécurité incendie. Les matériaux de construction sont avant leur utilisation soumis à des tests normés puis classés selon leur performance. Cette classification peut être dissociée en deux catégories :

- La résistance au feu : durée pendant laquelle un élément de construction va main-

tenir sa fonction structurelle sous l'action d'un incendie. Pour cette caractérisation, l'incendie de référence est représenté par la courbe température-temps normalisée (définie par les normes ISO 834-1 et EN 1363-1). Les principaux critères de performance utilisés pour l'évaluation de la résistance au feu des éléments structurels sont résumés en trois lettres : R (capacité portante), E (étanchéité aux flammes et aux gaz chauds) et I (isolation thermique).

- La réaction au feu : aptitude d'un matériau à contribuer (ou non) au développement d'un feu dans les premières minutes. L'essai le plus courant de réaction au feu est le Single Burning Item (SBI) défini par la norme EN 13501-1 [2]. Cet essai consiste à simuler un feu de poubelle dans un coin d'une pièce pour ainsi tester les produits ou matériaux de construction et en délivrer un classement. Ce classement donne lieu à des classes européennes A1, A2, B, C, D et E, avec les indications s1 à s3 pour les fumées et d0 à d2 pour les gouttelettes. Celles-ci font suite aux classements français M0 à M4 encore en vigueur pour les éléments non intégrés à la construction [3].

Le matériau de classe A1 est incombustible (acier, verre, pierre) contrairement à celui de classe E qui est très inflammable (papier, polyester). Le bois est généralement classé C ou D en fonction de l'essence et du traitement reçu, signifiant que ce matériau est moyennement ou facilement inflammable.

Bien entendu, la résistance et la réaction au feu sont deux points liés puisque la réponse d'un matériau face à un incendie va conditionner sa tenue mécanique [4]. La notion de réaction au feu concerne donc tout particulièrement les matériaux qui sont apparents, ou susceptibles d'être rapidement soumis à un flux thermique dans un local lors d'un début d'incendie. Celle-ci ne couvre pas la totalité du comportement au feu des matériaux de construction combustibles lorsqu'ils sont soumis à des feux pleinement développés. Les différents essais expérimentaux de réaction au feu permettent, entre autre, d'étudier le comportement des matériaux avant et pendant l'inflammation [5]. En conséquence, il existe de nombreuses recherches focalisées sur l'étude de l'inflammation et de la dégradation du matériau. Dans une approche expérimentale, les mesures réalisées concernent généralement la température, le flux thermique, la chaleur libérée appelée Heat Release Rate (HRR) et la perte en masse, avec une multitude de capteurs variés, disposés autour et à l'intérieur du matériau. Cependant, les résultats sur l'inflammation et la dégradation d'un même matériau sont souvent dispersés et les paramètres régissant ces phénomènes ne font pas toujours l'unanimité [6].

L'utilisation croissante du bois dans la construction soulève également une question qui intéresse de plus en plus des organismes tels que le CSTB. Quelle est la capacité des matériaux bois à s'éteindre d'eux mêmes selon différentes conditions d'incendie ? En effet, les futurs ouvrages pouvant potentiellement être composés d'une grande quantité de matériaux combustibles, il est nécessaire de connaître les différents critères pouvant conduire à l'auto-extinction des produits bois. Un essai spécial mené par le CSTB et la société Arbonis sur un parking composé de poutres en bois et d'un plancher bois-béton a permis d'observer expérimentalement que le bois pouvait s'auto-éteindre pour cette configuration spécifique. La figure 1 illustre l'essai du parking au moment où le foyer est pleinement dé-

veloppé. Cet essai peut être considéré comme réaliste puisque le foyer était composé d'une dizaine de voitures qui se sont enflammées successivement. Il a été observé que le bois constituant le parking pouvait s'auto-enflammer et se dégrader à des distances éloignées du foyer. Enfin, l'essai met en évidence qu'une conception appropriée de la structure peut conduire à l'auto-extinction du matériau bois, préservant ainsi la tenue de la structure.



FIGURE 1 – Photo de l'essai parking bois-béton mené par Arbonis et le CSTB en 2017.

En conséquence, des données expérimentales précises sont nécessaires afin d'approfondir la connaissance de l'auto-extinction du bois. Les données issues de ce type d'expérimentation servent surtout à alimenter les codes de calculs de dimensionnement utilisés dans l'ingénierie et ainsi conforter les études performantielles concernant les structures en bois.

Généralités

Avant d'aborder plus en détails l'état de l'art menant aux travaux réalisés, une description des principaux mécanismes pouvant conduire à l'inflammation puis à l'extinction d'un matériau bois est proposée.

De l'inflammation à l'extinction

Les phénomènes régissant l'inflammation, la dégradation ou l'extinction d'un matériau bois sont généralement couplés et complexes. Une description détaillée en est même hors de portée actuellement compte tenu du nombre très élevé de paramètres mis en jeu. La description peut être abordée sous différents angles : chimique, thermique, énergétique, et ce à l'échelle des polymères ou macroscopique.

La figure 2 présente une vision très simplifiée de l'inflammation, de la dégradation et de l'extinction du bois. Considérons un échantillon de bois massif, non traité, dans un environnement d'air suffisamment oxygéné. Lorsque cet échantillon est soumis à une agression thermique, il reçoit une puissance thermique à sa surface notée φ . Cette puissance thermique peut être générée par le rayonnement de l'environnement, le contact des gaz chauds

ou une combinaison de deux phénomènes. Dans le cas d'un incendie, cette sollicitation thermique, à un niveau important (de l'ordre de plusieurs dizaines de kW.m^{-2}), va engendrer une augmentation de la température au niveau du combustible, entraîner des réactions chimiques de décomposition et la production de matières volatiles. Ces réactions chimiques conduisent à une dégradation du bois vierge en charbon. Ce processus, complexe, est appelé pyrolyse du bois et les matières volatiles gaz de pyrolyse.

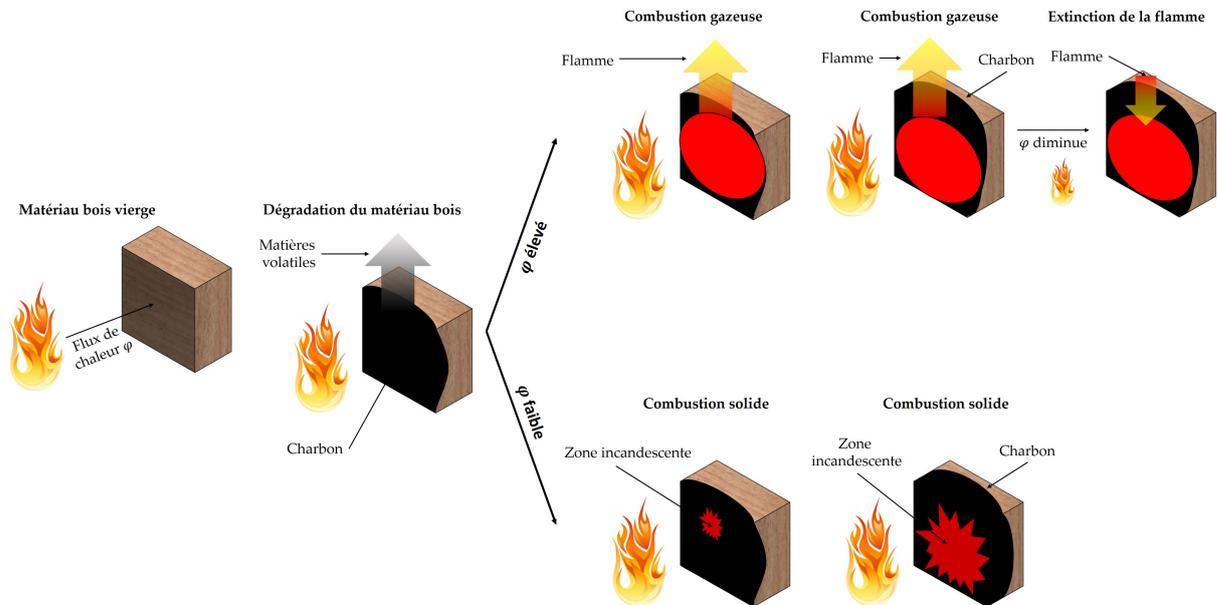


FIGURE 2 – Schéma simplifié de l'inflammation à l'extinction du bois.

Une fois que le processus de pyrolyse débute et tant que la sollicitation thermique reste suffisamment élevée, les réactions chimiques progressent à l'intérieur du bois et la température se maintient à un niveau suffisamment élevé pour permettre à la pyrolyse de se poursuivre. Les réactions de pyrolyse sont endothermiques : elles consomment de l'énergie, et un apport d'énergie est nécessaire pour qu'elles se maintiennent. Les gaz de pyrolyse sont combustibles dans l'air. Sous certaines conditions, ces gaz peuvent donc conduire à une réaction de combustion avec l'oxygène de l'air. Cette réaction se produit en phase gazeuse à proximité du bois et est exothermique. L'énergie dégagée s'ajoute à l'agression thermique extérieure. Par ailleurs le charbon, résidu solide de la pyrolyse, est lui aussi combustible. Si les conditions nécessaires sont réunies, il peut lui aussi conduire à une réaction de combustion avec l'oxygène de l'air. Cette réaction est exothermique, mais se passe en phase solide dans le charbon. L'énergie dégagée conduit à une élévation importante de la température locale du charbon (incandescence).

Il existe des situations pour laquelle la combustion du bois ne se produit jamais, en particulier parce que la sollicitation thermique est trop faible. Cette situation ne sera pas abordée dans les travaux de thèse présentés ici. La combustion peut donc intervenir sous deux formes différentes.

La première, nommée combustion sans flamme en phase solide, est, comme son nom l'indique, une combustion du matériau sans présence de flamme. Le flux thermique généré

par la source est trop faible pour réunir les conditions permettant aux gaz de pyrolyse provenant du bois de s'enflammer. Cependant, il n'en reste pas moins que cette combustion du charbon engendre des zones incandescentes (à des températures élevées) au niveau de la surface exposée au flux de chaleur. Il est à noter que la dégradation des échantillons est importante malgré l'absence de la flamme.

Le deuxième type de combustion est appelé la combustion avec flamme en phase gaz. Cette fois-ci, le flux de chaleur élevé dégrade le matériau beaucoup plus rapidement que pour le premier type de combustion. Les matières volatiles inflammables sont libérées en quantité importante. Le mélange gaz de pyrolyse et oxygène sont dans une bonne proportion et la température est suffisante pour déclencher l'inflammation. Cette flamme, tout comme les zones incandescentes présentées ci-dessus génèrent une énergie transmise au matériau qui va accentuer sa dégradation. Ces deux types de combustion, sont majoritairement contrôlés par la quantité de gaz de pyrolyse libérée, la sollicitation thermique ainsi que l'approvisionnement en oxygène. Dans les deux cas, le bois se transforme en charbon qui brûle et joue un rôle sur les paramètres permettant d'entretenir la dégradation du bois. Enfin, après un certain temps d'exposition au flux de chaleur, l'énergie dégagée par la source externe diminue voire même devient nulle. Cela peut se produire si cette source est combattue par les pompiers, qu'un système d'aspersion type "sprinkler" se situe à proximité ou que la quantité de combustible est épuisée. C'est à partir de cet instant que le matériau pourra, sous certaines conditions, s'éteindre de lui-même.

Toutes les étapes énoncées de façon simplifiée permettent de présenter l'étude qui sera effectuée tout au long de ce manuscrit. Les phénomènes d'inflammation et d'auto-extinction se produisent sous des conditions spécifiques qui doivent être évaluées par des techniques précises afin d'apporter des données expérimentales à la communauté incendie.

Questions soulevées

La quantité importante de dispositifs expérimentaux développés à différentes échelles a pour but de mieux appréhender les phénomènes d'inflammation et de dégradation des matériaux bois. Le nombre d'essais normés de réaction au feu réalisés chaque jour afin de délivrer des classements sur les matériaux de construction est conséquent. L'idée est d'alimenter les bases de données pour ensuite prédire le comportement du bois en situation d'incendie par des calculs simples ou des simulations numériques. Cependant, l'étude bibliographique présentée dans la prochaine partie met en évidence la disparité des résultats expérimentaux qui peut exister pour un même matériau soumis à un essai donné comme le cône calorimètre. Par exemple, la température d'inflammation du bois, souvent définie comme étant la température de surface du matériau au moment de l'apparition de la flamme peut varier de 240 à 800 °C. Les paramètres tels que les techniques de mesure employées lors des essais peuvent conduire à des différences importantes dans les résultats. De ce fait, et pour appuyer au mieux les entités d'ingénierie de la sécurité incendie, il est nécessaire d'obtenir des critères simples et fiables d'inflammation, de dégradation et d'extinction du bois. Pour ce faire, une métrologie dédiée et une quantité de

tests très élevée doivent être assurées. Cette quantité permettra entre autre d'effectuer des études statistiques des différents critères souhaités. De plus, afin d'assurer un nombre de tests important, les expériences devront être majoritairement réalisées à petite échelle. Cette démarche permettra d'abord de contrôler au maximum les paramètres expérimentaux ainsi que de consolider la métrologie mise en place. La montée en échelle regroupera moins d'essais pour des raisons liées aux moyens humain et matériel requis.

Le manuscrit de thèse se décompose en plusieurs parties distinctes visant tout d'abord à présenter dans un état de l'art les travaux et résultats expérimentaux existant au sein de la communauté concernant l'auto-inflammation, la dégradation et l'auto-extinction du matériau bois. Un chapitre est consacré à la présentation des différents moyens de mesure mis en place ainsi que les dispositifs expérimentaux utilisés pendant la thèse. La partie résultats est dissociée en quatre parties : trois d'entre elles à petite échelle (cône calorimètre) séparant l'étude de l'auto-inflammation, de la dégradation et de l'auto-extinction et une partie sur le changement d'échelle (panneaux radiants, mini-SBI et SBI) suivis de trois annexes. Un grand nombre d'essais a été réalisé lors de ce travail et par conséquent un nombre important de résultats a été obtenu. Pour ne pas trop surcharger ce mémoire, seuls les principaux résultats sont présentés dans le corps de ce manuscrit. Les résultats additionnels obtenus sont rapidement discutés et les figures correspondantes ont été reportées dans une annexe de figures complémentaires que le lecteur pourra consulter s'il souhaite approfondir tel ou tel point particulier.

Chapitre 1

État de l'art sur l'inflammation, la dégradation et l'extinction du bois

Sommaire

1.1	Présentation du matériau bois	10
1.1.1	Caractéristiques générales	10
1.1.2	La masse volumique	11
1.1.3	L'humidité	11
1.1.4	Propriétés et décomposition thermique du bois	11
1.2	Inflammation du bois	12
1.2.1	Les différents types d'inflammation	13
1.2.2	L'orientation des échantillons	13
1.2.3	Le flux critique d'inflammation	15
1.2.4	Le temps d'inflammation	16
1.2.5	La température d'inflammation des échantillons	17
1.3	Dégradation du bois	22
1.3.1	La perte en masse	22
1.3.2	Position du front de charbon et vitesse de carbonisation	23
1.3.3	L'évolution de la température	25
1.3.4	Variation des propriétés du bois	29
1.3.5	Effet de l'air et de l'oxygène sur la dégradation	31
1.4	Extinction du bois	32
1.5	Expériences sans inflammation	35
1.6	Le changement d'échelle	37
1.7	Récapitulatif et objectifs de la thèse	39

La contribution d'un matériau au développement d'un feu dépend de la façon dont il se dégrade sous l'effet de la chaleur, de son aptitude à s'enflammer et de sa capacité à s'éteindre de lui-même (auto-extinction). Il existe actuellement de nombreuses références

bibliographiques portant sur le comportement au feu du bois. L'état de l'art présenté ci-après propose une extraction et une analyse des principales études, en particulier expérimentales, se focalisant sur la dégradation, l'inflammation et l'auto-extinction du bois.

1.1 Présentation du matériau bois

1.1.1 Caractéristiques générales

Comme présenté dans l'introduction, le bois est le matériau étudié tout au long de cette thèse. Le bois est constitué principalement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. Cette composition évolue selon l'essence mais reste relativement constante en fonction des différentes parties de l'arbre [7]. Il a également la particularité d'avoir une haute teneur en matières volatiles, de l'ordre de 73 à 87 % [8; 9]. Une section transversale de bois peut se décomposer en différentes parties comme le montre la figure 1.1 présentée dans le rapport de Batiot *et al.* [10], issue du travail de Picard¹.

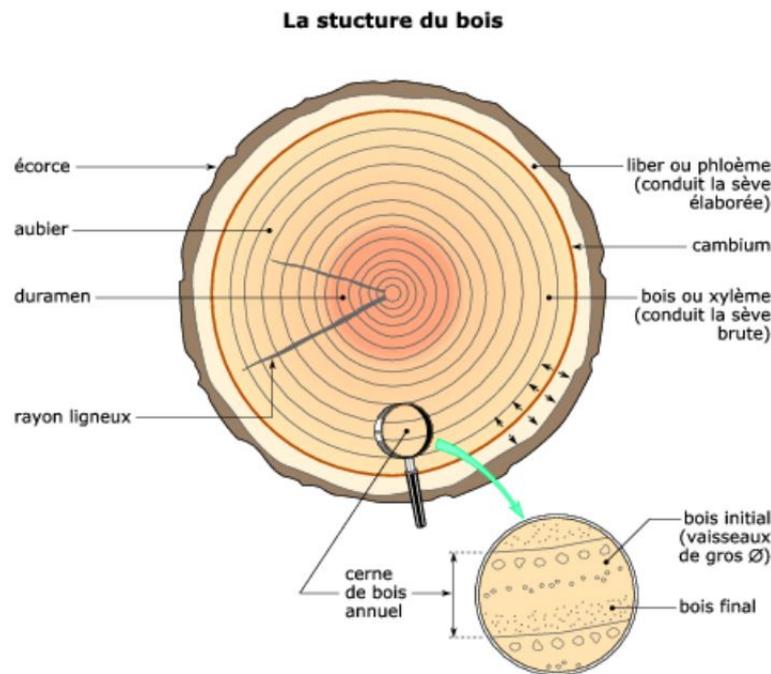


FIGURE 1.1 – Schéma de la structure du bois par une coupe transversale.

Les éléments de structure utilisés dans la construction tels que les poutres ou les charpentes sont généralement issues du duramen [10]. Ce matériau anisotrope est composé de trois polymères : la cellulose (40 à 50 % de la masse du bois), l'hémicellulose (20 à 40 % de la masse du bois) et la lignine (20 à 35 % de la masse du bois) [11; 12; 13]. Pour le

1. https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-enseignants/1_w402i01

bois sec, la formule chimique globale proposée est $C_6H_{8,4}O_{3,5}N_{0,1}$ même si généralement la forme simplifiée, $C_6H_{8,6}O_4$ est plus souvent présentée [14].

1.1.2 La masse volumique

Les tissus cellulaires présents dans le bois peuvent varier et cela engendre des différences de masses volumiques importantes entre les essences de bois. En effet, la masse volumique du matériau bois de construction peut passer de 400 kg.m^{-3} pour le sapin à 700 kg.m^{-3} pour le hêtre². De plus, l'hétérogénéité du bois, et en particulier les nœuds, peuvent aussi faire varier la masse volumique d'une même essence. Par exemple, l'intervalle général de masse volumique utilisé pour le sapin est de 400 à 580 kg.m^{-3} en bois sec [15]. Si le bois est soumis à une température élevée, cette masse volumique aura tendance à diminuer à cause des réactions chimiques qui vont transformer le matériau [16].

1.1.3 L'humidité

Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il a tendance à retenir l'humidité de l'air par absorption. Cette humidité dans le bois peut fortement varier du fait des paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité ou la pression. Le taux d'humidité ($H(\%)$) dans le bois peut être défini selon sa masse brute (M) ou sa masse sèche (M_0). Ce taux d'humidité peut s'écrire selon la masse brute du bois par :

$$H = \frac{M - M_0}{M} \times 100 \quad (1.1)$$

Cette formule sera utilisée pour exprimer l'humidité des échantillons de bois étudiés.

1.1.4 Propriétés et décomposition thermique du bois

Le bois est un matériau dont une grande partie des propriétés peuvent fluctuer. En particulier les propriétés telles que la masse volumique, la conductivité, la capacité calorifique ou la porosité varient avec la température [17; 18]. D'autres propriétés peuvent quant à elles évoluer avec le vieillissement [19; 20] : humidité, propriétés mécaniques, etc. Le pouvoir calorifique (ou chaleur de combustion) inférieur (PCI) du bois diffère selon les essences, mais reste relativement faible, de l'ordre de 15 à 20 MJ.kg^{-1} [21] par rapport aux hydrocarbures, par exemple, ayant un PCI se situant pour la plupart entre 40 et 50 MJ.kg^{-1} .

Lors de la décomposition thermique du bois suite à une augmentation de la température du combustible, les interactions entre les constituants sont fortes puisque la lignine joint les fibres de bois entre elles, les hémicelluloses joignent la lignine à la cellulose. Cependant, l'objectif principal de la thèse n'étant pas d'étudier la décomposition du bois de façon détaillée, les descriptions ci-après seront globales.

2. <http://www.bois-de-construction.fr/essences-bois>

Lorsque le bois est chauffé, il subit une dégradation thermique, produisant des gaz de pyrolyse, du goudron liquide et une couche de charbon rigide [22]. Le processus de formation de charbon de bois est généralement supposé se produire à des températures proches de 300 °C, la pyrolyse du bois commençant généralement autour de 200 °C [23; 24]. Dans la littérature, la pyrolyse est souvent décrite en quatre étapes [25; 26; 27] :

- 1 De 100 à 200 °C, le processus de chauffage observé est principalement inerte. Le bois se déshydrate et seule l'eau libre s'évapore dès que les 100 °C sont atteints. La pyrolyse est lente et augmente une fois l'échantillon déshydraté [28]. La production de gaz inflammable, de CO et de CO₂ est faible.
- 2 Entre 200 et 300 °C, les premières réactions chimiques de la pyrolyse commencent. Les réactions de déshydratation qui s'accélèrent vers 200 °C sont principalement responsables de la décomposition de l'hémicellulose suivi de la cellulose avec la présence d'oxygène [26; 29]. Dans l'ensemble, les réactions de pyrolyse sont endothermiques. Une augmentation de la formation de CO à partir des réactions chimiques du charbon avec l'augmentation de la température est observée.
- 3 De 300 à 500 °C, les réactions de pyrolyse augmentent significativement, la décomposition de la cellulose entraîne la production de gaz volatiles inflammables [30; 31]. C'est à ce moment là que le charbon se produit en grande quantité puis diminue jusqu'à rapidement atteindre une valeur constante, retardant ainsi la pyrolyse [28; 24].
- 4 À des températures supérieures à 400 °C, une oxydation du charbon s'opère, réduisant son épaisseur ainsi que sa capacité isolante. La température à laquelle ce phénomène se produit peut varier de 300 à 700 °C en fonction du flux appliqué et de la concentration en oxygène [32].

Des études se sont également focalisées sur les gammes de température de pyrolyse des trois polymères constituant le bois. Elles se situent entre 240 et 350 °C pour la cellulose, entre 200 et 260 °C pour l'hémicellulose et entre 280 et 500 °C pour la lignine. Les facteurs gouvernant la pyrolyse sont la masse volumique, l'humidité, l'essence de bois, la perméabilité, la concentration d'oxygène, l'orientation des échantillons par rapport au flux incident, la taille, le flux et les conditions expérimentales [33].

1.2 Inflammation du bois

De nombreux phénomènes interviennent dans le processus de dégradation thermique du bois, soulignant la complexité de l'application dans les bâtiments. Parmi tous ces phénomènes, ce travail vise notamment à étudier celui de l'auto-inflammation ; i.e l'inflammation du mélange gaz de pyrolyse/air sans source d'énergie additionnelle [26]. Dans cette partie, les différents critères et conditions expérimentales étudiant l'auto-inflammation du bois seront exposés. Les deux premières sous sections présentent les différents types d'inflammation du bois ainsi que l'effet de l'orientation des échantillons sur l'apparition de la flamme. L'objectif est de mettre en évidence que ces deux conditions expérimentales majoritairement étudiées, ont un impact très important sur tous les paramètres retenus et sur

les critères utilisés. Les trois sous sections suivantes présentent les grandeurs enregistrées lors de l’étude de l’inflammation du matériau bois telles que le temps d’inflammation, le flux critique d’inflammation et la température de surface à l’inflammation.

1.2.1 Les différents types d’inflammation

L’inflammation du matériau bois est étudiée depuis de nombreuses années. Certaines expériences conduisent à mieux comprendre ce phénomène, comme les essais au panneau radiant ou au cône calorimètre par exemple. L’énergie nécessaire à l’inflammation est apportée soit par un flux radiatif (cône, panneaux radiants) soit par un flux radiatif + convectif (contact flamme comme le SBI). Ce dernier moyen est moins approprié pour étudier l’inflammation contrairement à un dispositif qui ne génère qu’un flux radiatif (sans présence d’une flamme). Le cône calorimètre est un test largement répandu à petite échelle. Il consiste à exposer un matériau à un flux de chaleur incident généré par une résistance chauffante en forme de spire conique. Les tests à petite échelle ne peuvent pas remplacer les tests à plus grande échelle tels que les tests au four ou de façade, mais une prédiction raisonnable est possible. Plus de détails concernant le cône calorimètre seront rapportés ultérieurement dans ce mémoire.

Il existe deux types d’inflammation : pilotée (étincelle, flamme, point chaud) ou spontanée. Un état de l’art concernant l’inflammation du bois a été proposé par Babrauskas [6]. La plupart des études ont été menées avec un pilote (parfois aussi appelé “igniteur”), à la recherche des conditions pour lesquelles la pyrolyse produit suffisamment de gaz pour permettre et maintenir une combustion avec la flamme, quelle que soit la cause de l’inflammation [34].

Les résultats obtenus avec l’allumage piloté sont moins dispersés que sans, car l’inflammation se produit dès que les gaz de pyrolyse et l’air sont en bonne proportion. C’est pourquoi l’allumage piloté se produit à des flux de chaleur, des temps et des températures de surface inférieurs par rapport au cas où l’allumage n’est pas piloté.

1.2.2 L’orientation des échantillons

Tsai [35] ou encore Linteris *et al.* [36] ont montré expérimentalement pour des inflammations pilotées que l’orientation horizontale conduit à des temps d’inflammation plus courts et des pics de chaleur libérée (Heat Release Rate noté HRR) plus faibles qu’en orientation verticale. Un schéma du cône calorimètre orienté verticalement, issu des travaux de Babrauskas et Parker [37], est présenté en figure D.1 du livret des figures. Shen *et al.* [38] ont également mis en évidence les disparités importantes dans les données enregistrées au cône calorimètre. Tous mettent en évidence l’impact de l’orientation de l’échantillon avec la présence ou non de l’igniteur. Ces différences pourraient surtout s’expliquer par des mécanismes de transfert de chaleur ou d’entraînement d’air qui varient selon l’orientation. La figure 1.2 présente les principaux mécanismes lors d’un essai au cône calorimètre orienté verticalement ou horizontalement pour un échantillon enflammé.

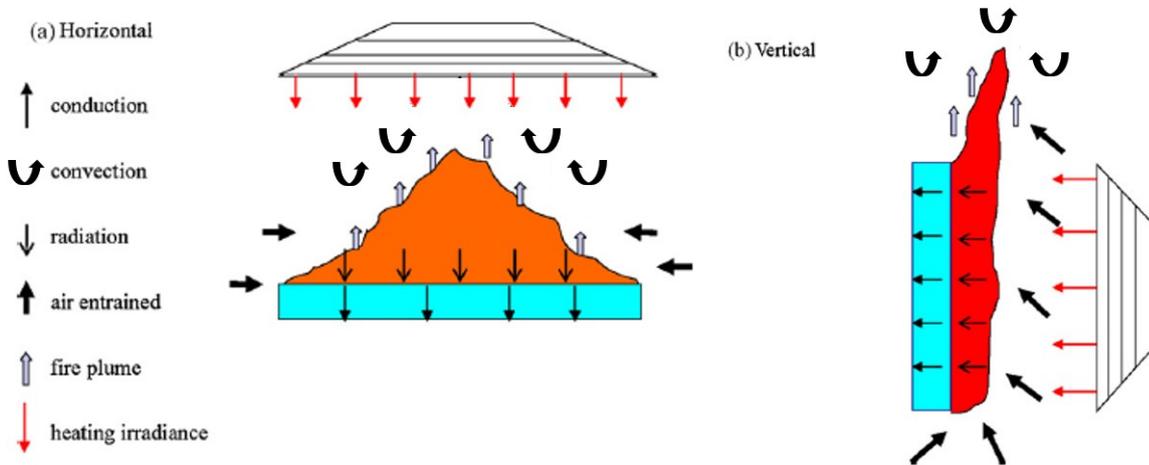


FIGURE 1.2 – Mécanismes de transfert de chaleur et d'entraînement d'air lors d'un essai au cône calorimètre orienté (a) horizontalement ou (b) verticalement [35].

Bartlett *et al.* [39] ont suggéré que les différences observées pourraient s'expliquer à la fois par une augmentation du refroidissement par convection des échantillons et par la dilution des gaz de pyrolyse en orientation verticale. Les auteurs soulignent cependant le manque de données sur l'inflammation non pilotée en orientation verticale [35; 38; 40]. Pour autant, dans des situations réelles d'incendie, il existe de nombreux cas où les produits inflammables sont soumis à des flux radiatifs élevés sans aucune autre source "d'allumage" externe (comme une flamme). Tsai [35] recommande même les tests en position verticale pour l'évaluation du comportement au feu d'un matériau car cette position serait plus destructrice lors d'un incendie que l'orientation horizontale. Il est par conséquent pertinent d'étudier quand et où l'inflammation spontanée peut se produire avec ce type d'orientation. Des travaux ont abordé la problématique de l'inflammation au travers de critères tels que le flux thermique critique nécessaire pour obtenir l'auto-inflammation et la température de surface à l'allumage [6; 41; 42]. D'autres expériences ont étudié l'auto-inflammation d'échantillons de bois selon des paramètres très variés tel qu'un flux de chaleur transitoire appliqué aux échantillons par exemple [43; 44; 45; 46]. Les résultats montrent que l'inflammation du bois peut se produire à des valeurs très différentes de celles obtenues à un flux constant puisque le processus de chauffage varie. L'étude bibliographique montre que les résultats sont déjà dispersés pour un flux de chaleur imposé constant. En conséquence, les résultats obtenus pendant cette thèse (à flux constant) ne pourront pas être comparés avec des études à flux transitoire. Dans les travaux existants, certains aspects sont peu ou pas abordés, notamment la localisation de l'apparition de la flamme. L'interrogation demeure concernant cette auto-inflammation qui se produirait dans le cœur du mélange air/gaz de pyrolyse, ou à la surface de l'échantillon, ou même à proximité des spires chaudes du cône. Dans ce dernier cas, l'allumage pourrait être considéré comme piloté par les spires du cône et non comme un véritable allumage spontané. Pour Torero [47], le mélange gaz de pyrolyse/air doit absorber suffisamment d'énergie pour que l'auto-inflammation se produise puisque aucun système ne

permet d'initier l'apparition de la flamme. Le pouvoir absorbant du gaz dépend fortement du type et de la concentration du combustible nécessitant une connaissance approfondie du champ d'écoulement. Les résultats possibles sont que les gaz chauffent plus vite que le solide ou inversement. Dans le premier cas, l'inflammation sera loin de la surface exposée au flux. Dans l'autre cas, l'inflammation sera proche de l'échantillon car la surface agit comme une source de chaleur. Crémona [48] a utilisé une caméra rapide visible pour localiser l'auto-inflammation et a souligné que l'inflammation par les spires chaudes peut se produire à proximité du cône lorsque celui-ci est orienté horizontalement. Dans le second cas où l'auto-inflammation se produit à proximité de la surface, l'inflammation est pilotée par la surface de l'échantillon, mais cette inflammation n'est pas due à une cause externe et peut toujours être considérée comme spontanée. Un tel allumage initié par la surface chaude de l'échantillon a également été rapporté par Kashiwagi *et al.* [49]. Boonmee et Quintiere [41] ont souligné que deux types d'allumage se produisent en orientation verticale lors de l'utilisation d'un cône calorimètre : une inflammation dans les gaz pour les flux de chaleur élevés et un allumage proche de la surface pour les flux de chaleur faibles. Cette dernière remarque pourra être confirmée avec les nombreux essais réalisés lors de cette thèse.

1.2.3 Le flux critique d'inflammation

Le flux critique d'inflammation est souvent utilisé comme critère pour caractériser l'inflammation du bois [37]. Selon la norme 5660-1 régissant les tests au cône calorimètre [50], il s'agit du flux de chaleur le plus faible capable de chauffer la surface d'un matériau à sa "température d'inflammation". Cette donnée peut être déterminée en menant plusieurs expériences en diminuant progressivement le flux de chaleur jusqu'à ne plus observer d'inflammation sur une durée d'exposition raisonnablement longue (de l'ordre de 30 minutes [50]). L'expérience inverse peut être envisagée en augmentant le flux de chaleur jusqu'au moment où l'inflammation se produit. Pour une orientation horizontale de l'échantillon, le flux de chaleur critique d'auto-inflammation se situe dans la gamme de 25 à 33 kW.m⁻² et autour de 10 à 15 kW.m⁻² pour l'inflammation pilotée [39]. D'autre part, il a été également observé lors de tests au cône calorimètre en position horizontale que l'inflammation pouvait être provoquée par les spires du cône [48]. Il n'est donc pas exclu que les flux critiques d'auto-inflammation en orientation horizontale soient sous-estimés lorsque l'inflammation est causée par les spires du cône. En orientation verticale, des flux critiques d'inflammation plus élevés ont été rapportés (28 kW.m⁻² pour l'allumage piloté et 63–79 kW.m⁻² pour l'auto-allumage, selon le travail de Hottel et Wilkes [51]). Shields *et al.* [52] ont mené une campagne expérimentale sur trois types d'échantillon de bois au cône calorimètre en utilisant une flamme pilote, un igniteur ou l'inflammation spontanée ainsi qu'en variant l'orientation du dispositif. Les résultats montrent que les délais et les flux d'auto-inflammation les plus importants sont obtenus en orientation verticale. En effet, dans ces conditions le flux critique pour lequel l'auto-inflammation se produit est de 40 kW.m⁻². De plus, à flux de chaleur appliqué identique, les temps d'allumage sont tou-

jours plus courts en orientation horizontale [35; 39; 52] qu'en verticale. Lors d'une étude d'échantillons de bois orientés verticalement au cône calorimètre, Boonmee et Quintiere [53] ont mis en évidence deux types d'inflammation selon que le flux du chaleur appliqué soit inférieur ou supérieur à 40 kW.m^{-2} . En dessous de 40 kW.m^{-2} , les échantillons se dégradent par la combustion solide du charbon. Dans certains cas et à des temps longs il est possible d'observer l'apparition d'une flamme au niveau de la phase solide du combustible. Par exemple, pour un flux appliqué de 27 kW.m^{-2} , l'auto-inflammation a été observée après 1000 secondes d'exposition. Au dessus de 40 kW.m^{-2} , l'apparition de la flamme est rapide et se produit surtout au niveau des gaz de pyrolyse. Ce type d'auto-inflammation a été mis en évidence par des photos montrant un "flash" entre le cône et les échantillons au moment de l'apparition de la flamme.

1.2.4 Le temps d'inflammation

Selon Quintiere [54], l'inflammation des solides est régie par le temps d'inflammation, noté t_{infl} , qui dépend de trois dimensions temporelles : le temps de pyrolyse (t_{py}), le temps de mélange (t_{mix}) et le temps chimique (t_{chim}). Le temps de pyrolyse est lié à l'échauffement et à la production de gaz, soit le temps de chauffage nécessaire afin d'atteindre la température de pyrolyse permettant de produire un mélange de gaz inflammables. Le temps de mélange dépend à la fois du transport des gaz de pyrolyse de la zone solide vers la surface du matériau et de ce même transport de la surface jusqu'à la zone réactionnelle en phase gazeuse. Enfin le temps chimique dépend quant à lui de la vitesse des réactions chimiques. Quintiere [54; 55] définit t_{infl} comme étant la somme des trois temps définis précédemment ($t_{infl} = t_{py} + t_{mix} + t_{chim}$).

De manière générale, les résultats montrent que le temps d'apparition de la flamme dépend du flux de chaleur imposé [56; 57]. En effet, ce temps diminue lorsque la sollicitation augmente. Par exemple, les expériences de Bilbao [56] ont montré que l'auto-inflammation du bois en orientation horizontale se produisait après respectivement 32 et 10 secondes d'exposition à des flux de $44,3$ et 62 kW.m^{-2} . Pour Reszka et Torero [58], l'auto-inflammation du bois (ici du pin sylvestre) étudié au cône en orientation verticale se produit 40 secondes après une exposition à 60 kW.m^{-2} . Shields *et al.* [52] ont enregistré des temps d'auto-inflammation pour des échantillons d'épicéa de 47 et 15 secondes pour des flux imposés de 50 et 70 kW.m^{-2} respectivement. Une fois de plus, le temps d'auto-inflammation enregistré dépend des conditions expérimentales. Pour un flux quasi identique (62 kW.m^{-2} en horizontal et 60 kW.m^{-2} en vertical), ce temps peut être multiplié par quatre selon l'orientation de l'échantillon.

Actuellement il existe de nombreux modèles empiriques ou théoriques visant à prédire le temps d'inflammation pilotée des matériaux bois [59]. Ces modèles dépendent principalement de la température de surface à l'inflammation T_{infl} , de la température ambiante T_0 , du flux incident \dot{q}''_{inc} et des propriétés du bois (la masse volumique ρ , la conductivité thermique λ , la chaleur spécifique C_p et l'épaisseur de l'échantillon L). En revanche, Shi et Chew [42] précisent qu'il existe peu ou pas de modèle empirique sur le temps

d'apparition de la flamme pour l'auto-inflammation. Le tableau en annexe D.1 présente quelques modèles existant pour l'inflammation pilotée. Quintiere [60], Atreya et Abu-Zaid [61] ont obtenu un résultat similaire selon lequel le temps d'inflammation pilotée varie linéairement avec $\lambda\rho C_p[(T_{infl} - T_0)/\dot{q}_{inc}'']^2$. Les équations mentionnées ci-dessus pour l'inflammation pilotée sont présentées dans le livret. De manière générale, celles-ci peuvent s'écrire [42] :

$$t_{infl} = a_1 \lambda \rho C_p \left(\frac{T_{infl} - T_0}{\dot{q}_{inc}''} \right)^2 \quad (1.2)$$

où a_1 est un paramètre d'ajustement. Un autre type de corrélation empirique proposée par Harada [62], suggère une relation linéaire entre t_{infl} et $\lambda\rho C_p/\dot{q}_{inc}''^3$:

$$t_{infl} = a_2 \left(\frac{\lambda \rho C_p}{\dot{q}_{inc}''^3} \right) + b_3 \quad (1.3)$$

avec a_2 et b_3 des paramètres d'ajustement. Le coefficient a_1 dans l'équation de Quintiere est de $2/3$, et $\pi/4$ dans l'équation d'Atreya et d'Abu-Zaid. Dans l'état de l'art de Babrauskas, une corrélation de l'inflammation pilotée regroupant les données de la littérature ainsi que les effets de la masse volumique (de 170 à 850 kg.m⁻³), de l'orientation (horizontale ou verticale) et de l'humidité a été trouvée. Il a été constaté que le temps d'inflammation piloté du bois est proportionnel à $\rho^{0,73}/(\dot{q}_{inc}'' - 11)^{1,82}$. Dans cette équation, si $\dot{q}_{inc}'' \rightarrow 11$ alors $t_{infl} \rightarrow \infty$ pour l'inflammation pilotée. Cela signifie que le flux critique d'inflammation pilotée se situe aux alentours de 11 kW.m⁻². Shi et Chew [42] se sont basés sur cette corrélation ainsi que sur le flux critique d'auto-inflammation de Mehaffey [63] (28 kW.m⁻² en orientation horizontale) pour en déduire la corrélation 1.4 :

$$t_{infl} = a_4 \frac{\rho^{0,73}}{(\dot{q}_{inc}'' - 28)^{1,82}} \quad (1.4)$$

avec a_4 un coefficient égal à 144 d'après les travaux sur l'auto-inflammation du bois en orientation horizontale à l'échelle du cône [42]. En revanche, il ne semble pas exister de modèle qui permettent de prédire le temps d'auto-inflammation en orientation verticale.

1.2.5 La température d'inflammation des échantillons

Généralités

La température d'inflammation, T_{infl} est considérée comme étant la température de surface au moment où la flamme apparaît. Elle est cruciale pour les calculs d'ingénierie [34] mais d'un point de vue fondamental, la pertinence de ce paramètre est discutable. Cette donnée est en effet fortement liée au temps d'inflammation correspondant au moment de l'apparition de la flamme. Cependant, la détermination de cette température pour le bois s'avère difficile et conduit à des données très dispersées. En effet, en plus des conditions expérimentales qui peuvent conduire à des différences majeures concernant ces températures, la technique de mesure elle-même peut conduire à des biais très im-

portants. Tran et White [64] ont d’ailleurs qualifié cette donnée comme étant difficile à mesurer avec précision (“very elusive quantity and difficult to measure accurately”). Là encore, la caractérisation de l’auto-inflammation (et en particulier de la localisation de celle-ci) permettrait de mieux comprendre l’origine de cette dispersion. En effet, il a été évoqué précédemment que, dans certains cas, l’inflammation pouvait être initiée par les spires du cône, en particulier en orientation horizontale. Les températures de surface enregistrées au moment de l’inflammation s’avèreraient alors être sous-estimées. Dans l’état de l’art sur l’inflammation du bois, Babrauskas [6] propose un récapitulatif des gammes de températures d’inflammation existantes. Pour l’auto-inflammation, la température de surface à l’inflammation varie entre 240 et 800 °C en fonction de la technique de mesure employée. La mesure de la température d’inflammation est généralement réalisée par deux techniques : par un thermocouple placé sur la surface de l’échantillon exposée au flux ou par des caméras infrarouges ou pyromètres. Ces deux techniques sont très différentes en pratique puisque les thermocouples sont des mesures intrusives qui peuvent perturber l’écoulement des gaz inflammables proches de l’échantillon. La mesure par caméra infrarouge est quant à elle non intrusive mais les données enregistrées dépendent fortement des propriétés optiques des matériaux ainsi que de l’environnement ambiant tel que la source de flux de chaleur. Même si les valeurs de température peuvent être très différentes d’une étude à une autre, la majeure partie des auteurs affirment que l’augmentation du flux de chaleur diminue la température d’inflammation tout comme le temps d’inflammation.

Mesure par thermocouples

Dans de nombreux travaux, la température de surface à l’inflammation est mesurée à l’aide de thermocouples positionnés directement sur la surface. Cependant, une telle mesure est soumise à plusieurs causes d’incertitude car un bon contact thermique thermocouple/surface est difficile à réaliser en particulier lorsque le temps d’exposition au flux de chaleur augmente [64]. En effet, l’exposition du bois à un flux peut engendrer des déformations et même une régression de la surface exposée due à la combustion du charbon. La mesure par thermocouple risquerait d’être fortement biaisée si l’inflammation se produit à des temps long. De plus, le thermocouple est à la fois soumis au flux d’air/gaz de pyrolyse et exposé au flux de chaleur radiatif provenant du cône. Ce flux d’air froid entraîné pourrait refroidir le thermocouple et donc sous-estimer la température jusqu’à 280 °C selon les essais de Farhni *et al.* [65] effectués dans un four. Shen *et al.* [38] ont montré que la température de surface des matériaux bois pouvait varier de 240 à 400 °C au moment de l’inflammation. Shi et Chew [42] ont mesuré la température d’auto-inflammation du pin par thermocouple (type N) entre 300 et 560 °C. Cette température de surface au moment de l’inflammation diminue lorsque le flux appliqué augmente. Atreya *et al.* ont par exemple utilisé un thermocouple chromel/alumel (type K) placé au niveau de la surface exposée au flux du cône. Des températures moyennes d’inflammation de 365 et 375 °C ont été trouvées pour le chêne rouge et l’acajou dans les orientations verticale et horizontale. Mais d’après Fangrat *et al.* [66], les valeurs moyennes des températures de surface au moment de l’inflammation varient sur une plage de plus de 100 °C pour un même matériau

orienté différemment. Cette observation a également été mise en évidence par Torero [47] qui écrit que les différents types d'auto-inflammation peuvent conduire à des variations de 150 °C sur la température d'inflammation. L'orientation semble donc également avoir un effet non négligeable sur les températures d'inflammation. Les valeurs en orientation verticale sont généralement beaucoup plus élevées. Cependant, les auteurs mettent en évidence qu'une étude plus approfondie est nécessaire pour clarifier les phénomènes mis en jeu concernant l'auto-inflammation en orientation verticale.

Mesure par méthode optique

Dans certaines études, les températures de surface à l'inflammation ont été mesurées au moyen de pyromètres ou de caméras infrarouges [41; 66]. Les valeurs obtenues semblent systématiquement plus élevées (entre 400 et 600 °C) que les températures mesurées avec des thermocouples (entre 250 et 400 °C) [39]. En revanche, les températures de surface à l'inflammation restent là encore très dispersées, comme le montre le travail de Boonmee et Quintiere [53] (figure 1.3), qui compare les températures d'auto-inflammation et d'inflammation pilotée en fonction du fil du bois (parallèle ou perpendiculaire au flux). Ces températures ont été mesurées à l'aide d'une caméra infrarouge.

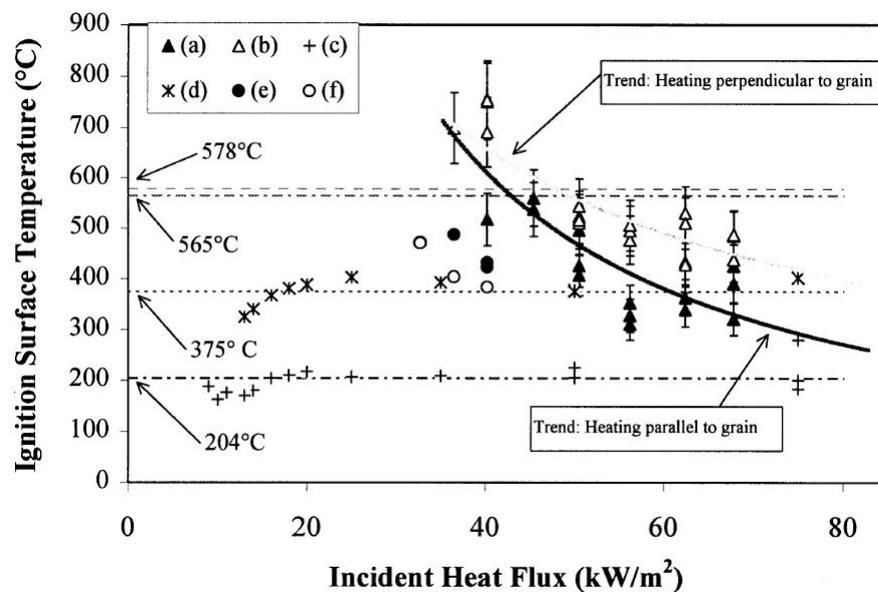


FIGURE 1.3 – Température de surface à l'inflammation en fonction du flux de chaleur incident. Auto-inflammation : (a) parallèle, (b) perpendiculaire; inflammation pilotée : (c) parallèle), (d) perpendiculaire; combustion solide : (e) parallèle, (f) perpendiculaire [53].

La figure présente une gamme de température de surface allant de 300 à 800 °C pour l'auto-inflammation du bois en orientation verticale, la majeure partie des températures étant entre 375 et 565 °C.

Les principales difficultés associées à l'utilisation de la pyrométrie infrarouge sont la variation de l'émissivité de la surface de l'échantillon qui évolue avec la longueur d'onde et la température ainsi que la présence de gaz de pyrolyse entre la caméra et l'échantillon.

Des études à petite échelle ont montré que les principaux gaz présents pendant la décomposition du bois étaient le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH_4), et l'eau (H_2O). Concernant l'émissivité, la majeure partie des études réalisées jusqu'à présent utilise une valeur de 0,9 ou 1 [67]. Boulet *et al.* [68] ont étudié la variation spectrale de l'absorptivité (l'émissivité) du bois en cours de dégradation. La figure 1.4 présente l'absorptivité spectrale d'échantillon de contreplaqué soumis à différents flux de chaleur pendant un temps déterminé.

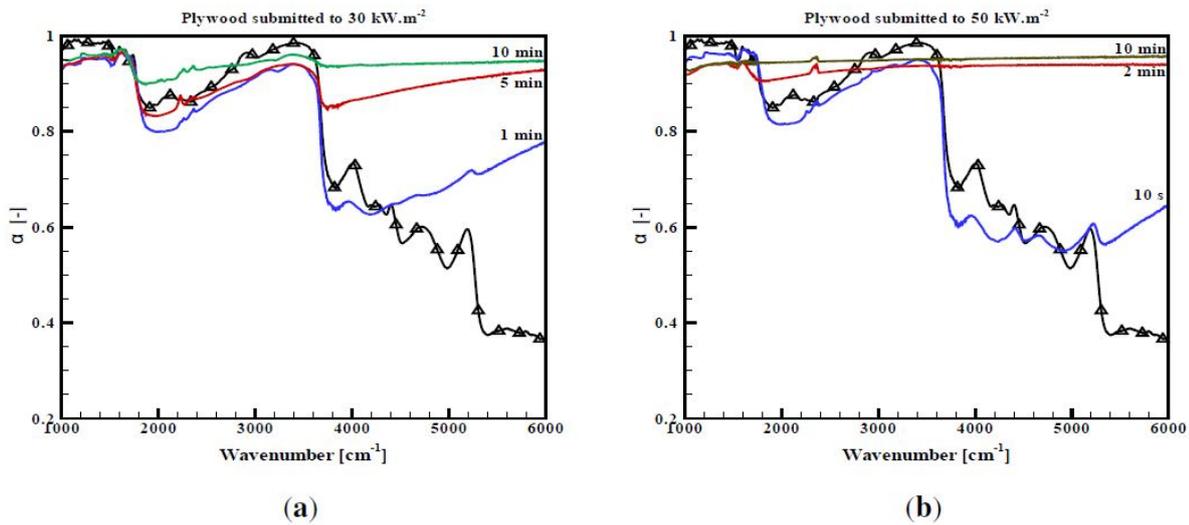


FIGURE 1.4 – Absorptivité d'un échantillon de contreplaqué soumis à une dégradation thermique pendant les temps prescrits [68]. (a) Flux incident de 30 kW.m^{-2} ; (b) flux incident de 50 kW.m^{-2} .

L'absorptivité du contreplaqué évolue en fonction de la longueur d'onde, du flux imposé ainsi que de la durée d'exposition. Lorsque la durée d'exposition augmente, l'absorptivité de la surface exposée tend vers un comportement de type "corps gris" avec une valeur de l'ordre de 0,95. Ce phénomène tend à s'accélérer lorsque le flux incident augmente. L'hypothèse du corps gris peut être émise après 2 minutes d'exposition à 50 kW.m^{-2} (après 10 minutes pour 30 kW.m^{-2}). Une étude de Försth et Roos [69] a également montré la variation de l'absorptivité moyenne du contreplaqué pour un flux de chaleur de 30 kW.m^{-2} durant les 2 premières minutes d'exposition. La figure 1.5 présente la variation de l'absorptivité calculée dans l'infrarouge et dans le visible.

Dans le visible, l'absorptivité du bois augmente avec le temps d'exposition au flux puisque celui-ci noircit. En revanche, dans l'infrarouge, cette absorptivité a tendance à diminuer avec l'augmentation du temps d'exposition. Les travaux de Boulet *et al.* [68] et de Försth et Roos [69] montrent que l'absorptivité du bois (et donc l'émissivité) diminue en début de l'expérience avant de remonter et de retrouver une valeur proche de 0,9. Ce comportement peut s'avérer problématique si la température de surface à l'inflammation est mesurée par des moyens optiques et que l'apparition de la flamme se produit à des temps courts. L'absorptivité varie donc en fonction des échantillons de bois même si celle-ci peut être comprise entre 0,9 et 0,98 indépendamment de l'espèce du bois après quelques minutes d'exposition au flux de chaleur [70]. Enfin Chaos [71] montre que l'émissivité du

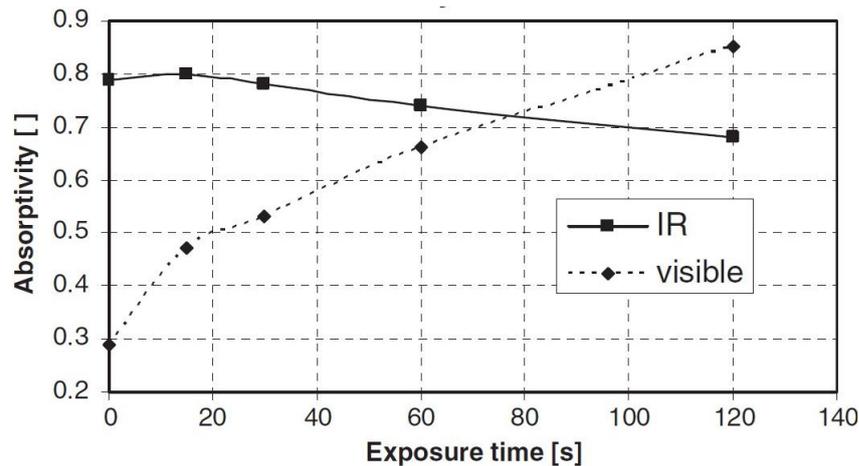


FIGURE 1.5 – Absorptivité d'un échantillon de contreplaqué soumis à un flux de $30 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 120 secondes [69].

bois feuillu (hardwood) varie principalement entre 0,8 et 1. Cette variation peut engendrer une erreur de 8 % sur la mesure de la température de surface en particulier quand le bois passe de vierge à charbonné. Chaos a également mis en évidence que l'émissivité pouvait descendre en dessous de 0,2 pour des longueurs d'onde inférieures à $2 \mu\text{m}$.

1.3 Dégradation du bois

Il existe de nombreux travaux théoriques qui visent à prédire l'évolution de la dégradation du bois sous une agression thermique. Cependant les facteurs influençant la dégradation sont complexes et très nombreux. Ces recherches sont généralement menées à l'échelle de la matière, c'est-à-dire à une échelle bien plus petite que celle du matériau [72; 73; 74; 75], et sortent donc du cadre de ce travail de thèse. L'étude bibliographique ci-après se focalise donc davantage sur les comportements globaux du bois en cours de dégradation, en particulier sur la perte en masse, l'évolution de la couche de charbon et les gradients thermiques internes.

1.3.1 La perte en masse

La perte en masse est une donnée très souvent mesurée, en particulier pour des essais à petite échelle tels que le cône calorimètre. Elle donne accès à la vitesse de perte en masse par unité de surface (Mass Loss Rate Per Unit Area en anglais), noté MLRPUA dans le manuscrit. Le MLRPUA sert, entre autre, de donnée de comparaison pour les modèles théoriques [57; 72]. Au niveau expérimental, cette donnée permet par exemple de mettre en évidence l'efficacité d'un produit retardant dans le bois, de comparer le comportement des essences de bois face à un flux de chaleur ou l'influence de l'agression thermique sur une même essence de bois [64]. La figure 1.6 décrit l'allure générale du MLRPUA pour un échantillon de bois exposé à un flux de chaleur constant de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Généralement, un pic de MLRPUA est observé en début d'expérience suivi d'un régime

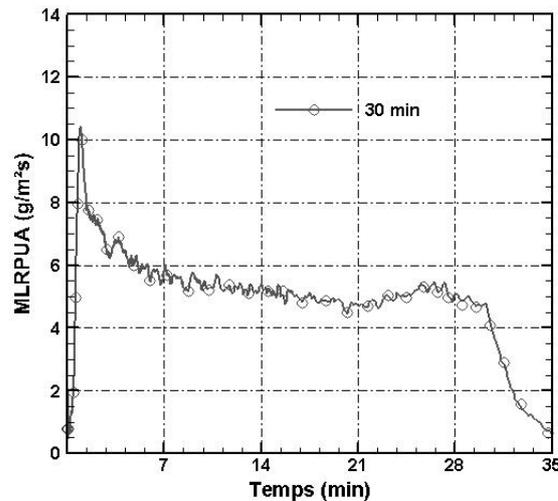


FIGURE 1.6 – Évolution du MLRPUA d'un échantillon de bois pour une exposition de 30 minutes à 60 kW.m^{-2} .

quasi-stationnaire qui décroît légèrement tout au long du test. Ce type de comportement est dû à une dégradation très rapide du bois vierge au début du test. Sous l'effet de la pyrolyse, le bois se dégrade en gaz de pyrolyse, condensats goudronneux et charbon. Au fur et à mesure que le bois se dégrade, il y a formation d'une couche de charbon dont l'épaisseur ne cesse de croître jusqu'à l'apparition de la combustion. De par ses propriétés thermique et physique, cette couche de charbon tend à isoler le bois vierge restant de l'agression thermique. Il en résulte une diminution de la perte en masse vers un régime quasi-stationnaire [53]. Un second pic de MLRPUA peut également apparaître lors des essais [42; 53; 76]. Ce second pic traduit un emballement de la dégradation du bois, qui se produit généralement pour des échantillons ayant une faible épaisseur. De nombreuses études ont souligné que l'intensité de la flamme en début d'expérience était forte tout comme la dégradation du bois. Cette intensité diminue ensuite à cause de la production entre autre de la couche de charbon [27; 59].

1.3.2 Position du front de charbon et vitesse de carbonisation

Comme présenté en section 1.1.4, le bois soumis à une sollicitation thermique va pyrolyser et se transformer en charbon [77]. La figure 1.7 permet de visualiser un exemple de bois dégradé avec la présence d'une couche de charbon.

Trois zones peuvent être dissociées, le bois vierge protégé par la couche de charbon et entre les deux la zone de pyrolyse où le bois vierge se transforme en charbon. La position du front de charbon est ici considérée comme étant la limite entre la couche de charbon et la zone de pyrolyse. La mesure de la position permet de déduire la vitesse de progression de ce front de charbon, appelée vitesse de carbonisation. Cette vitesse de carbonisation est un paramètre pertinent dans l'étude de la dégradation du bois.

L'état de l'art récent de Bartlett *et al.* [39] sur les facteurs affectant le comportement de la

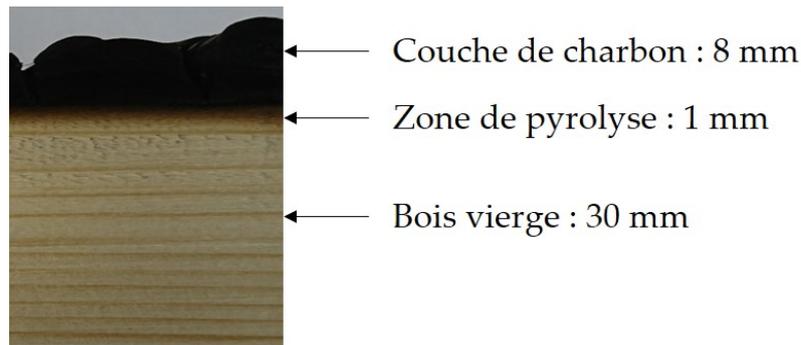


FIGURE 1.7 – Photo d'un échantillon de bois dégradé après une exposition à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 10 minutes.

combustion du bois a montré un taux de carbonisation variant entre $0,4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le bois dur (feuillus) et $0,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour le bois tendre (résineux). La valeur généralement utilisée en sécurité incendie est de $0,65 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [78; 79]. La profondeur de charbon et le taux de carbonisation des échantillons de bois sont souvent mesurés lors des essais au cône calorimètre. En revanche, les conditions expérimentales telles que le flux de chaleur imposé, l'orientation des échantillons, les essences de bois et même les fissures influencent cette vitesse de carbonisation. Xu *et al.* ont exposé cinq essences de bois horizontalement au cône calorimètre à différents flux de chaleur et temps d'exposition [80]. Après avoir coupé chaque échantillon, Xu *et al.* ont mesuré la couche de charbon et ont déduit le taux de carbonisation pour différentes essences de bois. La figure 1.8 présente des évolutions de la vitesse de carbonisation pour différentes essences de bois en fonction du flux appliqué.

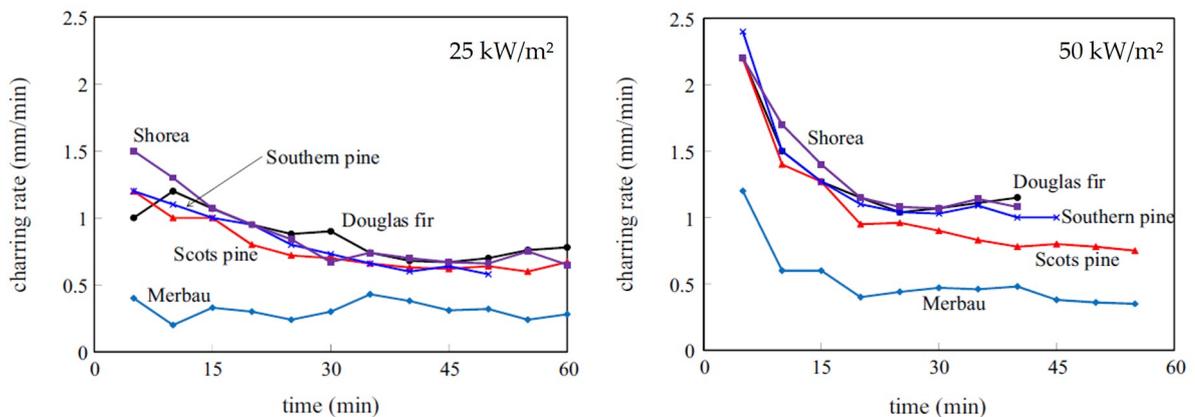


FIGURE 1.8 – Évolution de la vitesse de carbonisation pour deux flux imposés (25 et $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) en fonction de l'essence de bois [64].

Ce travail montre que quelle que soit l'essence de bois, le taux de carbonisation augmente avec le flux de chaleur. Pour un flux de $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, la vitesse de carbonisation est élevée au début de l'expérience puis diminue au cours du temps jusqu'à atteindre une valeur quasi constante. La vitesse de carbonisation déduite pour un flux égal à $25 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ présente une évolution similaire à celui de $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ avec des valeurs moins élevées en début d'expérience. D'autres études ont établi des modèles empiriques pour

décrire la position du front de charbon en fonction du temps d'exposition. On peut citer le modèle de l'avancement du front de charbon utilisé dans l'ingénierie [81; 82], présenté dans l'équation 1.5 :

$$t = mX_c^a \quad (1.5)$$

où m et a sont des paramètres estimés à partir de la position du front de charbon X_c en fonction du temps d'exposition t . Si $a = 1$, la relation est linéaire et le coefficient m est la réciproque du taux de carbonisation. La position du front de charbon est régulièrement déduite à partir de l'isotherme à 300 °C, mesuré par des thermocouples pour différents types de tests [39; 83]. Lizhong *et al.* [43] ont montré par cette mesure que le front de charbon évoluait selon une loi de puissance lorsque le flux de chaleur est constant.

La majeure partie des travaux expérimentaux s'accordent pour dire que l'orientation du bois (horizontale ou verticale) a une influence majeure sur la vitesse de carbonisation [84; 39], même si Mikkola [85] affirme, à l'inverse, que l'évolution de la couche de charbon est identique quelle que soit l'orientation, à l'échelle du cône.

Lorsque les échantillons se dégradent, le bois aura plus tendance à se fissurer au niveau de la surface exposée au flux. Schaffer [86] a trouvé que les fissures dans les couches de charbon dépendent de la température d'exposition et de la masse volumique du bois. Si la température est élevée, les fissures sont plus grandes et la couche de charbon est plus profonde. La largeur des fissures peut varier de 2 à 15 mm selon le flux appliqué sur la surface d'après Urbas *et al.* [67]. La masse volumique du bois, les essences de bois ou le type de chauffage (flux de chaleur croissant dans le temps, flux de chaleur constant, four) sont des paramètres qui peuvent induire une variation de l'évolution du taux de carbonisation [87; 88; 89]. White et Tran [89] ont par exemple mis en évidence la dépendance avec l'essence de bois et surtout avec le flux de chaleur appliqué de la vitesse de carbonisation. En effet, celle-ci pouvait passer de 0,5 à 0,77 mm.min⁻¹ pour les échantillons de pin lorsque le flux imposé passe de 15 à 55 kW.m⁻².

Les travaux de la présente thèse étudieront l'avancée du front de charbon sur deux essences de bois. Une attention particulière sera attribuée à la mesure de l'isotherme à 300 °C afin d'étudier, entre autre, l'effet du flux de chaleur imposé sur la vitesse de carbonisation et donc sur la dégradation des échantillons.

1.3.3 L'évolution de la température

Les variations des températures sont les principaux "symptômes" de la dégradation d'un matériau. En effet, pour chacun des phénomènes classiquement rencontrés dans la dégradation du bois (pyrolyse, évaporation, combustion solide, inflammation, auto-extinction,...), on peut y associer une variation plus ou moins marquée de la température au niveau de la surface et/ou au sein de l'échantillon. Seulement les difficultés et aussi l'approche peuvent être différentes selon la température désirée (surface ou interne) du bois. La mesure de la température de surface a déjà été présentée en section 1.2.5 mais seulement pour un temps précis, au moment de l'apparition de la flamme. Cette sous sec-

tion présente les articles qui se sont penchés sur la température de surface et en profondeur pendant la dégradation des échantillons de bois.

La température de surface

La température de surface, notée T_{surf} , est généralement mesurée afin de déterminer la température d'inflammation du bois. Les mesures sont souvent réalisées avec des thermocouples disposés contre la surface exposée à l'agression thermique comme présenté en section 1.2.5. En revanche, le suivi de la température de surface devient plus compliqué lorsque le temps d'exposition augmente. En effet, comme évoqué précédemment, le maintien du contact entre le thermocouple et la surface du bois, qui a tendance à se déformer et même à régresser suite à sa dégradation devient difficile [64; 90]. Une figure issue des travaux de Tran [64] est disponible en figure D.2 dans le livret, montrant les fluctuations de la température de surface mesurées par thermocouple. Les conclusions du travail de Urbas [90] recommandent d'ailleurs de ne pas utiliser de thermocouple pour la mesure de la température de surface des matériaux combustibles.

D'autre part, Boonmee et Quintiere [53] ont mesuré l'évolution de la température de surface de l'échantillon de bois à l'aide d'une caméra infrarouge placée en face arrière des spires chaudes d'un cône en orientation verticale (voir annexe D.1 pour la configuration du cône vertical). Ces auteurs ont, entre autre, fait varier les flux de chaleur (de 10 à 70 kW.m^{-2}) afin d'observer l'impact sur l'évolution de la température de surface et utilisé le modèle intégral de Spearpoint et Quintière [59]. Les mesures montrent une croissance rapide de la température de surface en début d'expérience suivie d'un plateau qui continue d'augmenter légèrement dans le temps. Ce plateau atteint par exemple une valeur de 700 °C au bout de 100 secondes d'exposition à 50 kW.m^{-2} et augmente jusqu'à 775 °C après 1500 secondes d'exposition au flux de chaleur. Le même type de mesure a été réalisé par Urbas *et al.* [90] avec un pyromètre sur différents matériaux avec des flux de 30 et 50 kW.m^{-2} . Le dispositif expérimental est un cône calorimètre à l'échelle intermédiaire orienté verticalement (les échantillons étaient aux dimensions du cône, 100 × 100 mm). La figure 1.9 montre les évolutions de la température de surface de l'épicéa à 30 et 50 kW.m^{-2} . L'émissivité de la surface de l'échantillon est fixée à 1.

Pour 30 kW.m^{-2} , l'évolution de la température peut se résumer en deux zones : une première allant jusqu'à 600 °C avec un changement de pente à 350 °C dû à l'apparition de la combustion du charbon au niveau de la surface. La deuxième zone est la partie quasi constante (600 °C à 200 secondes et 700 °C à 800 secondes) de la température de surface. Pour un flux de 50 kW.m^{-2} , la température de surface augmente rapidement jusqu'à atteindre une température de 700 °C. Un léger changement de pente est observé vers 300 °C, traduisant également le début de la combustion du charbon. Les courbes représentant la température de surface par pyromètre et thermocouples montrent des fluctuations importantes au niveau de la phase plateau. Ces fluctuations sont dues à la présence de la flamme située entre l'échantillon et l'appareil de mesure. En conséquence, le pyromètre semble mesurer une température correspondant à l'émission propre de l'échantillon combinée à celle de la flamme. Une mesure éliminant la contribution de la flamme permettrait

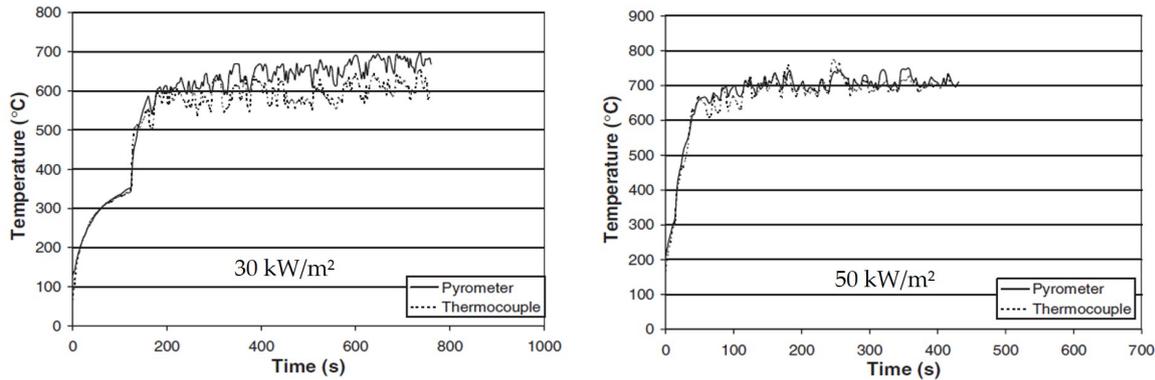


FIGURE 1.9 – Évolution de la température de surface de l'épicéa en orientation verticale pour des flux de 30 et 50 kW.m⁻² [90].

de mieux estimer la température de surface des échantillons de bois.

Certaines études ont montré que l'émission des flammes est prédominante dans des longueurs d'onde spécifiques. L'émission des flammes est présente sur tout le spectre infrarouge et dépend de la nature du combustible (kérosène, gaz, bois) ainsi que de son épaisseur [91]. Parent *et al.* [92] ont caractérisé l'émission de la flamme issue d'un feu de végétaux à l'aide d'une caméra infrarouge équipée de filtres à des longueurs d'onde précises (7,83 μm pour le H₂O, 4,45 μm pour le CO₂ et 3,8 μm pour les suies) et d'un spectromètre infrarouge. Les images infrarouges, disponibles en figure D.3 du livret, sont très différentes en raison des filtres qui isolent la contribution des gaz et/ou des suies. La figure 1.10 présente l'intensité spectrale émise par la flamme provenant d'un mélange de branches de vigne et de litière d'excelsior dans un bac de 50 cm de côté et 10 cm de hauteur. Les mesures d'intensité et de caméra infrarouge étaient réalisées 10 cm au dessus du foyer.

Il est possible d'observer : un pic autour de 2300 cm⁻¹ attribué à l'émission par le CO₂, des émissions liées à la contribution de H₂O dans les gammes [1200 cm⁻¹ – 2000 cm⁻¹] et [3300 cm⁻¹ – 4200 cm⁻¹], et enfin une faible émission en dehors de ces bandes, émission attribuée aux suies présentes dans la flamme. Ce travail montre que, pour des petits foyers de bois, la contribution du rayonnement émis par les suies est faible. C'est notamment le cas à l'échelle du cône en orientation verticale où la faible épaisseur des flammes (de l'ordre du centimètre) conduit à une émission de rayonnement par les suies négligeable. La précision de la mesure de température de surface par caméra IR pourrait alors être grandement améliorée en se focalisant sur une zone spectrale dans laquelle la flamme serait "transparente" (3,9 μm par exemple) [92; 93].

La température dans le matériau

La détermination de la température au sein du matériau bois en cours de dégradation est cruciale pour le développement et la validation de modèles thermiques [59] et/ou, mécaniques [94]. Cela garantirait une meilleure prise en compte de la tenue au feu lors

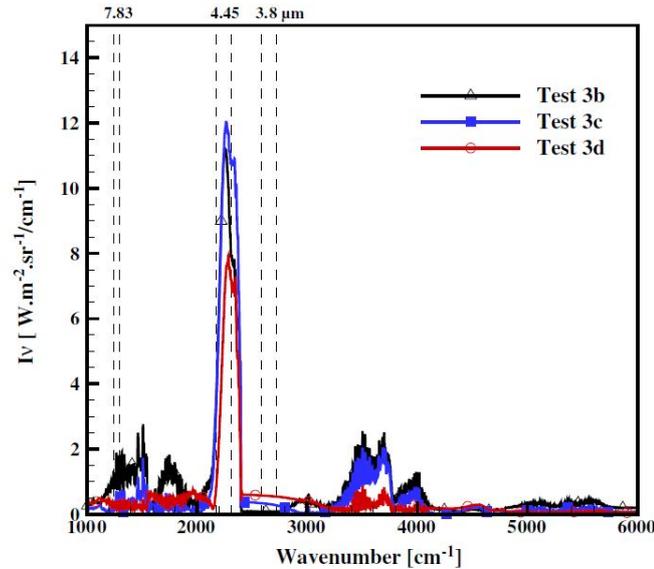


FIGURE 1.10 – Intensité spectrale émise dans la flamme à 10 cm au-dessus de la végétation en feu pour trois tests différents [92].

du dimensionnement et la conception des structures bois. La mesure de la température au sein du matériau est réalisée à l'aide de thermocouples. La précision de la mesure est cependant très difficile à garantir tant les sources d'erreurs sont importantes [65] : type de thermocouple utilisé (gainé ou nu), taille, implantation exacte, inertie, orientation par rapport aux isothermes, dissipation thermique le long du thermocouple, contact imparfait avec l'échantillon,...

À titre d'exemple, Fahrni *et al.* [95] ont mené une étude comparative sur la mesure de température interne de panneaux de bois de CLT soumis à la courbe feu ISO 834 [96]. Jusqu'à neuf combinaisons différentes (type de thermocouple/mode d'implantation) ont été étudiées : thermocouple gainé ou filaire (non gainé), nature de jonction chaude (soudée ou torsadée), thermocouple inséré dans des trous ou incrusté dans l'échantillon, diamètre maximal du thermocouple (diamètre de la gaine ou diamètre des fils, y compris l'isolation électrique), diamètre des trous et orientation du thermocouple. La figure 1.11 présente un exemple de l'évolution de la température en fonction de l'implantation des thermocouples pour un feu suivant la courbe ISO-834.

Pour une même profondeur, les évolutions de température varient fortement en fonction du type de thermocouple utilisé et du mode d'implantation. Les thermocouples gainés enregistrent des valeurs inférieures à celles des thermocouples non gainés. À 6 et 30 mm de profondeur, la différence de température est flagrante pour le thermocouple non gainé placé pendant l'usinage du bois. Les différences de températures peuvent s'élever jusqu'à 400 °C.

Il en ressort néanmoins que les valeurs de température les plus élevées (et les plus fiables a priori) ont été obtenues lorsque le corps du thermocouple (nu ou gainé) était implanté parallèlement aux isothermes. Ce choix d'implantation permet en effet de minimiser le transfert de chaleur le long du corps du thermocouple. Certaines études datant des an-

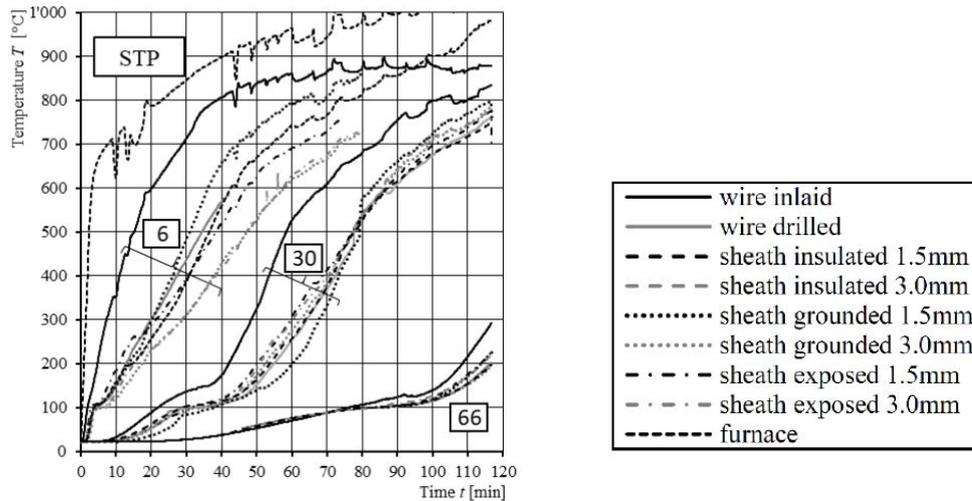


FIGURE 1.11 – Thermogrammes issus des travaux de Fahrni *et al.* obtenus à différentes profondeurs suite à l'exposition d'un panneau de CLT sous feu ISO en fonction du type de thermocouple implémenté [95].

nées 1960 recommandaient déjà de placer les thermocouples perpendiculairement au flux de chaleur exposé (ou parallèle aux isothermes) [97; 98]. Cependant, pour des raisons pratiques, les thermocouples sont généralement placés dans les échantillons en forant des trous parallèles au flux de chaleur, c'est-à-dire perpendiculaires à la surface du bois exposée. Ce mode d'implantation par perçage est certes simple de mise en œuvre mais moins précis que l'insertion par usinage du bois. En effet, dans le bois il est difficile de percer des trous de petit diamètre à grande profondeur (du fait de la fragilité mécanique du foret due à sa petite taille et de la forte hétérogénéité du bois (nœuds, cernes de croissance)). On doit donc se résoudre à opter pour des diamètres de trous plus grand et par conséquent à utiliser des thermocouples de plus gros diamètre.

Concernant le type de thermocouple, il apparaît que les fils nus sont à favoriser par rapport aux gainés. En effet, les thermocouples gainés semblent systématiquement sous-estimer la température, ce qui peut poser problème notamment pour la localisation du front de charbon à partir de l'isotherme 300 °C. Sur la figure 1.11 par exemple, un décalage de près de 25 minutes peut être observé entre le thermocouple nu et gainé pour atteindre cette isotherme à 6 mm de profondeur. Par ailleurs, pour les essais au cône, l'utilisation de thermocouples gainés pénalise la mesure de la perte de masse du fait de la rigidité de la gaine. Les tests doivent alors être doublés afin d'obtenir des données sur la température en profondeur et sur le taux de perte de masse [58]. Enfin l'utilisation de thermocouples gainés peut également avoir une influence sur la carbonisation de la zone où le thermocouple se situe [65] en induisant un puits thermique. En résumé, il apparaît que la mesure de la température au sein d'un échantillon de bois en cours de dégradation s'avère être très complexe tant les facteurs à prendre en compte sont nombreux. Dans le cadre de cette thèse, un protocole ad hoc d'implantation de thermocouples nus par usinage a été développé afin de garantir la plus grande fiabilité et précision des mesures.

1.3.4 Variation des propriétés du bois

Effet de l'essence du bois

De nombreuses études expérimentales visent à comparer le comportement au feu du bois en fonction des essences existantes [99]. Beaucoup ont montré que tous les paramètres mesurés variaient en fonction du bois étudié. La figure 1.8 présentée précédemment, issue des travaux de Xu *et al.* [80], montre que l'essence de bois a une influence non négligeable sur la vitesse de carbonisation. Pour aller plus loin, Tran et White [64] ont mis en évidence, en 1992, que toutes les mesures courantes enregistrées telles que le MLRPUA, le HHR ou la vitesse de carbonisation dépendent de l'essence de bois. Pour une essence de bois donnée, ces valeurs ont tendance à augmenter linéairement avec le flux imposé [64; 85] comme le montre par exemple la figure 1.12.

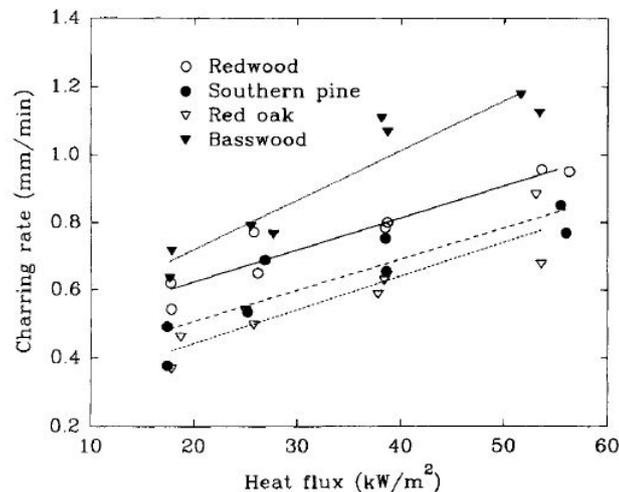


FIGURE 1.12 – Évolution de la vitesse de carbonisation en fonction du flux de chaleur imposé et de l'essence de bois [64].

Cette figure montre que ces données peuvent varier considérablement en fonction de l'essence. Par exemple, pour un même flux imposé de $40 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, la vitesse de carbonisation peut varier de $0,7$ à $1,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ selon l'essence. Le MLRPUA moyen correspondant peut évoluer de 4 à $8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ si l'essence étudiée est du séquoia ou du tilleul. Shields *et al.* [52] ont également étudié l'effet de type du bois sur les flux et temps critique d'auto-inflammation au cône calorimètre. Les auteurs établissent que le flux critique d'inflammation peut être deux fois moins important pour le contreplaqué que pour l'épicéa brut. L'état de l'art de Bartlett [39] montre que les auteurs sont, de manière générale, en accord pour dire que l'essence de bois peut expliquer les différences dans les mesures. En revanche, les conclusions ne sont pas claires en ce qui concerne le paramètre contrôlant majoritairement la variation des résultats (masse volumique, diffusivité, proportion de lignine, etc). Selon Shen [30], la diffusivité du bois est la principale cause des différences entre les espèces.

Effet de l'humidité

La teneur en humidité constitue un autre facteur affectant les différents paramètres caractérisant l'inflammation (température, flux et temps critique d'inflammation) et la dégradation (évolution de la température et vitesse de dégradation). L'humidité retarde la montée en température du bois et refroidit la région pyrolysante par transport de l'eau dans le matériau. Peck [100] avait déjà remarqué en 1932 que le temps d'apparition de la flamme pouvait être impacté par la teneur en humidité dans le bois. Moghtaderi *et al.* [101] ont quant à eux mis en évidence le lien entre l'augmentation de l'humidité dans les échantillons et le flux critique d'inflammation à l'échelle du cône calorimètre. Pour une même essence de bois, le temps d'inflammation pouvait passer de 179 secondes à 540 secondes et les températures d'inflammation de 290 °C à 356 °C en fonction de la teneur en humidité des échantillons. Janssens [102] tend à généraliser sur une élévation de la température de surface à l'inflammation de 2 °C lorsque la teneur en humidité de l'échantillon augmente de 1 %. Cette dernière conclusion semble très simplifiée compte tenu de la complexité de la mesure. Les études menées jusqu'à présent montrent en effet que les températures d'inflammation peuvent varier de plusieurs centaines de degrés pour des conditions expérimentales identiques. L'ajout d'un paramètre tel que l'humidité devrait même potentiellement accentuer cette dispersion des résultats.

Selon Shen *et al.* [30], l'augmentation de l'humidité a tendance à ralentir la croissance de la température de surface en début d'expérience. En revanche, Janssens et White [103] ont montré dans un autre travail que le profil de température dans l'épicéa était indépendant de l'humidité (variation de l'humidité des échantillons de 6 à 17 %). Concernant la dégradation du bois, Di Blasi *et al.* [104] se sont focalisés sur l'évolution de la température dans des échantillons de bois cylindriques soumis à un flux de chaleur. Deux humidités ont été étudiées : 0 et 11 % avec des thermocouples positionnés à différentes profondeurs. Les évolutions de température mettent en évidence l'apparition d'un plateau à 100 °C lorsque l'humidité des échantillons augmente. Ce plateau retarde l'augmentation de la température au sein du matériau et montre que l'humidité joue un rôle dans la vitesse de dégradation du bois. Mikkola [85] a comparé l'effet de l'humidité des échantillons d'épicéa sur la vitesse de carbonisation. Cette vitesse peut passer de 1,06 à 0,6 mm.min⁻¹ si l'humidité passe de 0 à 20 %. De manière générale, Friquin [24] a relevé dans son état de l'art que pour une masse volumique de 400 kg.m⁻³, la profondeur du charbon diminue d'environ 10 % avec une augmentation de 10 % d'humidité.

1.3.5 Effet de l'air et de l'oxygène sur la dégradation

L'atmosphère, et plus particulièrement la concentration en oxygène, constitue également un paramètre important dans la dégradation du bois. Le taux d'oxydation, le dégagement de chaleur (lié à la combustion) et la température (surface et interne) sont directement impactés. Des études [105; 106] font état d'une diminution de la vitesse de carbonisation avec la baisse de la concentration en oxygène. Cedering [106] a effectué des tests sur des poteaux en bois, la concentration en oxygène a été fixée à 4, 7 et 10 %. Il a

été constaté que le taux de carbonisation passait de $0,65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ à 4 % de O_2 à $0,70 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ à 10 % de O_2 .

Outre la concentration en oxygène, il semblerait que la vitesse de l'écoulement d'air puisse également jouer un rôle. Lors de tests réalisés dans une chambre à atmosphère contrôlée sur des échantillons de bois en forme de U, Ohlemiller [107] a montré que l'augmentation du débit d'air favorisait le transfert d'oxygène vers le bois. Il en résultait une augmentation du taux de carbonisation en surface dans le sens de l'écoulement ainsi qu'une augmentation de la température maximale de surface.

Des études comparables ont également été menées au cône calorimètre en orientation horizontale. Delichatsios [108] a montré que la diminution de l'oxygène, de 21 à 15 % n'avait aucun impact sur le temps et le flux critique d'inflammation. Il précise cependant que cela reste le cas tant que le taux de perte en masse n'était pas impacté par le taux d'oxygène. Bilboa *et al.* [105] ont étudié l'effet de la vitesse de l'air entraîné vers la surface de l'échantillon sur le temps d'inflammation. Les auteurs montrent que l'auto-inflammation est retardée lorsque la vitesse de l'air augmente. Pour un flux de $30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, l'inflammation se produit après 13 secondes d'exposition pour une vitesse d'air nulle et après 57 secondes avec une vitesse d'air de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Concernant les effets de l'atmosphère sur la température de surface, Kashiwagi *et al.* [49] ont réalisé une étude intéressante sur des échantillons de pin en atmosphère riche en oxygène ou saturée en azote. Les échantillons étaient orientés verticalement et les températures mesurées à l'aide de thermocouples sont présentées en figure 1.13.

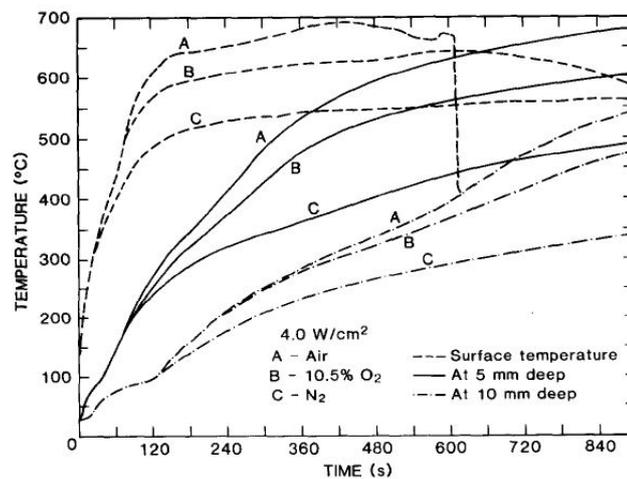


FIGURE 1.13 – Évolution de la température de surface et en profondeur en fonction de la quantité d'oxygène présent pour un flux imposé de $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ [49].

La figure montre que les essais sous air conduisant à une élévation de la température de surface et dans le matériau. Cela est dû en particulier à la combustion du charbon qui augmente la température de surface et accélère la pyrolyse du bois en profondeur. Sous air, la température de surface peut être jusqu'à 200 °C supérieure à la température sous azote. Les auteurs montrent également que la production de CO_2 est beaucoup plus élevée (6-8 fois) pour les tests réalisés sous air. En revanche, sous azote, la production en CO est

quant à elle doublée.

La majeure partie des travaux réalisés dans le cadre de la thèse ont été réalisés sous air. Toutefois, un dispositif expérimental permettant de travailler sous atmosphère inerte a été mis en place. Il comprend un caisson en acier inoxydable doté d'une fenêtre en saphir. Une étude spécifique sur l'effet de la teneur en oxygène sur la dégradation du bois a ainsi pu être menée.

1.4 Extinction du bois

Avant l'extinction du matériau, il faut noter que la flamme du combustible fournit un flux de chaleur supplémentaire à celui fourni par la source externe. Cependant, selon Butler [84], à petite échelle, si la source externe est retirée, alors la chaleur de la flamme seule n'est pas suffisante pour entretenir la combustion. De plus, Li [76] montre qu'après un certain temps d'exposition au flux de chaleur, le maintien de la flamme peut être favorisé par l'apparition de fissures formées par la dégradation du bois. Ces fissures, qui facilitent la libération des gaz inflammables puisqu'elles ont une profondeur allant de la surface brûlée jusqu'à l'interface bois-charbon [109] peuvent être un paramètre important dans l'étude du maintien de la flamme. Cependant, l'étude de ce paramètre s'annonce compliquée puisque la formation des fissures semble aléatoire [110].

L'étude de l'auto-extinction du bois est de plus en plus abordée avec des approches à la fois fondamentales et empiriques. Pour Quintiere et Rangwala [111], l'extinction se produit si la perte de chaleur est supérieure au dégagement de chaleur du combustible. Ils ont montré dans que, dans un feu de compartiment, cette extinction était surtout dépendante de l'apport en oxygène qu'il est très difficile de prédire ou mesurer correctement. Un paramètre d'extinction critique est le nombre de Damköhler (Da) [111; 112], représentant le rapport du temps de réaction (simplement défini comme le taux de perte de masse multiplié par la chaleur de combustion) par le temps de perte de chaleur (défini comme kT/δ^2 , où δ est l'épaisseur de la couche limite thermique, et peut être exprimé comme α/u_∞). Ce nombre peut être calculé à partir de l'équation 1.6 :

$$Da = \dot{m}''' \frac{\Delta H_c}{kT(u_\infty^2)/\alpha} \quad (1.6)$$

où \dot{m}''' est la vitesse de perte en masse par unité de volume, u_∞ est la vitesse des gaz ambiant, k est la conductivité thermique des matériaux et α est la diffusivité thermique. Il est important de noter que les paramètres des matériaux comme α dépendent de la température et qu'ils sont très difficiles à mesurer précisément. Selon Emberley *et al.* [113], si quasiment tous les paramètres sont considérés constants alors \dot{m}''' et la vitesse d'écoulement u_∞ feront principalement varier Da . À petite échelle, si on considère que u_∞ est constant, alors le MLRPUA critique d'extinction sera le même en transitoire ou en permanent (figure 1.6). Quintiere et Rangwala [111] ont même défini une formule pour calculer le MLR critique d'extinction ($\dot{m}'''_{cr,ex}$) :

$$\dot{m}''_{cr,ex} = \frac{1}{L_v} \left[\frac{h_c}{C_p} \left[\frac{Y_{ox,\infty} \Delta H_c}{v} - C_p (T_p - T_\infty) \right] + \dot{q}''_{e,r} - \sigma (T_p^4 - T_0^4) \right] \quad (1.7)$$

L_v est la chaleur de gazéification (pour le bois la valeur utilisée est 1820 kJ.kg^{-1} [114]), h_c est le coefficient d'échange convectif, $Y_{ox,\infty}$ est la concentration d'oxygène ambiant, v est le ratio stœchiométrique oxygène/ combustible, T_p est la température de pyrolyse, T_0 est la température initiale et $\dot{q}''_{e,r}$ est le flux de chaleur externe. Les équations 1.6 et 1.7 illustrent la complexité de définition et de détermination de critères simples pour l'extinction. En effet, de nombreux paramètres tels que α , L_v , $Y_{ox,\infty}$ ou v sont difficiles à mesurer expérimentalement. Les travaux de Bartlett [115] se sont basés sur l'équation 1.7 en annonçant que les conditions d'extinction et d'inflammation pilotée ont les mêmes conditions critiques. En d'autres termes, une flamme s'éteindra si on tombe en dessous de la limite inférieure d'inflammabilité. Le MLR critique peut être exprimé par :

$$\dot{m}''_{cr} = \frac{\dot{q}''_{net}}{L_v} \quad (1.8)$$

avec \dot{m}''_{cr} la vitesse de perte en masse critique par unité de surface et \dot{q}''_{net} le flux net au niveau de la surface du combustible s'exprimant par :

$$\dot{q}''_{net} = h_c (T_0 - T_{surf}) + \varepsilon_{bois} \sigma (T_0^4 - T_{surf}^4) + \dot{q}''_{inc} \quad (1.9)$$

où h_c est le coefficient d'échange convectif, T_{surf} est la température de surface mesurée, ε_{bois} est l'émissivité de l'échantillon, σ est la constante de Planck et \dot{q}''_{inc} est le flux incident de la source. Les équations montrent que le flux net ou la vitesse de perte en masse critique sont dépendants du coefficient d'échange convectif et de la température de surface. Une mesure précise de cette dernière est nécessaire afin d'estimer correctement le MLR critique d'extinction.

Concernant les approches plus empiriques, les études sur l'auto-extinction sont relativement récentes et peu nombreuses. Une synthèse des contributions disponibles a été proposée par Bartlett [39]. À grande échelle par exemple, Emberley *et al.* [116] ont pu observer qu'une structure en bois pouvait s'auto-éteindre lorsque le flux incident maximal diminuait sous une valeur seuil de 45 kW.m^{-2} . Cependant, dans certains cas particuliers, les conditions d'auto-extinction n'ont jamais pu être remplies. Cela a été observé par plusieurs auteurs [117; 118; 119] qui ont étudié le phénomène d'extinction dans un compartiment à grande échelle de bois lamellé croisé (CLT). En particulier, Crielaard *et al.* [120] ont réalisé une étude sur des compartiments de 50 cm de côtés constitués de parois en panneaux de CLT. Plusieurs configurations ont été testées en modifiant le nombre et l'épaisseur des parois en CLT constituant le compartiment. La figure 1.14 présente les configurations étudiées ainsi que les évolutions de la température du compartiment, mesurée à une hauteur de 40 cm.

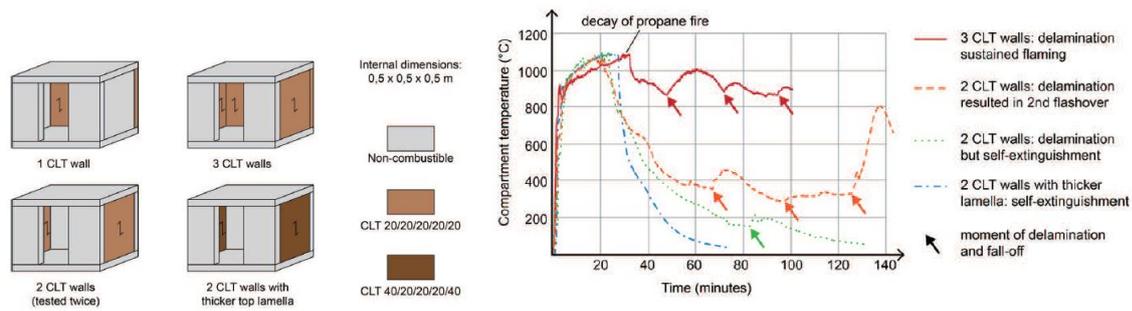


FIGURE 1.14 – Évolution de la température dans le compartiment selon différentes configurations [120].

De manière générale, lorsque le foyer est retiré (après 30 minutes), la température décroît au sein du compartiment. La combustion des parois en CLT se poursuit tout de même et dans certains cas, des délaminations de lamelles de CLT (repérées par des flèches en figure 1.14) sont observées. La délamination contribue à la fois à alimenter le foyer en combustible et à exposer de nouvelles lamelles de bois vierge. Chaque délamination s'accompagne d'ailleurs d'une élévation plus ou moins prononcée de la température du compartiment. De plus, lorsque ces délaminations sont multiples, les conditions d'auto-extinction du compartiment ne sont jamais atteintes. Toutefois, l'auto-extinction s'est tout de même produite lors d'un test où une seule délamination est survenue après que la température dans le compartiment soit descendue en dessous de 200 °C. Il semblerait toutefois que les délaminations multiples peuvent être évitées lorsque la première délamination survient tardivement, de sorte que la température au sein de compartiment soit suffisamment faible. Dans ces conditions, l'auto-extinction du compartiment a pu se produire. En augmentant l'épaisseur des lamelles des bords des panneaux de CLT, les auteurs montrent également que la délamination peut même être évitée, conduisant ainsi à une auto-extinction rapide du compartiment. Il apparaît tout de même que la délamination constitue un véritable frein pour l'auto-extinction. McGregor [117] a d'ailleurs montré qu'à plus grande échelle (compartiments de $3,5 \times 4,5 \times 2,5$ m), l'auto-extinction ne se produisait pas et qu'il était même possible d'observer un second embrasement généralisé après délamination du CLT. Des études ont également été réalisées à plus petite échelle, à l'aide d'un cône calorimètre ou d'un Fire Propagation Apparatus (FPA), pour estimer des paramètres pertinents tels que le flux de chaleur et le taux de perte de masse critique (MLR) à l'auto-extinction [121]. Emberley *et al.* [113] ont étudié l'extinction de différentes essences de bois au cône en orientation verticale en passant d'un flux élevé (engendrant l'inflammation) à un flux nul. Le MLRPUA critique à l'extinction variait de 2,65 à 8,28 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ et le flux de chaleur critique entre 24,1 à 56,6 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ selon les essences de bois. Lorsque le combustible n'est plus soumis au flux de chaleur, l'extinction de la flamme se produit au bout de 40 secondes maximum. Cet article conclut que l'auto-extinction est indépendante des masses volumiques de bois ou du flux thermique imposé. Bartlett *et al.* [118] ont réalisé l'étude de l'auto-extinction du CLT à l'aide d'un FPA, en diminuant sa température de consigne. Un taux de perte de masse critique compris entre 3,8 et 4,1

$\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et un flux thermique critique égal à 31 kW.m^{-2} ont été évalués (à des concentrations d'oxygène comprises entre 16 et 18 %). Dans ces expériences, les auteurs affirment que l'augmentation du pourcentage d'oxygène n'a pas d'impact significatif sur l'extinction du bois mais cette variation, de 2 %, reste tout de même très faible pour valider cette observation. Enfin, Crielaard *et al.* [120] ont étudié l'extinction de la combustion du bois en déplaçant l'échantillon d'un cône avec un flux de chaleur de 75 kW.m^{-2} vers un autre cône programmé entre 0 à 10 kW.m^{-2} avec débit d'air variable imposé. Ces deux cônes étaient orientés horizontalement. La combustion solide est maintenue pour un second flux compris entre 8 et 10 kW.m^{-2} et s'arrête spontanément pour un second flux compris 0 et 5 kW.m^{-2} . L'arrêt de la combustion pour un flux de 6 kW.m^{-2} dépend surtout du flux d'air appliqué. Le flux d'air de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ conduit à une extinction plus rapide qu'avec flux d'air de 1 m.s^{-1} . L'air entraîné au niveau de la surface permet donc de maintenir la combustion du charbon. Dans ce travail, les MLRPUA n'ont cependant pas pu être fournies car l'échantillon devait être déplacé du premier cône au second.

1.5 Expériences sans inflammation

À l'échelle du cône, il existe un flux critique en dessous duquel le bois ne s'enflamme pas. Comme présenté en section 1.2.3, ces valeurs de flux critiques sont très variées et dépendent à la fois du matériau mais également des conditions expérimentales. En revanche, même si l'inflammation ne se produit pas, la température atteinte en surface peuvent tout de même entraîner la combustion du charbon conduisant à une dégradation importante du bois. Au niveau de la température de surface, Fangrat *et al.* [66] ont montré par des mesures avec un pyromètre qu'elle se trouvait entre 300 et $400 \text{ }^\circ\text{C}$ au moment où la combustion solide apparaît. La figure 1.15 issue des travaux de Boonmee [122] permet d'illustrer la transition entre la pyrolyse et la pyrolyse combinée à la combustion solide au travers du suivi de la température de surface au cours du temps.

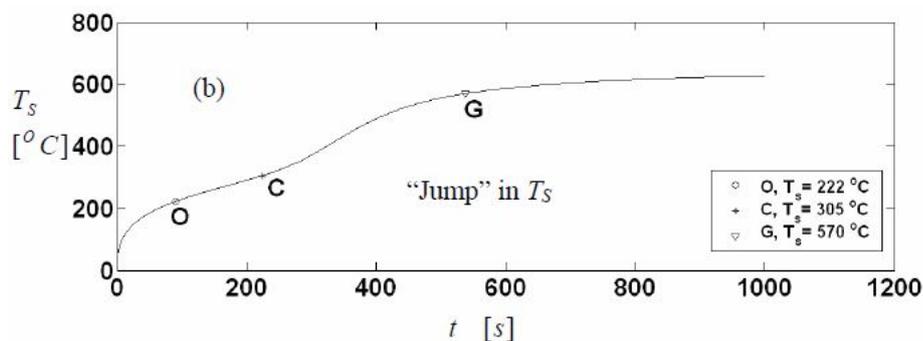


FIGURE 1.15 – Évolution de la température de surface de l'épicéa exposé à 15 kW.m^{-2} [122] (O : oxydation, C : critical point, G : Glowing).

L'échantillon d'épicéa était exposé verticalement au cône sans igniteur à un flux de 15 kW.m^{-2} . Le point d'inflexion à 224 secondes à une température de surface de $305 \text{ }^\circ\text{C}$

représente le début de la combustion solide. Une fois que toute la surface est incandescente, la température de surface se stabilise à 600 °C. Swann *et al.* [123] présentent des résultats comparables au niveau des températures de surface mesurées sur du contreplaqué avec un pyromètre. Les auteurs remarquent également qu'en dessous de 7 kW.m⁻², la température de surface reste constante (230 °C) après deux heures d'exposition. Certains auteurs comme Reszka et Torero [58] ont mesuré la température dans des échantillons de bois à des flux de chaleur très faibles. Pour un flux de 10 kW.m⁻², l'inflammation ne s'est pas produite mais la combustion solide est initiée trois heures après le début de l'essai. Cette combustion s'est traduite par une augmentation soudaine de la température en profondeur aux alentours de 250 °C à 5 mm de la surface exposée. Une récente campagne expérimentale a été menée par Pope *et al.* [124] afin de montrer l'influence du fil du bois sur l'évolution de la température dans le bambou. Des échantillons orientés verticalement au cône calorimètre avec ou sans pilote ont été exposés à différents flux de chaleur pour lesquels l'inflammation ne s'est pas produite. Ces expériences ont montré que pour un flux de 5 et 10 kW.m⁻² seule la pyrolyse sans combustion solide a lieu conduisant à respectivement des températures maximales de 180 °C et 300 °C en profondeur après une heure d'essai. En revanche pour un flux de 30 kW.m⁻², la combustion solide en surface se produit à des temps courts donnant lieu à une augmentation rapide de la température dans le bambou suivi d'un plateau allant jusqu'à 675 °C. Pour cet essai, il faut également noter une régression de la surface exposée au flux comme conséquence directe de la combustion solide. Dans le cadre de la thèse, une chambre à atmosphère inerte a été spécialement conçue afin d'étudier l'effet de la combustion solide sur la dégradation du bois.

1.6 Le changement d'échelle

Le changement d'échelle dans les essais incendie a pour but de prédire (ou non) le comportement au feu d'un matériau à grande échelle à partir de données obtenues à des échelles inférieures [125; 126]. Ce travail est très complexe et les lois qui permettent, par exemple, de lier la petite échelle (cône calorimètre) et l'échelle intermédiaire (SBI) pour le matériau bois ne sont pas évidentes. Vincent [127] a par exemple développé un système de panneaux radiants modulables (nombre de panneaux, orientation) nommé RAPACES afin d'étudier le comportement au feu d'échantillons de contreplaqué pour deux échelles : le cône calorimètre et le système RAPACES. Les résultats montrent que le contreplaqué est peu influencé par le changement de taille de l'échantillon. En revanche, l'augmentation de l'épaisseur entraîne une diminution et une stabilisation de la vitesse de perte de masse du contreplaqué. Martinka *et al.* [128] ont quant à eux utilisé de l'épicéa sous trois formes différentes (poudre, pellet, solide) et ont constaté que la température d'auto-inflammation des échantillons était identique quelle que soit l'échelle, aux alentours de 450 °C. Shields *et al.* [52] ont également comparé les données sur du bois entre le cône calorimètre (échantillons 100 × 100 mm) et le test d'inflammabilité (échantillons 165 × 165 mm) en orientation horizontale. Le test d'inflammabilité est un dispositif expérimental identique à celui du cône avec des dimensions d'échantillon légèrement plus grandes. Il

apparaît que le flux critique ainsi que le temps d'auto-inflammation de l'épicéa sont plus faibles pour le test d'inflammabilité. Friquin *et al.* [129] ont étudié la vitesse de carbonisation de plaques de CLT (3,6 m × 1,2 m) selon trois tests au four normés. Les auteurs ont, entre autre, mis en évidence que la vitesse de carbonisation dépendait de la courbe de température du four et variait, pour des échantillons identiques, de 0,5 à 0,7 mm. min⁻¹. Ces essais montrent que les dimensions des échantillons jouent également un rôle sur les critères d'inflammation du bois. Les taux de carbonisation de poteaux en bois dans les tests au cône calorimètre ont été comparés par Tsantaridis [130] aux tests à grande échelle dans des fours. Les résultats ont montré un bon accord entre les deux méthodes.

Comme présenté dans le chapitre précédent, le classement de réaction au feu des matériaux de construction est réalisé à l'aide du SBI. Ce test à l'échelle intermédiaire consiste à placer un échantillon en angle et à l'exposer à une puissance de brûleur à gaz prescrite de 30 kW. Malgré l'utilisation quotidienne de cet essai en ingénierie, les études en lien avec le SBI restent peu nombreuses. Les dernières recherches en date sont celles de Zeinali *et al.* [131; 132; 133]. Un des articles de Zeinali *et al.* [132] consistait à caractériser le brûleur à gaz du SBI à l'aide de panneaux incombustibles en silicate de calcium. Des mesures de hauteur de flamme, de flux et une cartographie de la température ont été réalisées à des puissances de 10, 30 et 55 kW. Zeinali *et al.* ont remarqué, entre autre, que la hauteur de flamme du brûleur ainsi que le flux mesuré augmentaient avec la puissance imposée. Contrairement à de nombreux essais, la sollicitation thermique produite par le brûleur à gaz du SBI est hétérogène sur toute la surface des panneaux. Ce point peut par exemple être illustré en figure 1.16 par les cartographies de température enregistrées par Zeinali *et al.* avec des thermocouples sur des panneaux incombustibles.

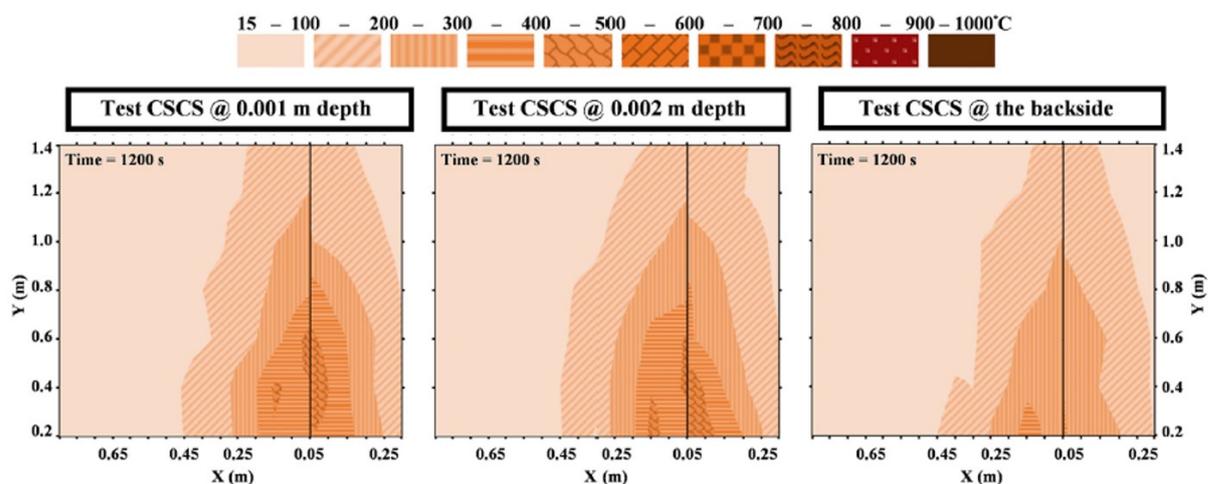


FIGURE 1.16 – Cartographie de la température à différentes profondeurs pour des panneaux de silicate de calcium après une exposition de 20 minutes à une puissance prescrite du brûleur de 30 kW [132].

À une profondeur de 1 mm par rapport à la surface exposée, la température peut passer de [400-500 °C] à [15-100 °C] entre le coin (là où se situe le brûleur) et l'extrémité de l'éprouvette. La distribution de la température est donc très hétérogène sur les panneaux.

Zhang *et al.* [134] ont mené le même type d'expérience sur des panneaux incombustibles et ont mesuré le flux à la paroi ainsi que la hauteur de flamme. Les conclusions sont identiques, l'augmentation du débit de gaz augmente la valeur des flux ainsi que la hauteur de flamme. Celle-ci passe de 0,8 à 1,25 m pour des puissances de brûleur de 30 à 60 kW. Zeinali *et al.* ont enregistré des hauteurs de flamme quasiment identiques (0,9 m pour une puissance de brûleur de 30 kW et 1,1 m pour 55 kW). Zeinali *et al.* [133] ont également étudié le comportement au feu de différents panneaux de fibres à masse volumique moyenne, appelé MDF (Medium Density Fiberboard, l'appellation anglophone) pour une puissance de brûleur de 30 kW. Des mesures de hauteur de flamme et de front de pyrolyse ont été réalisées. Bien entendu, l'ajout d'un panneau combustible augmente la hauteur de flamme ainsi que la puissance libérée par rapport aux essais avec les panneaux de silicate de calcium. Le front de pyrolyse en surface en fonction du temps d'exposition à 30 kW a également été mesuré. Lipinskas et Mačiulaitis [135] ont réalisé des tests au SBI afin de comparer la vitesse de carbonisation de différents échantillons de bois (feuillus et résineux, traités et non traités). Ils ont montré que cette vitesse pouvait passer de 0,5 à 0,8 mm. min⁻¹ pour une puissance de brûleur de 30 kW. Parmi les 4 types d'échantillons, c'est surtout la masse volumique du bois (et non le traitement) qui avait une influence sur la production de charbon.

Une partie des travaux de thèse sera consacrée à l'étude du comportement au feu du matériau bois à différentes échelles tels que le SBI ou des panneaux radiants. La métrologie mise en place pour les essais à petite échelle sera transférée lors de ces campagnes expérimentales afin de mettre en évidence l'effet de ces échelles sur les données mesurées à petite échelle.

1.7 Récapitulatif et objectifs de la thèse

L'étude bibliographique révèle que l'auto-inflammation du bois en orientation verticale a été relativement peu étudiée dans la littérature. Le peu de données disponibles sont très dispersées puisque les conditions expérimentales et les échantillons ont une influence sur les résultats. Les études à l'échelle du cône en orientation horizontale ont par exemple montré qu'il pouvait exister trois types d'auto-inflammation : éloignée de la surface exposée au flux, proche de la surface et potentiellement pilotée par les spires chaudes du cône. En revanche, il n'y a actuellement pas de résultats en orientation verticale qui évaluent la localisation de l'auto-inflammation en fonction des conditions fixées, tel que le flux de chaleur par exemple. Une campagne expérimentale de grande envergure sera donc mise en place durant cette thèse, à l'échelle du cône calorimètre afin de quantifier statistiquement la localisation, les temps ainsi que les températures de surface lors de l'auto-inflammation du bois. Les moyens de mesure, en particulier de température, seront choisis avec précaution. Le flux critique d'auto-inflammation sera également déterminé et comparé avec la littérature.

La mesure de la température dans le bois en cours de dégradation est courante lors des essais incendies. L'état de l'art démontre qu'une sous-estimation de celle-ci peut rapide-

ment être faite en fonction du type de thermocouple utilisé ainsi que son implantation et son orientation par rapport au flux de chaleur. Une étude expérimentale dédiée sera réalisée en usinant les échantillons de bois afin de maîtriser précisément la position des thermocouples et de minimiser leur intrusion. L'objectif est de fournir des données fiables et précises pour l'évaluation et la validation de modèles de dégradation du bois à l'échelle du matériau.

Actuellement, la position du front de charbon est très souvent déterminée à partir de l'isotherme 300 °C mesurée à l'aide de thermocouples. D'autres articles mesurent directement la couche de charbon en découpant le bois après les essais. En revanche, il existe peu d'études qui comparent la mesure directe de la couche de charbon avec la déduction par l'isotherme à 300 °C [39]. Pourtant, l'état de l'art a montré que la mesure de température dans le bois pouvait être très largement sous-estimée en fonction de l'implantation du capteur de température. Il peut donc y avoir des biais non négligeables sur l'estimation de l'isotherme à 300 °C. En conséquence, une étude comparant les deux techniques sera réalisée pendant la thèse avec une implantation de thermocouples qui devra être précise de façon à déterminer précisément la position du front de charbon.

Des essais sans inflammation, à des flux relativement faibles seront réalisés dans la même orientation de façon à mesurer les températures de surface et dans le matériau ainsi que la position du front de charbon. L'effet de l'humidité des échantillons sur les paramètres liés à l'inflammation (flux critique, température, temps) et à la dégradation (MLRPUA, position de la couche de charbon) sera également analysé.

L'état de l'art a également montré que les connaissances concernant l'auto-extinction du bois étaient faibles puisque les laboratoires ne se sont penchés sur le sujet que récemment. Théoriquement, il est clair que l'extinction dépend de la quantité d'oxygène autour de l'échantillon en flamme et des propriétés du bois qui évoluent pendant l'essai du fait de la dégradation. Expérimentalement, ces données sont difficiles à estimer précisément. Un dispositif expérimental sera dédié à cette étude pendant cette thèse afin de déduire des critères précis d'auto-extinction comme le flux, la température de surface ou encore le MLRPUA.

Des essais à des échelles supérieures ont été réalisés avec des panneaux radiants afin de comparer les mesures d'inflammation et de dégradation avec les résultats obtenus à l'échelle du cône calorimètre. Une campagne expérimentale a également été effectuée avec le SBI afin de cartographier le flux reçu sur une paroi incombustible et sur des panneaux d'épicéa pour différentes puissances de brûleur prescrites. L'agression thermique pour ces essais est différente de celle du cône ou du panneau radiant puisqu'elle est générée par une flamme de brûleur. La température dans le bois a donc été mesurée avec différents types d'implantation de thermocouple à une localisation proche du brûleur. Enfin, une dernière campagne à échelle intermédiaire, appelée mini-SBI, a été réalisée de façon à mettre en évidence une nouvelle fois l'importance de l'implantation des capteurs de température dans le bois par la mesure de la position précise du front de charbon. Les points clés de l'étude expérimentale tout au long du manuscrit de thèse sont :

- L'orientation des échantillons est verticale

- L'épaisseur de l'échantillon est de 50 mm (soit thermiquement épais)
- L'essence de bois étudiée est principalement de l'épicéa
- L'inflammation est non pilotée
- Le flux imposé est constant ou constant par morceaux (pour l'étude de l'extinction).

Chapitre 2

Matériel et Méthode

Sommaire

2.1 Les échantillons	42
2.1.1 Les essences de bois utilisées	42
2.1.2 Variation de l'humidité des échantillons	43
2.2 Le cône calorimètre	43
2.2.1 Intérêt du cône coulissant	45
2.2.2 Le double cône calorimètre coulissant	46
2.3 Métrologie appliquée à l'étude de l'inflammation et de la dégradation de l'épicéa	47
2.3.1 La caméra infrarouge FLIR	47
2.3.2 Les caméras rapides	49
2.3.3 Les thermocouples	50
2.4 La fenêtre saphir	53
2.5 La chambre à atmosphère inerte	54
2.6 Les essais panneaux radiants	55
2.7 Le Single Burning Item (SBI)	56
2.7.1 Généralités	56
2.7.2 Expériences et métrologie	57
2.8 Le mini-SBI	58

L'état de l'art a montré que l'étude expérimentale de l'auto-inflammation, de la dégradation et de l'auto-extinction du matériau bois en condition verticale recense peu de données, elles mêmes très dispersées. En effet, les phénomènes étudiés dépendent fortement des conditions opératoires et de la métrologie employée. En conséquence, la mise en place de techniques de mesure précises et fiables est nécessaire. Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales techniques de mesure mises en place pour les expériences telles que les différentes caméras (visible et infrarouge), qui ont toutes une spécificité et un objectif particulier, ou encore l'implantation spécifique de thermocouples très fins dans les échantillons de bois permettant la mesure de la température en profondeur au cours des

tests. Cette métrologie sera déployée sur les quatre bancs expérimentaux utilisés pendant la thèse, à différentes échelles et conditions d'agression thermique.

2.1 Les échantillons

2.1.1 Les essences de bois utilisées

La majeure partie des expériences menées pendant la thèse se sont focalisées sur l'épicéa sous forme d'échantillons en lamellé collé. L'épicéa est une espèce de bois résineux très répandue dans l'Amérique du Nord, l'Europe et la Russie. Son bois, de faible densité, mais résistant, facile à travailler, est avantageux pour les travaux de charpente en raison de la régularité de son tronc. Sa masse volumique a été mesurée entre 390 et 560 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ sur 340 échantillons (histogramme disponible dans le livret en figure D.4). Des lames de section 5 cm \times 5 cm sont collées entres elles. Le collage est généralement effectué à l'aide d'une résine mélangée à un durcisseur. Cette résine majoritairement utilisée dans la production de panneaux de bois est la résine mélamine-urée-formaldéhyde (MUF). Dans les essais réalisés, aucune délamination n'a été observée et les échantillons se comportent comme du bois massif.

Une campagne expérimentale a également été menée à petite échelle avec du hêtre massif. Le but est d'observer les possibles différences sur l'auto-inflammation, la dégradation et l'auto-extinction selon l'essence de bois utilisée. Le hêtre appartient à la famille des fagacées et se développe surtout en Europe centrale. Le hêtre est un arbre utilisé aussi bien comme matériau servant à fabriquer de nombreux objets, que comme matériau de structure dans la construction. Sa masse volumique est comprise entre 600 et 750 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La figure 2.1 montre les deux types de bois qui seront utilisés lors des essais au cône calorimètre.



(a) Échantillon d'épicéa en lamellé collé.



(b) Échantillon de hêtre massif.

FIGURE 2.1 – Photos des deux essences de bois utilisées lors des expériences au cône calorimètre.

2.1.2 Variation de l'humidité des échantillons

L'humidité du bois semble avoir un impact sur l'inflammation et la dégradation du bois même si les avis ne sont pas unanimes. Il a donc été décidé de réaliser un certain nombre d'essais sur les échantillons d'épicéa avec différents taux d'humidité, de 9 % à 30 %. L'objectif principal est de mesurer le temps d'inflammation, la température de surface ainsi que la vitesse de perte en masse afin de comparer les résultats obtenus et de mettre en évidence l'effet (ou non) de l'humidité sur le comportement au feu du bois. L'humidité d'équilibre du bois dépend de l'hygrométrie de l'air dans lequel il se trouve. Pour obtenir des niveaux d'hygrométrie donnés, une solution d'eau saturée avec différents sels est utilisée. L'hygrométrie de l'air varie en fonction du sel, tout comme l'humidité des échantillons placés dans l'atmosphère considérée. Des enceintes hermétiques ont été utilisées pour placer le mélange d'eau saline ainsi que les échantillons de bois. L'objectif est d'augmenter l'hygrométrie dans les enceintes jusqu'à un certain seuil pour varier l'humidité dans le bois jusqu'au pourcentage souhaité. Le tableau 2.1 présente les différents sels utilisés afin d'atteindre les humidités souhaitées dans les échantillons de bois.

TABLEAU 2.1 – Sels mélangés à l'eau afin d'augmenter l'humidité du bois.

Type de sel	Hygrométrie (%)	Humidité obtenue (%)
Chlorure de sodium (NaCl)	75-80	15
Chlorure de potassium (KCl)	90	20
Sulfate de potassium (K ₂ SO ₄)	95-97	25
Eau pure	100	30

L'augmentation de l'humidité dans les échantillons de bois est progressive. La prise d'humidité est évaluée grâce à la prise de masse des échantillons. Cette augmentation de la masse est mesurée tous les 10 jours à l'aide d'une balance de précision. L'objectif est d'atteindre un plateau au niveau de la masse de sorte de pouvoir (raisonnablement) considérer que l'humidité est constante jusqu'au cœur de l'échantillon. Les courbes en figure D.5 du livret des figures montrent le temps nécessaire pour que des échantillons atteignent 15 et 20 % d'humidité. Il faut compter 60 jours pour que le bois atteigne 15 % d'humidité lorsque les échantillons sont placés dans des environnements contenant un mélange d'eau et de NaCl. Le temps augmente considérablement si le taux d'humidité souhaitée dans le bois passe par exemple à 20 % (200 jours).

2.2 Le cône calorimètre

Le cône calorimètre est un essai à l'échelle du matériau qui consiste à exposer un échantillon à un flux de chaleur provenant d'une résistance chauffante en forme de spire conique. Le flux de chaleur, déterminé au préalable à l'aide d'un fluxmètre Schmidt-Boelter (de Medtherm), peut varier de 0 à 100 kW.m⁻². L'orientation du cône peut être horizontale ou verticale même si l'orientation horizontale est la plus couramment utilisée. Les essais réalisés avec ce dispositif sont généralement dictés par la norme ISO 5660-1

[50]. Dans cette thèse, le cône calorimètre n'est pas utilisé comme un essai normé mais comme un outil qui permet de solliciter thermiquement des échantillons de bois. Les tests ont été essentiellement effectués en orientation verticale (précisé dans le cas contraire). Cette orientation a été choisie pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette orientation est privilégiée pour une raison technique puisqu'elle permet la mesure de la température de surface des échantillons exposés au flux par une caméra infrarouge à travers l'ouverture du cône. Ensuite, il existe peu de résultats expérimentaux dans cette configuration. Pourtant, dans un grand nombre de cas pratiques, le bois est orienté verticalement telles que les façades, mais aussi certains éléments structurels. Il est donc nécessaire d'apporter des données expérimentales dans ce type de configuration.

La configuration expérimentale utilisée pour cette étude est donc modifiée. Dans un premier temps, le cône a été placé sur un système de table coulissante avec un roulement à billes. Cette nouvelle configuration a permis en outre de retirer le cache séparant l'échantillon du combustible et d'étudier l'inflammation et l'extinction du bois en passant d'un flux nul à un flux élevé et inversement. Dans un deuxième temps, deux cônes ont été disposés sur ce système de table coulissante. Cette configuration a pour objectif principal d'étudier l'auto-extinction du bois en passant d'un flux élevé vers un plus faible. La photo du dispositif final est présentée dans la figure 2.2.

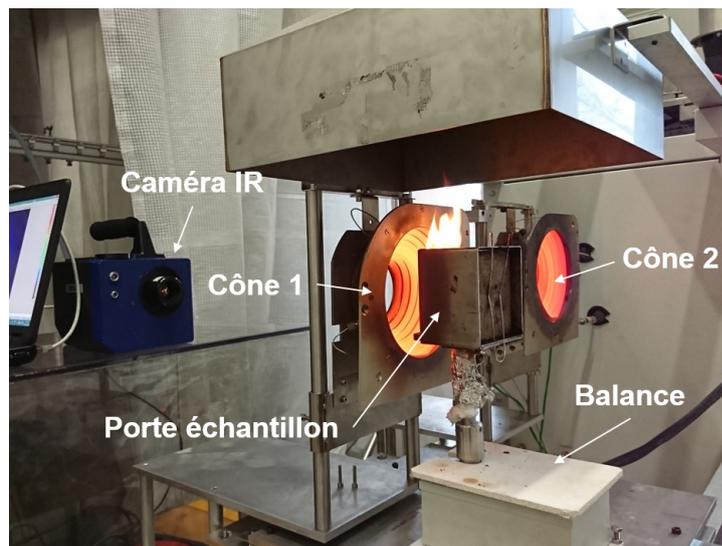


FIGURE 2.2 – Photo du double cône coulissant.

Cette nouvelle configuration permet de passer rapidement d'un flux de chaleur (provenant de l'un des cônes) à un autre flux de chaleur (provenant de l'autre cône). Le principal avantage de cette configuration est que la perte en masse peut être mesurée en continu, même lors du passage d'un flux à l'autre tout comme la température de surface, mesurée grâce à une caméra infrarouge regardant au travers de la troncature du cône.

L'échantillon est placé dans le porte-échantillon qui est posé sur une balance et la distance entre le cône et le matériau est de 25 mm, comme stipulé par la norme 5660-1 [50]. Cette distance permet d'obtenir une densité de flux la plus homogène possible au niveau de la surface exposée tout en évitant de contraindre l'écoulement des gaz de pyrolyse.

Des articles comme celui de Boulet *et al.* [136] ou de Crémona *et al.* [137] ont cependant montré que cette densité de flux reçu est plus faible au niveau des bords. Tsantaridis [130] a trouvé que le cadre du porte-échantillon pourrait réduire le taux de dégagement de chaleur et augmenter le temps de combustion des échantillons. Tous les essais seront réalisés avec ce porte échantillon de façon à limiter les possibles disparités.

2.2.1 Intérêt du cône coulissant

L'avantage principal de la modification du dispositif expérimental est l'étude possible de l'extinction des échantillons en faisant varier les flux de chaleur tout en mesurant en continu la perte en masse ainsi que la température de surface. Le flux de chaleur radiatif émis par le cône est contrôlé avant chaque essai grâce à un fluxmètre Schmidt-Boelter. Le flux de chaleur est considéré comme correct lorsque la valeur est $\pm 0,5 \text{ kW.m}^{-2}$ par rapport au flux souhaité. Dans un premier temps, l'objectif de cette mesure est de comparer la quantité de flux reçue par les échantillons en fonction de la configuration du cône. La figure 2.3 présente l'évolution du flux mesuré pour un flux de 60 et 82,5 kW.m^{-2} en fonction de la configuration du cône : classique (présence du cache) et avec système de roulement (cône coulissant donc sans le cache).

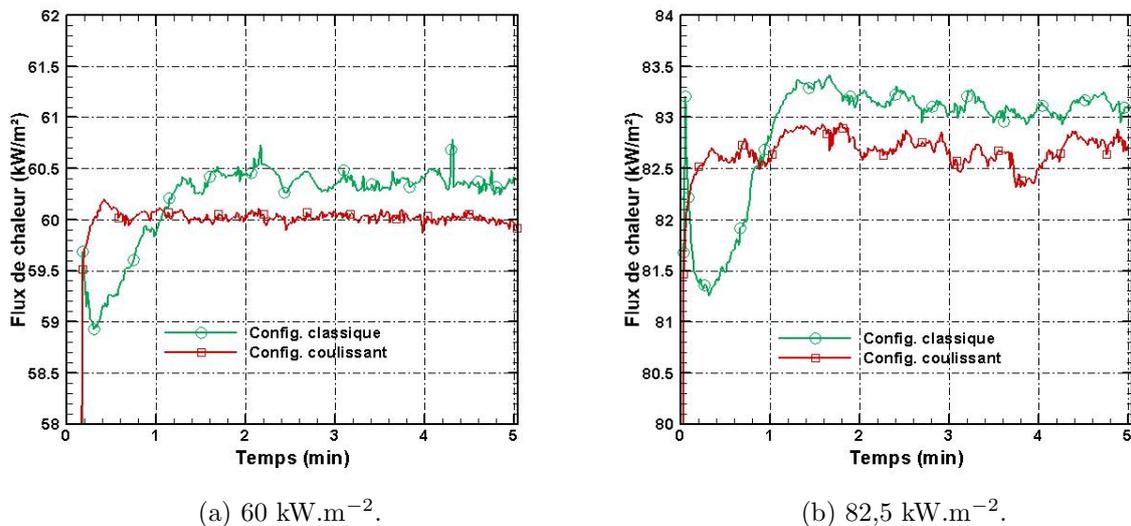


FIGURE 2.3 – Évolution du flux mesuré en fonction de la configuration du cône : classique (présence du cache) et le nouveau système coulissant.

Le flux de chaleur mesuré pour la configuration coulissante augmente très rapidement lorsque le fluxmètre est exposé au cône. Le flux de chaleur atteint un plateau à la valeur nominale souhaitée (60 ou 82,5 kW.m^{-2}). C'est un avantage supplémentaire de la nouvelle configuration impliquant un cône disposé sur un système coulissant par rapport au cône d'origine. En effet, dans ce dernier, un écran isolant est utilisé pour éviter que l'échantillon soit directement exposé au flux radiatif émis par le cône, principalement lors de l'étape d'initialisation du test (acquisition pendant 60 secondes de "baseline" de la balance). Lorsque cet écran est devant le cône, les pertes en particulier radiatives sont réduites

(par rapport aux pertes de chaleur sans l'écran), et la puissance électrique nécessaire pour maintenir les spires à la température de consigne est réduite. Lorsque l'écran isolant est retiré, les pertes augmentent soudainement, la température du cône diminue et, par conséquent, le flux émis également, comme le montre les figures 2.3a et 2.3b. Il faut donc un certain temps (près d'une minute) pour que la température du cône atteigne à nouveau le point de consigne. Ces pertes de chaleur ont déjà été observées et décrites dans [64; 56]. Dans le dispositif proposé, l'écran n'est plus nécessaire car le cône est translaté devant l'échantillon. De cette façon, le flux de chaleur souhaité est stable dès le début de l'expérience.

2.2.2 Le double cône calorimètre coulissant

Comme précisé en section 2.2, le cône a été modifié de façon à mettre en place un dispositif expérimental permettant d'étudier l'auto-extinction des matériaux. Le principe consiste à tout d'abord exposer le bois à un flux de chaleur élevé engendrant l'auto-inflammation du bois pendant un temps donné, et ensuite de coulisser le dispositif vers un second cône avec un flux de chaleur moins important que le premier. La figure 2.4 présente un exemple de flux de chaleur mesuré pour un premier cône fixé à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 15 minutes suivi d'un flux moins important de $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le second cône pendant 5 minutes.

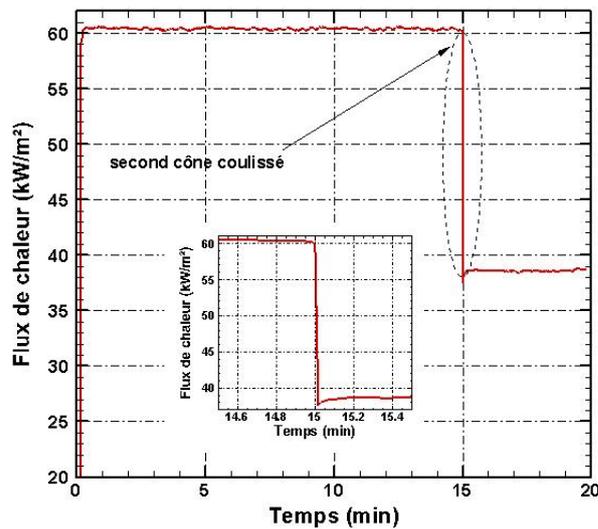


FIGURE 2.4 – Évolution du flux de chaleur mesuré avec le double cône coulissant. Le premier flux de chaleur de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ est imposé pendant 15 min, suivi d'un flux de chaleur plus faible ($38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) imposé pendant 5 min.

Le courbe montre une croissance rapide du flux jusqu'à la valeur souhaitée de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. La valeur de ce flux est ensuite stabilisée jusqu'à la décroissance soudaine de celui-ci due au coulisser du second cône. Le coulisser engendre une diminution du flux mesuré inférieure à $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant moins de 12 secondes avant de se stabiliser

à la valeur souhaitée de $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Ces résultats sont très satisfaisants et indiquent la grande fiabilité de ce nouveau dispositif pour l'étude du flux critique d'auto-extinction notamment.

2.3 Métrologie appliquée à l'étude de l'inflammation et de la dégradation de l'épicéa

2.3.1 La caméra infrarouge FLIR

La détermination de la température de surface par caméra infrarouge se justifie pour plusieurs raisons : c'est une mesure non intrusive qui permet d'enregistrer la température de surface en s'affranchissant au maximum de la présence de la flamme si l'épaisseur de celle-ci est suffisamment faible. La caméra utilisée pendant la thèse afin de mesurer la température de surface est une caméra FLIR Orion SC7000. Elle a une résolution de 320×256 pixels et peut fonctionner dans la gamme spectrale $[1,5 \text{ }\mu\text{m} - 5 \text{ }\mu\text{m}]$. Cette caméra a la particularité d'être équipée d'une roue filtrante entre l'objectif et le détecteur matriciel afin d'y disposer des filtres passe bande à des longueurs d'onde choisies. Le filtre utilisé pour les expériences est à une longueur d'onde de 2564 cm^{-1} ($3,9 \text{ }\mu\text{m}$), considéré comme étant dans la gamme du moyen infrarouge ($2,7$ et $5,2 \text{ }\mu\text{m}$). Ce filtre, à $3,9 \text{ }\mu\text{m}$, permettra comme évoqué en section 1.3.3) à l'échelle du cône, de s'affranchir de la contribution des gaz de combustion afin de se focaliser sur la température de surface du bois.

Les caméras IR telle que celle utilisée pour les expérimentations ne mesurent pas directement la température de surface de l'objet mais une réponse de signal de la part d'un pixel, appelé Digital Level (DL). Ce DL dépend du flux de photons arrivant sur la matrice du détecteur durant le temps d'intégration de la caméra. Le détecteur photoélectrique utilisé est un détecteur InSb (Antimoniure d'Indium). Le temps d'intégration correspond au temps pendant lequel des charges électriques qui apparaissent par effet photoélectrique s'accumulent sur le détecteur. Ce paramètre vient impacter directement la dynamique ainsi que la température maximale mesurable : pour un long temps d'intégration, une bonne dynamique à basse température est obtenue mais le détecteur risque vite de saturer pour les hautes températures. Pour un temps d'intégration faible, il sera possible de mesurer des hautes températures mais le rapport signal sur bruit sera mauvais. La phase de calibration doit permettre de trouver une valeur de temps d'intégration adéquat entre haute température et acquisition précise correspondant à l'expérience.

Afin de mesurer la température de surface des échantillons d'émissivité quelconque, la caméra doit être étalonnée au préalable à l'aide d'un corps noir à haute température (puisque les essais seront à des températures élevées). Il s'agit de suivre l'évolution du Digital Level de la caméra en fonction de l'émission (la luminance) du corps noir à différentes températures de consigne. La luminance énergétique monochromatique d'un corps noir, notée $L_{0,\eta}$, en fonction du nombre d'onde η (en cm^{-1}) et de la température de surface T_{surf} est définie par la loi de Planck (eq. 2.1) :

$$L_{0,\eta} = \frac{1}{\pi} \frac{C_1 \eta^3}{\exp\left(\frac{C_2 \eta}{T_{surf}}\right) - 1} \quad (2.1)$$

$L_{0,\eta}$ s'exprime en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{cm}$, $C_1 = 3,7418.10^{-16} \text{ Wm}^2$ et $C_2 = 1,4388.10^{-2} \text{ mK}$. La figure D.6 dans le livret des figures présente la variation des DL de la caméra dotée d'un filtre à 2564 cm^{-1} ($3,9 \mu\text{m}$) en fonction de la luminance du corps noir à cette même longueur d'onde. Les DL augmentent linéairement avec l'augmentation de la luminance. La pente déduite grâce à ces mesures sera utilisée dans la détermination de la luminance émise par la surface du bois au nombre d'onde de 2564 cm^{-1} . À noter que cette pente dépend de la longueur d'onde et donc du filtre utilisé. La calibration au corps noir a permis de fixer le temps d'intégration à $30 \mu\text{s}$.

La luminance mesurée lors des essais au cône permet d'identifier la température de surface, en inversant simplement la relation 2.1. Cependant, comme le flux reçu est en fait une combinaison du flux émis par la surface, plus la réflexion du rayonnement provenant du cône calorimètre, la luminance mesurée correspond d'après les travaux de Acem *et al.* [93] à :

$$L_\eta = \varepsilon_\eta L_{0,\eta}(T_{surf}(t)) + \rho_\eta L_{0,\eta}(T_{cone}) \quad (2.2)$$

avec ε_η l'émissivité spectrale de l'échantillon, T_{cone} la température du cône et ρ_η la réflexion spectrale de la surface ($\rho_\eta = 1 - \varepsilon_\eta$ pour un corps opaque). L'émission du cône peut être considéré comme étant proche de celle d'un corps noir d'après l'article de Boulet *et al.* [136]. Le rayonnement de l'environnement à température ambiante est clairement négligeable par rapport au rayonnement du cône et n'est pas pris en compte. Pour la présente analyse, ces réflexions parasites ont été prises en compte dans le traitement du signal grâce à une méthode de soustraction, qui a été appliquée sur les images infrarouges au nombre d'onde étudié [93]. Cette méthode de soustraction d'images successive permet de s'affranchir de la réflexion de l'émission du cône sur la surface de l'échantillon. On obtient ainsi une variation d'intensité directement corrélée à l'émission propre de l'échantillon. La méthode peut être résumée en trois étapes :

- L'évaluation de la luminance avec l'acquisition directe du signal grâce aux données d'étalonnage obtenues avec le corps noir haute température.
- Le calcul de la différence de luminance entre deux acquisitions successives $\Delta L_\eta = L_\eta(t) - L_\eta(t - \Delta t)$. Le temps d'acquisition est fixé pour les essais à 0,32 secondes.
- L'évaluation de la température $T_{surf}(t)$ à partir de l'inversion de la loi de Planck pour le rayonnement.

La détermination de la température de surface pendant un essai peut être déduite en fonction de la variation de luminance à l'aide de l'inversion de la loi de Planck :

$$T_{surf}(t) = \left[-\frac{1}{C_2 \eta} \ln \left(\frac{\pi \Delta L_\eta}{\varepsilon_\eta C_1 \eta^3} + e^{-\frac{C_2}{T(t-\Delta t)}} \right) \right]^{-1} \quad (2.3)$$

L'évaluation de la température a été initialisée à $T_{surf}(t = 0s) = 293K$. La détermination de la température de surface dépend entre autre, de ε_η du bois, qui peut varier en particulier en début de l'expérience, lorsque le bois en surface se transforme en charbon. Une étude préliminaire de la variation de l'émissivité du bois montrera que ce paramètre peut changer fortement d'une expérience à une autre.

2.3.2 Les caméras rapides

La caméra rapide visible

Une caméra rapide visible (Photron APX-RS) est utilisée afin de déterminer la localisation de l'auto-inflammation. L'objectif de ces vidéos est donc de quantifier la proportion d'auto-inflammation par la phase gaz et solide lorsqu'un échantillon de bois est soumis à flux de chaleur incident. Ces vidéos permettront également de vérifier l'influence ou non de l'élément chauffant sur l'auto-inflammation des échantillons en particulier lorsque celui-ci est à haute température ($> 910\text{ }^\circ\text{C}$) et délivre donc un flux thermique important ($> 82,5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) sur l'échantillon. Les localisations de flamme identifiées pourront également être liées au temps d'auto-inflammation de façon à mieux comprendre les dispersions existantes pour des mêmes conditions fixées (échantillons et flux).

La caméra est placée sur le côté du dispositif expérimental et visualise la zone se trouvant entre la surface exposée de l'échantillon et les spires chaudes du cône. La caméra est réglée de façon à enregistrer 3000 images par seconde avec une résolution de 512×1024 pixels. Au cours des expériences, la caméra recueille en continu les images sur un buffer. Dès lors où l'apparition de la flamme est détectée visuellement (à l'œil), le déclencheur est activé. Il est paramétré de façon à transférer les 3000 images avant le déclenchement et ainsi observer l'apparition de la flamme. Ce déclencheur est activé manuellement pour chaque expérience.

La caméra infrarouge TELOPS

Dans les dernières campagnes d'essai, une caméra infrarouge TELOPS rapide a été utilisée en complément d'une caméra visible pour enregistrer la localisation de l'auto-inflammation du bois dans la gamme infrarouge. La caméra était disposée au même endroit que la caméra visible afin d'enregistrer le même phénomène d'inflammation. Elle est, comme la caméra FLIR, équipée d'un système de roue filtrante permettant ainsi d'observer l'apparition de la flamme sous différentes longueurs d'onde telles que les suies ($3,9\text{ }\mu\text{m}$) ou le CO_2 ($4,45\text{ }\mu\text{m}$). Pour capturer ce phénomène ultra-rapide, la fréquence d'acquisition a été réglée à 4100 images par seconde avec une résolution de 96×640 pixels. Ces mesures seront seulement qualitatives en ce qui concerne le phénomène d'auto-inflammation du bois en orientation verticale dans la gamme infrarouge. L'enregistrement est réalisé à l'aide d'un buffer enregistrant en continu sur une durée de 3 secondes. Les données sont enregistrées à partir de 1,2 secondes avant le déclenchement du trigger. L'acquisition à une fréquence importante comme c'est le cas ici engendre des restrictions au niveau de la

dimension de l'image. La figure 2.5 présente une image infrarouge provenant de la caméra TELOPS. Cette image montre les spires chaudes du cône et l'échantillon (et son porte échantillon) placé en face. À gauche de l'image, l'échelle des Digital Levels captés par la caméra. L'augmentation de cette valeur est due à une augmentation de la température ou un changement très important de l'émissivité. L'aluminium sous le porte échantillon permet seulement de protéger la balance du rayonnement émis par le cône.

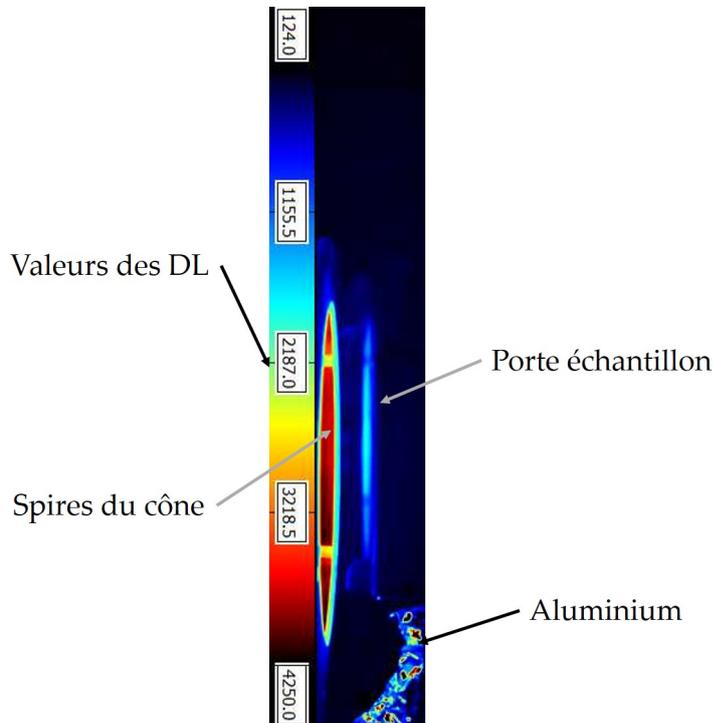


FIGURE 2.5 – Image infrarouge enregistrée avec la caméra TELOPS.

2.3.3 Les thermocouples

Les deux configurations de thermocouple utilisées pour les expériences

La mesure de la température dans les matériaux est généralement réalisée à l'aide de thermocouples. Les deux types de thermocouple utilisés dans l'étude de la température dans le bois sont des thermocouples de type K. Ce sont les capteurs les plus utilisés dans le domaine de l'incendie puisque leur plage de mesure est comprise entre -40 °C et 1200 °C . Ces capteurs sont composés d'un fil de chromel et d'un fil d'alumel soudés à leur extrémité. La figure 2.6 permet de visualiser les deux configurations de thermocouple utilisés.

Le thermocouple gainé est constitué d'une gaine en inconel 600 rigide dans laquelle se trouve les deux fils (de chromel et d'alumel) d'un diamètre de 0,2 mm. La soudure est une soudure chaude isolée, c'est à dire que le point de mesure (la soudure) ne se situe pas au niveau de la pointe de la gaine mais légèrement reculée et isolée avec de la céramique. Ce système permet de protéger la soudure et d'obtenir un capteur robuste, réutilisable et capable de résister à des sollicitations thermiques élevées. Le diamètre total du thermocouple gainé utilisé dans les expériences est de 1 mm. Le thermocouple soudé est

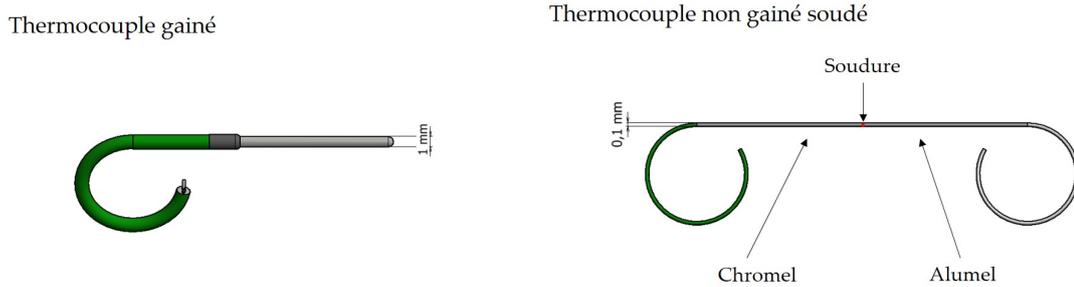


FIGURE 2.6 – Thermocouples utilisés lors des expériences.

quant à lui dépourvu de gaine en inconel mais seulement d'une petite gaine en plastique isolant électriquement les fils. Les deux fils, d'un diamètre de 0,1 mm, sont tout d'abord dénudés à la longueur souhaitée, placés l'un en face de l'autre, puis soudé directement au laboratoire à l'aide d'une décharge électrique. La soudure est autogène et est dans le prolongement des deux fils avec un diamètre légèrement plus grand mais inférieur à 0,2 mm. Les deux fils nus ne sont par contre pas protégés par une gaine et sont susceptibles de s'oxyder fortement lorsque la température dépasse les 800 °C. Pour ce prémunir de ce problème lors des expériences menées pendant la thèse, ces thermocouples étaient à usage unique.

Implantation des thermocouples dans les échantillons

Comme indiqué dans la section 1.3.3, la technique d'implantation des thermocouples dans le matériau bois peut induire des erreurs de précision dans les mesures de température. L'idée est donc de se baser sur les travaux de Fahrni *et al.* [65] et d'équiper les échantillons de bois de thermocouples de façon à mesurer des températures qui soient les plus précises possibles. En conséquence, un usinage spécifique des échantillons de bois a été réalisé pour implanter des thermocouples non gainés et soudés (que l'on appellera thermocouples noyés par la suite) de 0,1 mm de diamètre. Au total, douze thermocouples non gainés ont été disposés dans chaque échantillon de bois. La figure 2.7 montre les étapes méticuleuses d'usinage mises en œuvre pour intégrer des thermocouples dans l'échantillon. Le protocole proposé se décline en quatre étapes principales :

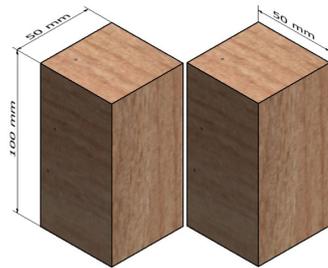
- Étape 1 : L'échantillon est coupé en son milieu puis surfacé perpendiculairement à la surface exposée.
- Étape 2 : Des rainures carrées de profondeur et de largeur de 0,2 mm sont usinées avec précision (avec une scie circulaire de 0,2 mm d'épaisseur) à la surface du bois aux emplacements souhaités (tous les 2 mm de 2 à 20 mm de profondeur de la surface exposée et deux autres à 30 et 40 mm de profondeur). Une photo d'un échantillon rainuré est disponible dans le livret en figure D.7.
- Étape 3 : Après l'usinage, des fils de thermocouple sont placés dans les rainures

carrées. Sur cette image, les points rouges représentent la position de la jonction du thermocouple, où la température est mesurée. Les câbles d'alumel et de chromel sont soudés bout à bout avec un soudage "maison", électrique autogène (sans ajout de métal).

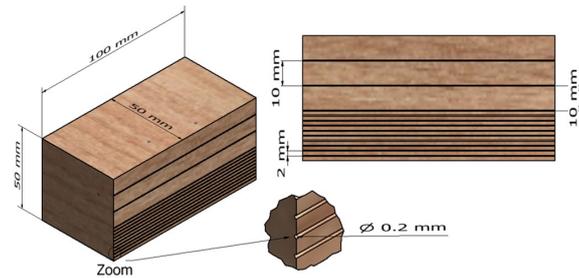
- Étape 4 : Les échantillons sont finalement collés avec de la résine mélamine-urée-formaldéhyde (MUF) et pressés pendant 6 heures.

Cette mise en place de thermocouples prend trois heures par échantillon, du rainurage au collage, y compris le soudage des thermocouples.

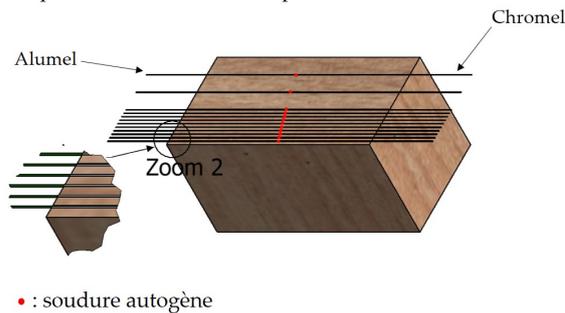
Étape 1 : Découpe et rabotage des échantillons



Étape 2 : Rainurage



Étape 3 : Implantation des thermocouples



Étape 4 : Collage des échantillons

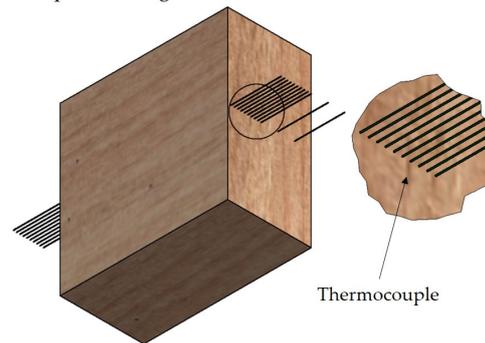


FIGURE 2.7 – Étape d'usinage du bois afin de disposer des thermocouples soudés et non gainés de 0,1 mm de diamètre.

Les mesures faites par les thermocouples noyés seront comparées aux mesures par thermocouples gainés. La mise en place de ces capteurs est plus "classique" puisque les thermocouples gainés sont placés dans le bois après perçage en face non exposée de l'échantillon. Ce perçage est réalisé grâce à un foret de 1,5 mm de diamètre à la profondeur souhaitée (avec une perceuse à colonne).

La mise en place des thermocouples noyés dans le bois demande un usinage complet des échantillons. Il est donc nécessaire de s'assurer que l'usinage, l'ajout de colle ou des fils de thermocouple ne modifient pas la dégradation de l'épicéa. Pour s'en rendre compte, des tests de dégradation au cône sur des échantillons usinés et non usinés ont été réalisés. La figure 2.8 compare l'évolution du MLRPUA pour des échantillons (usinés et non) exposés à 60 kW.m^{-2} .

Les évolutions du MLRPUA sont très similaires. Il est ainsi possible de considérer que la dégradation des échantillons avec thermocouples noyés est identique à celle sans. Par

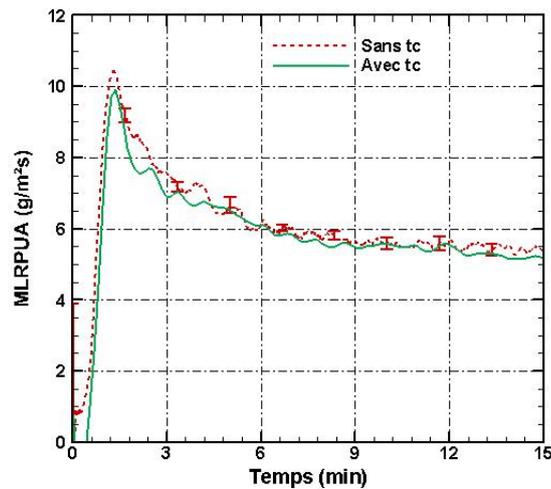


FIGURE 2.8 – Comparaison de l'évolution du MLRPUA avec et sans présence de thermocouple (tc).

rapport aux méthodes existantes, l'implantation de thermocouples proposée dans cette section présente de nombreux avantages pour obtenir des mesures de température en profondeur plus précises et fiables :

- Les fils du thermocouple sont très minces, ce qui minimise le flux de chaleur par conduction le long de ceux-ci.
- Les fils sont très souples, de sorte que les mesures de perte de masse peuvent être effectuées en même temps que les mesures de température.
- Les fils de chromel et d'alumel sont dans le prolongement l'un de l'autre (ce qui permet l'utilisation de rainures plus minces pour les mettre à l'intérieur, d'autant plus qu'aucune isolation électrique n'est nécessaire).
- La soudure électrique autogène est très petite (pas de matière supplémentaire).
- La position de la soudure du thermocouple est très précise.
- La résistance thermique entre le thermocouple et l'échantillon est négligeable.
- Les fils sont parallèles aux isothermes, minimisant le flux par conduction, qui est sans aucun doute le principal point positif de cette méthode (cet aspect sera présenté dans la partie résultats).

2.4 La fenêtre saphir

Une campagne expérimentale visant à étudier l'auto-inflammation de l'épicéa a nécessité de placer une fenêtre saphir entre l'échantillon et les spires du cône. Cette fenêtre a pour but de laisser passer une grande partie du flux émis par la résistance du cône tout en évitant le contact entre les gaz de pyrolyse et les spires chaudes. De plus, les propriétés optiques du saphir n'entravent pas la mesure de la température de surface avec la caméra

IR. La fenêtre saphir est en effet transparente dans la gamme infrarouge, jusqu'à une longueur d'onde de $5 \mu\text{m}$. La fenêtre, d'un diamètre de 20 cm (égal au diamètre extérieur du cône) et d'une épaisseur de 5 mm a été montée sur un mince support en acier. La figure 2.9 montre le dispositif expérimental équipé de cette fenêtre.



FIGURE 2.9 – Photo d'un échantillon enflammé avec la présence de la fenêtre saphir entre l'échantillon et le cône.

La distance entre la balance et le cône est augmentée à 4,5 cm (initialement 2,5 cm) de façon à disposer la fenêtre saphir et assurer une bonne circulation des gaz de pyrolyse. Cependant, la présence de cette fenêtre ne laisse passer qu'environ 60 % du rayonnement du cône. La température de consigne à imposer au niveau du cône doit donc être augmentée afin d'obtenir des valeurs de flux égales à celles utilisées sans fenêtre et à une distance initiale de 2,5 cm. Par conséquent, les tests ont été effectués uniquement à 49,5 et 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, car un flux plus élevé ne peut pas être obtenu lorsque la fenêtre en saphir est présente. Une nouvelle calibration au corps noir de la caméra infrarouge a été effectuée avec la présence de la fenêtre saphir.

2.5 La chambre à atmosphère inerte

L'état de l'art a montré que la quantité d'oxygène autour de l'échantillon peut influencer la dégradation (en particulier les phénomènes de combustion). En conséquence, une enceinte à atmosphère contrôlée a été conçue par l'équipe technique du LEMTA afin d'y placer des échantillons de bois en orientation verticale. La figure 2.10 présente une photo de cette enceinte.

Ce dispositif permet d'étudier l'effet de l'oxygène sur le processus de dégradation des échantillons d'épicéa au cône calorimètre. Pour cela, l'oxygène en périphérie de l'échantillon est éliminé par une injection constante d'argon à un débit de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Ce gaz lourd est piégé dans la chambre et est peu entraîné par les gaz de pyrolyse provenant de l'échantillon. L'injection se fait par la face arrière de la chambre à l'aide d'un tuyau



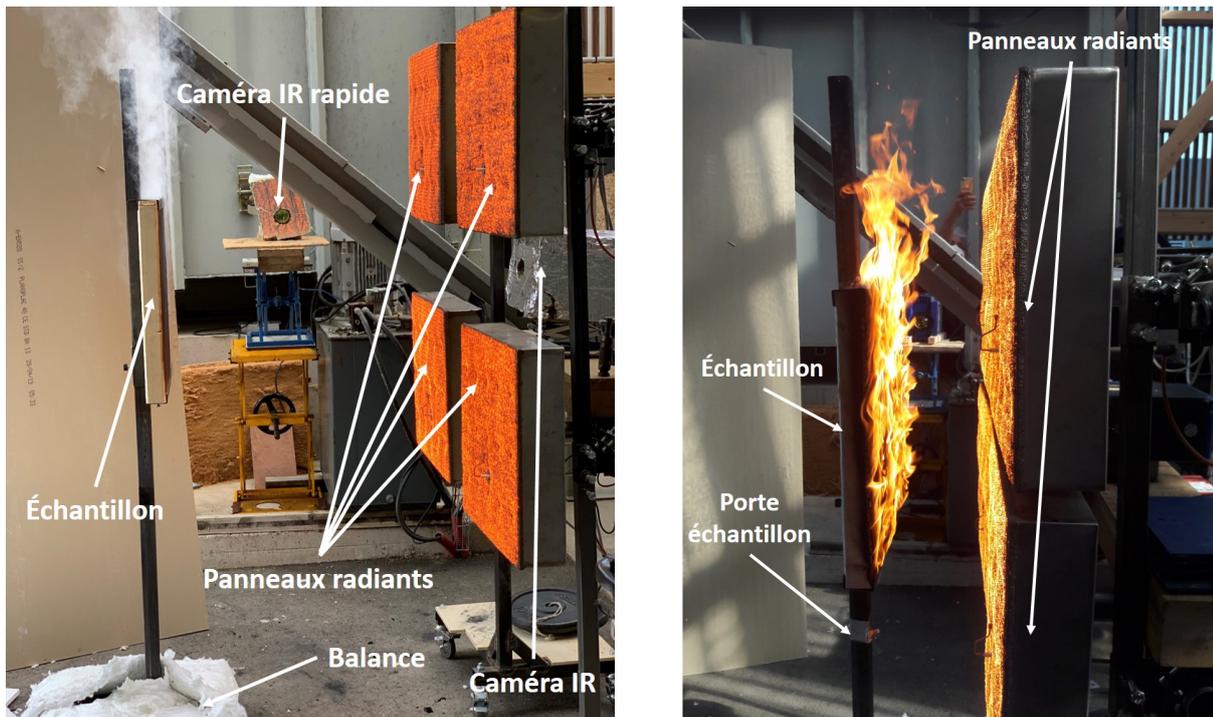
FIGURE 2.10 – Photo de l’enceinte à atmosphère contrôlée placée devant le cône.

souple. L’air contenu dans l’enceinte est prélevé au niveau de la partie supérieure de la face arrière de la chambre de sorte à contrôler la teneur en oxygène dans l’enceinte. Un analyseur de Gaz Testo est utilisé à cet effet. Un essai démarre après que le pourcentage d’oxygène dans la chambre soit stabilisé à environ 3 %. Pendant tous les essais qui seront présentés dans un chapitre suivant, le pourcentage d’oxygène n’a pas dépassé les 6 %. L’enceinte a été conçue de façon à placer uniquement l’échantillon à l’intérieur. Elle est rehaussée de façon à disposer la balance en dessous de la partie basse. La balance n’est donc pas contrainte (thermiquement ou mécaniquement) contrairement à des enceintes plus “classiques”. La fenêtre saphir, présentée dans la section précédente, est fixée sur la face exposée de la chambre de façon à conserver le système coulissant du cône tout en évitant à l’argon injecté de s’échapper. Ce système permet de maintenir une atmosphère contrôlée lors des essais sans perturber la mesure en continu des températures (surface et profondeur) et du MLRPUA.

2.6 Les essais panneaux radiants

Un partenariat avec le LERMAB (Laboratoire d’Étude et de Recherche sur le Matériau Bois) a permis d’effectuer une campagne expérimentale de dégradation d’échantillons d’épicéa en lamellé collé à l’aide de quatre panneaux radiants à gaz. L’objectif est d’opérer un changement d’échelle sur l’étude de l’auto-inflammation et de la dégradation des échantillons en orientation verticale. Les résultats pourront être comparés à ceux du cône. La figure 2.11 présente deux photos du dispositif expérimental.

Les quatre panneaux radiants (chacun mesurant 50 cm × 50 cm) sont disposés de façon à obtenir une surface rayonnante de 1 m². Les échantillons mesurent quant à eux 50 cm × 53 cm. La surface est donc 26,5 fois plus élevée que les échantillons utilisés pour les essais au cône (100 cm² pour le cône contre 2650 cm² pour les panneaux radiants). Les échantillons sont placés dans un porte échantillon réglable en hauteur spécialement



(a) Échantillon non enflammé pour un flux imposé de $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

(b) Échantillon enflammé proche des panneaux radiants (60 kW.m^{-2}).

FIGURE 2.11 – Photos du dispositif expérimental mis en place pour les essais d'Épinal.

conçu par l'atelier du LEMTA. Les essais ont été réalisés à l'abri mais en extérieur. Les conditions de vent peuvent donc potentiellement influencer la localisation de l'apparition de la flamme et le temps d'auto-inflammation. Les principales mesures effectuées sont la température de surface avec la caméra infrarouge, la perte en masse, la localisation de l'auto-inflammation avec deux caméras rapides (visible et infrarouge) et la température en profondeur avec des thermocouples noyés (usinage présenté en section 2.3.3).

2.7 Le Single Burning Item (SBI)

2.7.1 Généralités

Le Single Burning Item (SBI) est un essai normé de réaction au feu permettant d'évaluer et de certifier les produits de construction selon leur comportement au feu. Ce test, de moyenne échelle se situe entre le cône calorimètre et le room corner test. La classification européenne en vigueur depuis le 21 novembre 2002 est basée sur des paramètres mesurés et visuels pendant l'essai. La norme NF EN 13823 présente le banc SBI, décrit le déroulement d'un essai ainsi que les mesures réalisées et l'impact de celles-ci sur la classification d'un produit de construction. De nombreux matériaux sont testés tels que les isolants, les ossatures, les plaques de plâtre ou encore les gouttières extérieures qui sont ensuite classés selon l'Eurocode 5 en fonction des résultats obtenus. Cette classification est divisée en trois sous parties : l'énergie instantanée dégagée tout au long du test et l'énergie totale

(FIGRA et THR - lettres A, B, C, D ou E), l'opacité des fumées (SMOGRA - lettre s) et la formation de gouttelettes ou débris enflammés (lettre d).

Description générale

Le SBI est constitué d'un chariot sur lequel sont disposés perpendiculairement deux éléments verticaux du matériau étudié avec un brûleur propane à lit de sable placé à 4 cm du coin. Le brûleur est un triangle rectangle isocèle de 250 mm de côté. Ce chariot est placé sous une hotte avec un système permettant d'extraire de manière continue un débit volumique de 0,50 à 0,65 m³.s⁻¹. La flamme est générée par la combustion de gaz propane de manière à produire un débit calorifique de 30,7 ± 2 kW. La performance du matériau est évaluée pendant 20 minutes, période durant laquelle plusieurs mesures, visuelles et automatiques sont réalisées : la production de chaleur (débit calorifique), la production de fumée, la propagation horizontale du front de flamme et la chute de gouttelettes ou particules enflammées. Les mesures non visuelles telles que le débit calorifique sont principalement évaluées avec des analyseurs d'oxygène et de dioxyde de carbone présents dans le conduit au dessus du chariot.

Éprouvette

L'éprouvette est composée de deux ailes placées de façon à former un angle droit. Ces ailes en plaque doivent respecter des dimensions de petite aile (495×1500 mm) et grande aile (1000×1500 mm). Deux plaques de silicate de calcium sont placées en face arrière des ailes, le tout étant fixé à l'aide de brides en tête et en pied. Les éléments qui composent l'éprouvette doivent être conditionnés à température et humidité contrôlées selon la norme EN 13823.

2.7.2 Expériences et métrologie

Lors de ces essais, deux campagnes de mesure ont été réalisées. La première avec un matériau non combustible visant à quantifier le flux reçu à la paroi en fonction de la puissance imposée. La deuxième campagne a pour but quant à elle d'étudier le comportement au feu de l'épicéa en fonction du temps d'exposition et de la puissance du brûleur. Pour cela, différentes mesures ont été réalisées telles que la température dans le matériau, la profondeur de dégradation et la propagation latérale du front de pyrolyse à la surface.

Éprouvette et débits de gaz imposés

Dans les expériences réalisées dans le cadre de la thèse, le SBI n'a pas été utilisé comme essai normé donnant lieu à un classement de l'épicéa selon l'Eurocode 5 mais comme un outil permettant d'exposer des éprouvettes en bois selon différentes puissances de brûleur. Les deux ailes de l'échantillon sont de dimensions identiques, égales à celles de la petite aile, soient 495×1500 mm. Une plaque en silicate de calcium est ajoutée pour chaque essai du côté de la "grande" aile afin de combler la partie non occupée par la plaque

d'épicéa. Les ailes seront tout de même appelées petite et grande aile afin de simplifier la compréhension du texte. L'épaisseur du bois est de 5 cm, comme pour tous les essais réalisés à différentes échelles. Les éprouvettes de bois sont de l'épicéa constituées de 10 pièces de dimensions 50×1500 mm collées et mises sous presse formant ainsi une plaque en lamellé collé de 495×1500 mm. La figure 2.12 présente une éprouvette de bois avec les deux ailes de même taille disposée sur le SBI.



FIGURE 2.12 – Photo d'une éprouvette disposée sur le SBI. La grande et la petite aile sont de la même dimension.

Conventionnellement, le temps d'exposition d'une éprouvette au brûleur est de 20 minutes. Dans le cadre de la campagne d'essai, trois temps d'exposition à 15, 20 et 30 minutes ont été choisis de façon à mettre en évidence l'impact du temps sur la dégradation du bois et sur la production de charbon. De plus, le SBI est généralement utilisé avec une puissance de brûleur de 30 ± 2 kW. Il est cependant possible de régler le débit de gaz de façon à varier cette puissance. Les puissances de foyer fixées sont de 15, 20, 30, 50 kW correspondant à des débits de gaz de 320, 430, 648, 1100 $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.8 Le mini-SBI

Un partenariat entre le LEMTA, le CSTB et l'Unité Matériaux Et Transformations (UMET) a permis de réaliser une campagne d'essais en lien avec la thèse sur un nouveau dispositif expérimental développé par l'UMET : le mini-SBI.

Le mini-SBI est un dispositif expérimental basé sur le SBI à l'échelle 1/3. Il mesure les mêmes paramètres que le SBI, y compris le taux de dégagement de chaleur (HRR), le dégagement de chaleur total (THR), l'opacité de la fumée, etc. Le brûleur est placé dans le coin rejoignant le petit et le grand côté. L'agression thermique est également dimensionnée à l'échelle 1/3. Le débit de propane imposé au niveau du brûleur est $600 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, soit une puissance de 7,7 kW (avec un pouvoir calorifique inférieur du propane de $46 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Le matériau étudié est de l'épicéa en lamellé collé. Les échantillons sont dimensionnés à l'échelle 1/3 par rapport au SBI : $50 \times 33 \text{ cm}^2$ et $50 \times 16 \text{ cm}^2$ respectivement pour le grand et le petit côté exposé au brûleur à gaz. L'objectif de cette campagne d'essai est surtout de valider la mesure de température par les thermocouples noyés face à une puissance de brûleur prescrite.

Chapitre 3

Étude de l'auto-inflammation du bois

Sommaire

3.1 Flux critique d'auto-inflammation	62
3.2 Temps d'auto-inflammation	63
3.2.1 Représentations des temps d'auto-inflammation	63
3.2.2 Effet de la masse volumique des échantillons	65
3.2.3 Localisation de l'inflammation	66
3.3 Température de surface au moment de l'inflammation	69
3.3.1 Estimation de l'émissivité de l'épicéa	69
3.3.2 Température de surface à l'inflammation	70
3.3.3 Influence de la masse volumique de l'épicéa sur T_{infl}	72
3.4 Influence des conditions expérimentales	73
3.4.1 Orientation du cône calorimètre	73
3.4.2 Fenêtre saphir	74
3.5 Effet de l'humidité des échantillons	76
3.6 Effet de l'essence de bois sur les données d'auto-inflammation	78
3.6.1 Les temps d'auto-inflammation du hêtre	78
3.6.2 Localisation de l'apparition de la flamme	80
3.6.3 Les températures de surface à l'inflammation du hêtre	83
3.7 Comparaison des temps d'inflammation avec les modèles existants	84
3.8 Résumé	86

L'inflammation du bois est étudiée à l'échelle du cône calorimètre depuis de nombreuses années maintenant. Les conditions expérimentales telles que l'utilisation de pilote (igniteur, flamme) ou l'orientation jouent un rôle important sur le flux critique d'inflammation et le temps d'apparition de la flamme (t_{infl}). Cependant, il existe peu de résultats concernant l'auto-inflammation (sans pilote) du bois brut avec le cône calorimètre orienté verticalement. Pourtant, il existe de nombreux cas réels où la surface du bois est orientée verticalement et peut être soumise à un flux thermique élevé sans pilote à proximité.

En conséquence, une série de test a été réalisée au cône calorimètre en orientation verticale à différents flux et sans igniteur. L'auto-inflammation des échantillons est considérée comme étant le moment où une flamme visible est détectée. Elle peut être caractérisée par un certain nombre de paramètres tels que le flux critique d'inflammation, le temps d'inflammation, la température de surface au moment de l'inflammation ainsi que la localisation de l'apparition de la flamme (dans le visible et l'infrarouge). La majeure partie des résultats présentés dans cette partie concernent des échantillons d'épicéa ayant une humidité de 9 %. Une campagne supplémentaire a été effectuée avec des échantillons de hêtre afin de déceler ou non un effet de l'essence de bois. La variation des paramètres tels que l'orientation du cône ou l'humidité seront précisées si nécessaire.

3.1 Flux critique d'auto-inflammation

Le temps ainsi que le flux critique d'inflammation sont des grandeurs utilisées pour caractériser l'inflammation des matériaux. L'efficacité de certains retardateurs de flamme ou la résistance de certaines essences de bois face à un flux de chaleur prescrit peuvent être quantifiées grâce à ces deux quantités. Dans notre cas, l'épicéa en lamellé collé est la principale essence de bois étudiée. Les échantillons ont été exposés à différents flux : 16,5, 22, 38,5, 49,5, 60, 82,5 et 93,5 kW.m⁻² pendant une heure maximum. Les nombreux tests ont mis en évidence que l'auto-inflammation ne survenait pas après une heure d'exposition à des flux de 16,5, 22 et 38,5 kW.m⁻². En revanche, la combustion solide est apparue pour chacun de ces faibles flux, à des temps plus ou moins long (quelques secondes pour 38,5 kW.m⁻² et plusieurs minutes pour 16,5 kW.m⁻²), engendrant une forte dégradation des échantillons.

Pour les flux de 60, 82,5 et 93,5 kW.m⁻², l'auto-inflammation du bois s'est produite pour chaque test effectué. Enfin, pour une exposition à 49,5 kW.m⁻², l'auto-inflammation n'était pas systématique. Au total, dix échantillons d'épicéa ont été exposés à ce flux pendant une heure et l'apparition de la flamme n'a été constatée que pour quatre essais. Il est donc possible de considérer que le flux critique d'auto-inflammation de l'épicéa est proche de cette valeur en orientation verticale pour une exposition maximale d'une heure. Cette donnée de flux critique à 49,5 kW.m⁻² se situe dans l'intervalle déduit par Boonmee et Quintiere [41; 53] ou encore par Shields *et al.* [52] qui ont étudié l'auto-inflammation de l'épicéa en orientation verticale à l'échelle du cône. En effet, Boonmee et Quintiere ont déterminé expérimentalement un flux critique d'auto-inflammation de 40 kW.m⁻². Shields *et al.* ont quant à eux observé une auto-inflammation à partir de 50 kW.m⁻². Le temps d'exposition a été fixé au maximum à une heure, il est donc probable que les échantillons s'enflamment à un flux de chaleur légèrement inférieur à 49,5 kW.m⁻² si ce temps d'exposition est augmenté. Il apparaît donc que le flux critique d'auto-inflammation peut être compris entre 38,5 et 49,5 kW.m⁻².

3.2 Temps d'auto-inflammation

3.2.1 Représentations des temps d'auto-inflammation

Au total, 296 tests d'auto-inflammation à différent flux ont été réalisés ($49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 10 tests (dont 4 avec auto-inflammation), $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 103 tests, $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 97 tests et $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 92 tests). Pour chacun de ces essais, le temps d'apparition de la flamme a été systématiquement relevé. La quantité d'essais étant importante, une étude statistique de la proportion d'inflammation en fonction des temps d'inflammation a pu être réalisée. Les histogrammes des temps d'inflammation obtenus avec les échantillons d'épicéa pour les différents flux pour lesquels l'inflammation a été observée sont présentés sur la figure 3.1. Les temps d'auto-inflammation présentés ici regroupent les échantillons ayant une humidité comprise entre 9 et 10 %.

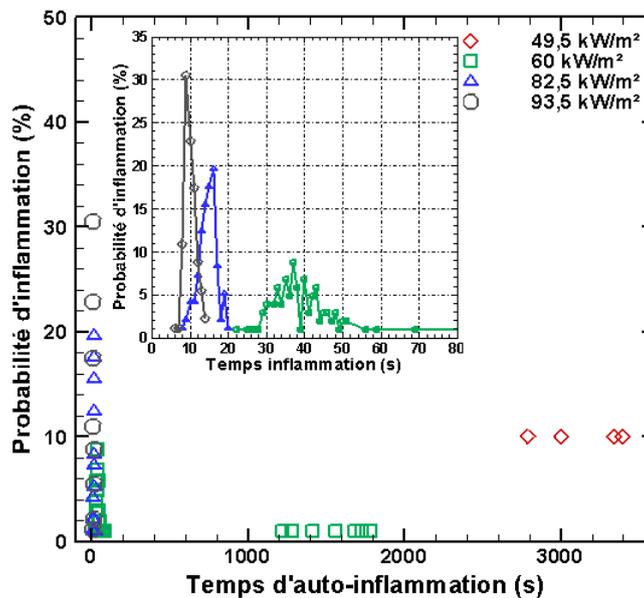
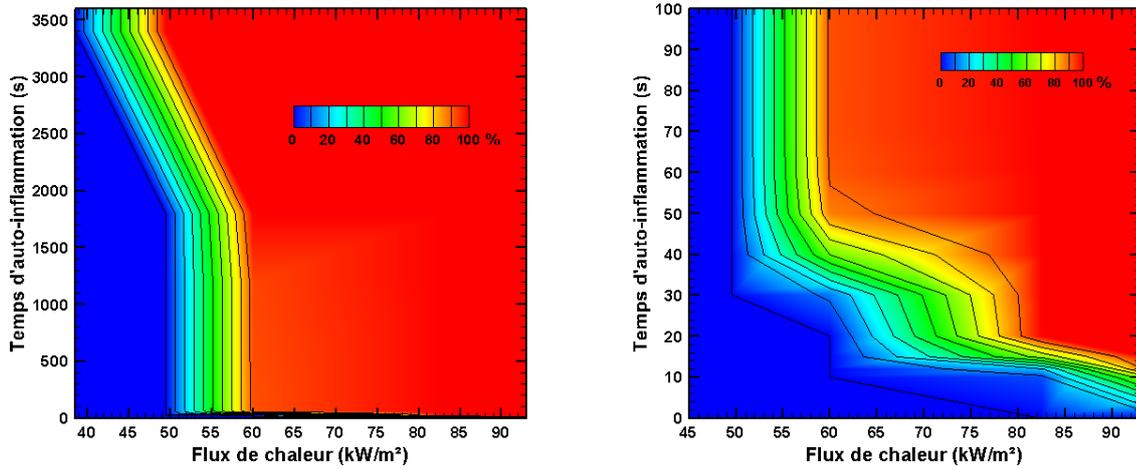


FIGURE 3.1 – Histogramme des temps d'auto-inflammation pour les 4 flux pour lesquels l'auto-inflammation s'est produite.

Globalement, l'augmentation du flux de chaleur diminue non seulement le temps d'inflammation mais également la dispersion des données. Pour $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, l'auto-inflammation ne s'est produite que pour quatre tests sur les dix réalisés. Les temps d'inflammation pour ce flux de chaleur critique sont toujours supérieurs à 2500 secondes. Boonmee et Quintiere [53] ont également enregistré des temps d'auto-inflammation supérieurs à 1200 secondes pour un flux imposé de $40 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, deux groupes de temps d'inflammation peuvent être mis en évidence. Le premier, également le plus peuplé, correspond à des temps d'inflammation inférieurs à 60 secondes. Cette gamme de temps (entre 40 et 59 secondes) a également été relevée par Shields *et al.* [52] pour un flux de chaleur de $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Le second correspond à des temps très supérieurs à 60 secondes (20 à 30 minutes après le début de l'expérience). Enfin, pour 82,5 et 93,5

kW.m^{-2} , la dispersion des temps d'auto-inflammation est très faible. En effet, 92 % des temps d'inflammation sont compris entre 8 et 12 secondes pour une exposition à $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ et 73 % entre 13 et 17 secondes pour $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$. La figure 3.2 présente une cartographie de la probabilité d'auto-inflammation en fonction du flux de chaleur incident et du temps d'inflammation. Cela permet, entre autre, d'extrapoler les résultats à d'autres flux non étudiés expérimentalement ou encore de définir un critère sur la probabilité que l'échantillon s'auto-enflamme à un temps inférieur à un temps donné pour un flux prescrit.



(a) t_{infl} de tous les flux.

(b) $t_{infl} < 100$ secondes pour des flux élevés.

FIGURE 3.2 – Cartographie de la probabilité d'auto-inflammation en fonction du temps d'inflammation et du flux de chaleur imposé par le cône.

Après plusieurs expériences, aucun échantillon ne s'enflamme après une heure d'exposition à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Cela se traduit par une probabilité nulle d'auto-inflammation pour ces deux paramètres fixés. Pour $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$, l'inflammation n'est pas systématique (4 échantillons sur 10 s'enflament) après une heure d'exposition. Il y a donc 40 % des échantillons qui peuvent s'auto-enflammer à $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Ces cartographies montrent par exemple que la probabilité d'enflammer le bois lorsque celui-ci est exposé pendant une heure à 60 kW.m^{-2} est de 100 %. Lorsque ce flux augmente jusqu'à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, 80 % des échantillons s'enflament avant 18 secondes d'exposition. À partir de ces courbes, on peut par exemple définir pour un flux donné à un temps d'inflammation t_{infl50} au delà duquel on aura une probabilité d'auto-inflammation de 50 %. Dans ce cas et d'après les 296 expériences menées, si un échantillon d'épicéa est exposé à 60, 82,5 ou $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$, il a 50 % de chance de s'auto-enflammer à des temps inférieurs à 38, 14 et 10 secondes respectivement. Le t_{infl50} à 60 kW.m^{-2} est proche de celui enregistré expérimentalement par Reszka et Torero [58] (40 secondes). Il est également possible d'estimer le temps pour que la probabilité d'auto-inflammation soit de 50 % à 75 kW.m^{-2} (expérience non réalisée à ce flux) à 17 secondes.

Le nombre important de tests présentés dans les figures 3.1 et 3.2 permet d'estimer finement des critères de temps d'auto-inflammation pour un flux de chaleur donné et même

d'extrapoler des résultats (pour des flux non testés expérimentalement) en bon accord avec la littérature. Il est possible de distinguer deux groupes principaux : un premier avec des temps d'auto-inflammation courts pour des flux imposés élevés et un deuxième à des temps d'auto-inflammation longs pour les flux imposés plus faibles. En revanche, les 296 tests montrent également une importante disparité des temps d'auto-inflammation pour des conditions expérimentales identiques, en particulier lorsque les valeurs de flux sont proches de celle du flux critique d'auto-inflammation. En effet, pour un flux de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 8 % des apparitions de flamme surviennent après 1200 secondes d'exposition. Ces disparités semblent difficiles à analyser au vu des nombreux paramètres qui peuvent intervenir dans le processus d'auto-inflammation. Certains d'entre eux sont étudiés dans les sections suivantes.

3.2.2 Effet de la masse volumique des échantillons

De nombreux travaux se sont penchés sur l'impact de la variation de la masse volumique du bois sur le délai d'inflammation. Même si dans notre cas, un seul matériau est majoritairement étudié, la masse volumique peut tout de même varier de 300 à $560 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pour une humidité comprise entre 9 et 10 %. La figure 3.3 compare les temps d'inflammation en fonction des masses volumiques du bois pour les 267 essais réalisés à différents flux de chaleur ($49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 4 tests, $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 87 tests, $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 86 tests et $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$: 90 tests).

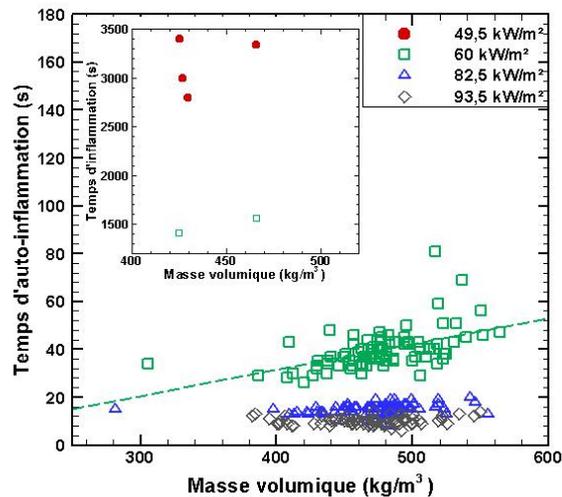


FIGURE 3.3 – Temps d'inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons d'épicéa.

De manière générale, la masse volumique ne semble pas avoir un impact très significatif sur le temps d'apparition de flamme pour les tests à $82,5$ et $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Pour le flux critique ($49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$), le nombre d'essais pour lesquels l'inflammation se produit est assez faible, mais à première vue, la masse volumique du bois n'est pas en lien avec les écarts importants au niveau du temps d'auto-inflammation. Le flux à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ est le

seul pour lequel une influence suffisamment nette de la masse volumique sur le temps d'inflammation peut être observée. La tendance est alors une augmentation linéaire du temps d'inflammation avec la masse volumique (pour des temps d'inflammation inférieurs à 90 secondes). L'apparition de la flamme a lieu après 40 secondes pour une masse volumique de 450 kg.m^{-3} , tandis que ce temps est aux alentours des 55 secondes pour une masse volumique d'échantillon de 550 kg.m^{-3} . L'effet reste relativement faible et masqué par la dispersion des valeurs de temps d'inflammation en particulier pour les inflammations à des temps longs où la masse volumique est aux alentours de 450 kg.m^{-3} .

En résumé, il semblerait que pour l'épicéa, la dispersion de masse volumique (entre 300 et 560 kg.m^{-3}) ne semble pas avoir un impact vraiment significatif sur le temps d'auto-inflammation. Cette dispersion de masse volumique ne permet pas non plus de statuer sur la dispersion des temps d'auto-inflammation pour un flux donné.

3.2.3 Localisation de l'inflammation

Lors des premiers essais, il a été observé visuellement que différents types d'inflammation pouvaient avoir lieu, en particulier selon que l'inflammation se produit à des temps courts ou longs. En effet, à des temps courts, un "flash" est observé au moment de l'auto-inflammation au niveau des gaz de pyrolyse. Pour des temps longs, la flamme semble s'échapper de la surface de l'échantillon exposée au cône calorimètre. Ces observations ont également été soulignées dans plusieurs articles [41; 47; 48; 49]. Afin d'étudier les différents types d'inflammation et leurs conséquences possibles sur les temps d'inflammation, une caméra rapide visible (présentée en section 2.3.2) a été employée afin de localiser précisément le point de départ de l'inflammation.

Les différents types d'inflammation

La caméra visible possède une fréquence d'acquisition de 3000 images par seconde et permet de déterminer de façon précise la localisation de l'inflammation. Un total de 162 films ont été réalisés afin d'observer les différents types d'inflammation ainsi que leur proportion en fonction du flux imposé. Les films ont permis de mettre en évidence trois types d'inflammation : une auto-inflammation éloignée du cône et de la surface exposée (figure 3.4), une auto-inflammation proche de la surface exposée (figure 3.5) et une inflammation pilotée par les spires du cône (figure 3.6). L'inflammation par les spires chaudes du cône a été évoquée par Crémona [48] en orientation horizontale toutefois sans étudier la proportion par rapport au flux appliqué. Les temps affichés sur les images des figures 3.4 à 3.6 indiquent que le phénomène d'inflammation est très rapide ($< 0,1$ seconde pour que l'ensemble des gaz de pyrolyse se soient enflammés).

Les auto-inflammations proches de la surface exposée sont caractérisées par une apparition de flamme semblant s'échapper de la surface de l'échantillon (la figure D.9 illustre ce phénomène avec une vue de face de l'inflammation). Les flammes apparaissent et sont entretenues au niveau des fissures présentes sur l'échantillon. C'est en effet à cet endroit que la libération de gaz de pyrolyse est la plus importante en quantité. L'intensité de la

flamme est visuellement plus faible que pour des inflammations se produisant dans les gaz.

Pour des auto-inflammations éloignées de la surface exposée ou pilotées par les spires du cône, le point de départ de la flamme se distingue nettement dans les gaz de pyrolyse. L'inflammation se propage ensuite très rapidement dans toute la zone gazeuse environnante jusqu'à venir se raccrocher sur la surface exposée d'où sortent les gaz de pyrolyse.



FIGURE 3.4 – Photos d'une auto-inflammation au niveau des gaz de pyrolyse.

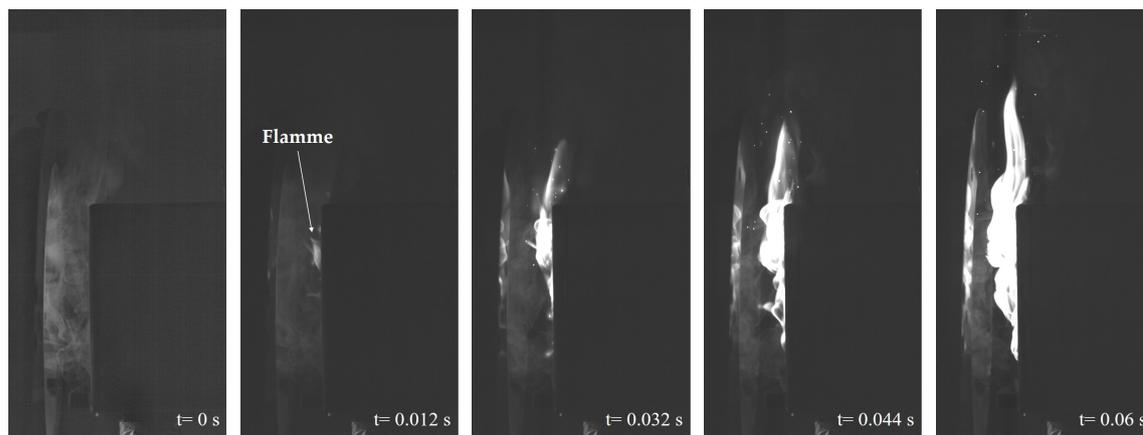


FIGURE 3.5 – Photos d'une auto-inflammation au niveau de la surface exposée.

Il convient de préciser à nouveau qu'il s'agit ici d'auto-inflammation (i.e les tests ont été réalisés sans pilote). Dans ce qui suit, un intérêt particulier sera porté sur la mise en évidence d'une corrélation ou non entre ces trois types d'inflammation et les autres paramètres tels que le flux appliqué et le temps d'auto-inflammation.

Lien entre temps d'inflammation et localisation de l'inflammation

Le tableau 3.1 permet de comparer les temps d'inflammation en fonction de la localisation correspondante. La fréquence d'apparition des différentes inflammations est également renseignée pour les 162 essais réalisés aux quatre flux imposés.

Comme présentée dans les sections précédentes, l'auto-inflammation des échantillons exposés à $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$ n'est pas systématique (40 %) et ne se produit qu'à des temps

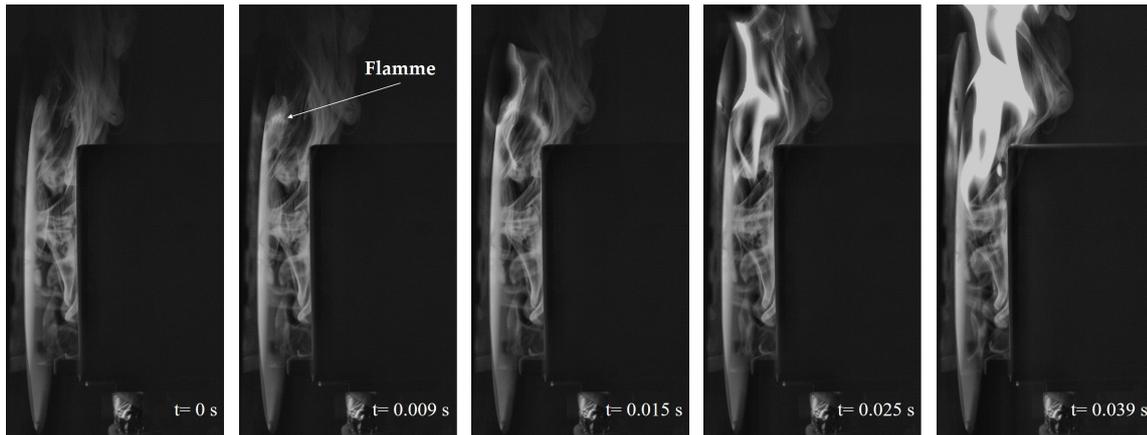


FIGURE 3.6 – Photos d'une inflammation des gaz de pyrolyse pilotée par les spires du cône.

TABLEAU 3.1 – Temps d'auto-inflammation en fonction de la localisation de l'inflammation pour chaque flux imposé.

	49,5 kW.m ⁻² 10 films		60 kW.m ⁻² 55 films		82,5 kW.m ⁻² 52 films		93,5 kW.m ⁻² 45 films	
	Tests	t_{infl} (s)	Tests	t_{infl} (s)	Tests	t_{infl} (s)	Tests	t_{infl} (s)
Auto-inflammation éloignée	-	-	88 %	39 ± 7	83 %	14 ± 2	60 %	10 ± 2
Auto-inflammation proche de la surface	40 %	> 2790	8 %	> 1200	-	-	-	-
Inflammation pilotée par les spires	-	-	4 %	33	17 %	11 ± 2	40 %	10 ± 1

longs et dispersés. Il s'avère de plus que cette auto-inflammation se produit à chaque fois proche de la surface. Au dessus de 49,5 kW.m⁻², l'inflammation s'est produite pour chaque essai et le temps d'inflammation diminue lorsque le flux imposé augmente. Pour les essais à 60 kW.m⁻², la localisation de l'auto-inflammation se situe principalement loin de la surface exposée avec un temps d'auto-inflammation inférieur à une minute. Cependant, pour quelques tests, l'inflammation s'est produite près de la surface avec un temps d'inflammation important (au delà de 1200 secondes). Pour les deux flux de chaleur les plus élevés, l'inflammation pilotée par les spires chaudes du cône est non négligeable, notamment en raison de l'augmentation de la température de consigne de celui-ci. Il apparaît également que le point de départ de la flamme n'a pas d'impact significatif sur le temps d'auto-inflammation même si ce temps est légèrement plus court lorsque l'inflammation est pilotée par les spires chaudes du cône. Compte tenu de ces premiers résultats, trois types de comportement peuvent être mis en évidence :

- Pour les bas flux, l'auto-inflammation se produit proche de la surface à des temps longs.
- Lorsque le flux augmente, l'inflammation dans les gaz devient très largement majoritaire même s'il peut tout de même subsister quelques inflammations à proximité de la surface à des temps longs.
- Pour les très hauts flux, les spires chaudes du cône peuvent piloter l'inflammation, diminuant légèrement le temps d'inflammation.

Ce tableau montre que les mécanismes d'inflammation sont différents en fonction du temps d'inflammation en particulier pour des temps longs. L'inflammation par les spires se produit à des temps généralement toujours plus courts que les autres types d'inflammation. Le cône semble donc intervenir dans l'inflammation des échantillons en particulier lorsque le flux imposé augmente.

3.3 Température de surface au moment de l'inflammation

L'état de l'art a montré que la détermination de la température au moment de l'inflammation était une donnée considérée comme cruciale dans l'ingénierie de la sécurité incendie. Cependant, cette mesure est très difficile et engendre par conséquent des résultats très dispersés qui peuvent être causés, en plus des conditions expérimentales, par la mesure elle-même. Comme présenté en section 2.3.1, lors de ce travail de thèse, la température de surface a été obtenue à l'aide d'une caméra infrarouge placée en face arrière du cône.

3.3.1 Estimation de l'émissivité de l'épicéa

L'estimation de la température de surface dépend de l'émissivité de la surface des échantillons. Elle est souvent prise comme égale à 0,9 ou 1. Cependant, celle-ci peut varier lorsque le bois se dégrade (du fait du noircissement et de la déformation de la surface, et/ou de l'augmentation de la température). Cette variation peut donc dépendre du flux appliqué ainsi que du temps d'exposition. Une étude ayant pour objectif de caractériser cette variation d'émissivité pour différents temps et flux prescrits a donc été effectuée. Le protocole adopté consiste à exposer des échantillons à un flux donné pendant des temps d'exposition bien déterminés. Les échantillons sont ensuite immédiatement refroidis à l'azote liquide afin de stopper le processus de dégradation. L'émissivité à froid des échantillons est alors caractérisée à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier. Plus précisément, la mesure de l'émissivité spectrale est indirecte. Il s'agit de caractériser au spectromètre la réflexion directionnelle hémisphérique des échantillons à l'aide d'une sphère intégrante. Les échantillons étant opaques, on en déduit directement l'absorptivité spectrale et donc l'émissivité spectrale en vertu de la loi de Kirchhoff stipulant l'égalité entre ces deux grandeurs.

Des échantillons d'épicéa ont été soumis à un flux égal à $38,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ pour différents temps d'exposition et la mesure de l'émissivité a été effectuée sur quatre points par échantillon. Comme évoqué dans l'état de l'art [68; 136], la dépendance spectrale de l'émissivité du bois est fortement marquée et lorsque l'échantillon est soumis à un flux de chaleur, l'émissivité spectrale varie en fonction du temps d'exposition. Ces variations sont illustrées en annexe sur la figure D.8. Pour rappel, la température de surface est mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge dotée d'un filtre passe bande à 2564 cm^{-1} . C'est donc à ce nombre d'onde qu'il

convient de caractériser précisément l'évolution de l'émissivité au cours de la dégradation. La figure 3.7 présente la variation d'émissivité de l'épicéa à 2564 cm^{-1} en fonction du temps d'exposition et du flux de chaleur imposé. Au total, douze échantillons soumis à $38,5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et sept échantillons soumis à $60\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ont été utilisés pour déterminer la variation de l'émissivité du bois. La valeur de l'émissivité du bois vierge est mesurée à $0,85 \pm 0,01$ sur 16 points de mesure.

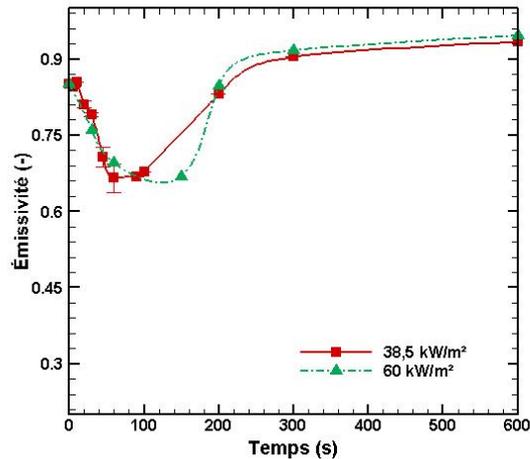


FIGURE 3.7 – Variation de l'émissivité de l'épicéa à 2564 cm^{-1} pour différents temps d'exposition et flux prescrits.

Les mesures montrent que l'émissivité varie en début d'expérience en fonction du flux imposé et du temps d'exposition. Celle-ci décroît tout d'abord jusqu'à atteindre un minimum de 0,67 avant de remonter vers une valeur proche de 0,93. Cette étude montre que la valeur de l'émissivité du bois peut varier en particulier en début d'expérience, c'est-à-dire lorsque les échantillons peuvent s'auto-enflammer. La température de surface peut donc être assez différente de celle calculée si une mauvaise valeur d'émissivité est prise en compte. Cependant, tant que l'émissivité de la surface ne sera pas déterminée in situ, pendant la dégradation du bois, il sera difficile de mesurer avec précision cette température. En conséquence, l'émissivité du bois a été fixée à 0,9 lors du traitement de la température de surface en ayant conscience de l'erreur qui peut être faite concernant la détermination de la température de surface au moment de l'inflammation. L'impact de la valeur de cette émissivité sur la température de surface mesurée au moment de l'inflammation sera discuté dans la section suivante.

3.3.2 Température de surface à l'inflammation

La température de surface au moment de l'auto-inflammation du bois est notée T_{infl} . Pour rappel, cette donnée est ici calculée par un modèle inverse de la loi de Planck à partir des mesures de caméra infrarouge et une émissivité fixée à 0,9. La figure 3.8 présente la température de surface en fonction du temps d'inflammation pour les 190 tests (4 tests

pour $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 59 tests pour $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 62 tests pour $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et 65 tests pour $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$).

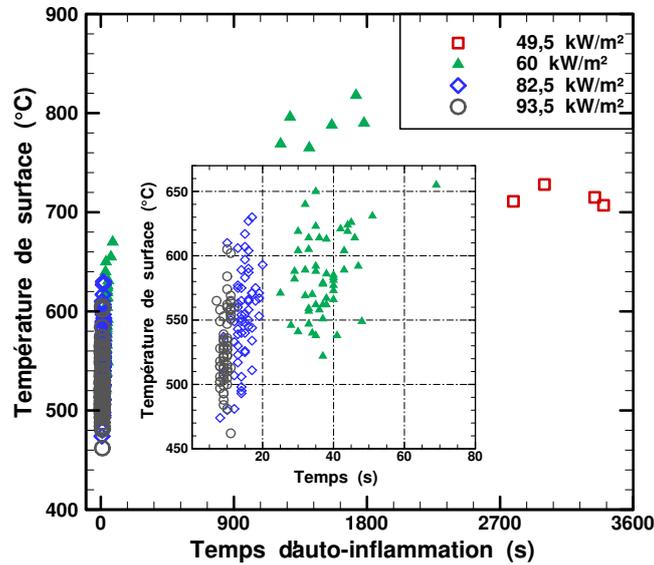


FIGURE 3.8 – Température de surface en fonction du temps d'inflammation.

Comme démontré dans certaines études, la température de surface au moment de l'inflammation augmente logiquement lorsque le temps d'inflammation augmente. Les temps d'inflammation étant plus dispersés lorsque le flux diminue (figure 3.1), il en est de même pour la température de surface à l'inflammation. Pour des temps d'inflammation inférieurs à 25 secondes, la température de surface au moment de l'inflammation est comprise entre 460 et 635 °C. Boonmee et Quintiere [53] ont déterminé une gamme comprise entre 375 et 565 °C. Cette gamme reste en bon accord avec celle déterminée présentement, quoique légèrement plus faible. Pour des temps d'inflammation compris entre 30 et 60 secondes, la température de surface relevée au moment de l'inflammation se situe entre 525 et 650 °C. Enfin, pour des temps d'inflammation élevés (> 20 minutes), la température de surface de l'échantillon est comprise entre 700 et 825 °C.

Incertitude liée au temps d'inflammation

Le temps d'inflammation étant mesuré avec une incertitude d'une seconde et la température évoluant avec le temps, il en résulte une incertitude sur la température de surface au temps d'inflammation. À des temps longs, la température de surface varie en moyenne de 4 °C entre $t_{infl} - 1$ seconde et $t_{infl} + 1$ seconde par rapport au temps d'inflammation mesuré pendant l'essai (variation de 10 °C maximum). Cependant, pour des temps d'inflammation inférieurs à 20 secondes, la température de surface augmente très rapidement et l'impact du temps d'auto-inflammation sur la température de surface est très important. En effet, la différence de température de surface entre $t_{infl} - 1$ seconde et $t_{infl} + 1$ seconde peut aller jusqu'à ± 50 °C (voir figure D.10 dans le livret des figures).

Incertitude liée à l'émissivité

Comme présenté dans la section 3.3.1, l'émissivité de l'échantillon peut descendre jusqu'à 0,7 lors des 2 premières minutes d'exposition. Pour évaluer l'impact de cette variation d'émissivité, le calcul de température de surface à l'inflammation a été réalisé pour une émissivité égale à 0,9 et pour une émissivité égale à 0,7. Logiquement la diminution de l'émissivité résulte d'une augmentation de la température de surface calculée. Par exemple celle-ci peut passer de 550 à 600 °C, ou encore de 475 à 500 °C. L'effet de l'émissivité sur la température déterminée est présentée en annexe figure D.11 pour 17 essais.

3.3.3 Influence de la masse volumique de l'épicéa sur T_{infl}

La figure 3.9 permet d'observer l'impact de la masse volumique des échantillons sur la température de surface à l'inflammation des 176 tests (4 pour 49,5 kW.m⁻², 54 pour 60 kW.m⁻², 55 pour 82,5 kW.m⁻² et 63 pour 93,5 kW.m⁻²).

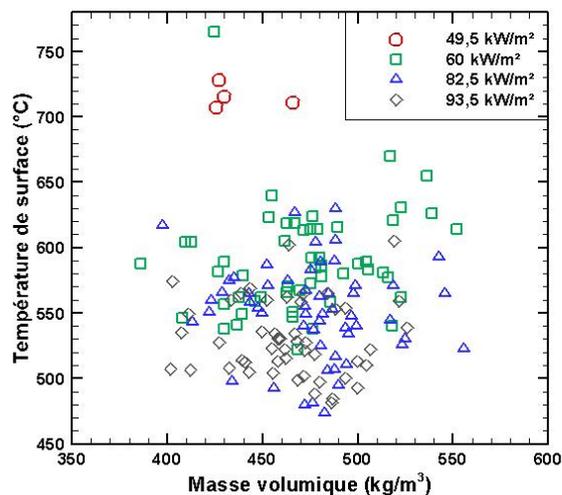


FIGURE 3.9 – Température de surface à l'inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons.

Les 176 points présentés dans cette figure ne mettent pas en évidence une quelconque influence de la masse volumique des échantillons sur la température de surface à l'inflammation. Pour un flux de 93,5 kW.m⁻² par exemple, la température de surface à l'inflammation peut être égale à 575 °C pour une masse volumique de 403 kg.m⁻³ et égale à 490 °C pour une masse volumique de départ de 500 kg.m⁻³, soit une différence de 85 °C concernant la température de surface à l'inflammation alors que la masse volumique diffère de 97 kg.m⁻³. Au contraire, pour un flux de 60 kW.m⁻², la température de surface à l'inflammation est à 590 °C pour une masse volumique de 450 kg.m⁻³ tandis qu'elle augmente jusqu'à 655 °C pour une masse volumique de 535 kg.m⁻³. En bref, les résultats présentent une disparité très importante des données et ne permettent pas d'émettre un lien entre la température de surface à l'inflammation et la masse volumique de départ des échantillons.

3.4 Influence des conditions expérimentales

3.4.1 Orientation du cône calorimètre

L'étude de la réaction au feu des échantillons au cône calorimètre est généralement réalisée en orientation horizontale et pilotée. Ce dispositif permet principalement de limiter la dispersion des résultats. La variation des données selon le type d'orientation du cône a été au centre de certaines études [35; 52]. Dans le cadre de cette thèse, l'étude de l'auto-inflammation en orientation verticale a été retenue pour des raisons pratiques (mesure de la température de surface avec la caméra infrarouge, via l'ouverture du cône) et scientifique (essais SBI pour la montée en échelle). Ce choix permet en outre d'enrichir les données dans une orientation peu étudiée au cône calorimètre. Cependant, quelques essais ont également été réalisés avec le cône orienté horizontalement sans pilote. Les échantillons ont été exposés pendant 30 minutes à différents flux incidents variant de 38,5 à 82,5 kW.m⁻². Deux tests ont été effectués pour chaque flux excepté pour 38,5 kW.m⁻² où 3 tests ont pu être réalisés. Le temps d'auto-inflammation ainsi que la localisation de l'apparition de la flamme avec la caméra rapide visible ont été déterminés. En revanche, la mesure de la température de surface par la caméra infrarouge ne peut être effectuée en orientation horizontale. Le tableau 3.2 permet de comparer les temps d'inflammation pour les deux orientations du cône.

TABLEAU 3.2 – Comparaison des valeurs des t_{infl} , en seconde, entre les deux orientations.

Orientation du cône	38,5 kW.m ⁻²	49,5 kW.m ⁻²	60 kW.m ⁻²	82,5 kW.m ⁻²
Verticale	-	~3000	25-1200	9-20
Horizontale	131-160	29-36	25	9-13

Les échantillons s'auto-enflamment pour 2 tests sur 3 à 38,5 kW.m⁻² en orientation horizontale à des temps compris entre 131 et 160 secondes. Pour tous les flux, les temps d'inflammation sont systématiquement plus courts en orientation horizontale. La disparité est quant à elle moins importante même si la quantité d'essai est assez faible pour en déduire des informations statistiques fiables. Sur les 9 tests au total, 6 films avec la caméra rapide ont été réalisés afin de localiser l'apparition de la flamme. Il apparaît que la moitié des inflammations se produit dans les gaz (figure 3.10) tandis que l'autre moitié est pilotée par le cône (figure 3.11). Aucune inflammation à proximité de la surface n'a été observée, mais aucun essai à des temps supérieurs à 30 minutes n'a été réalisé.

Ces essais montrent que le flux critique d'auto-inflammation peut varier d'au moins 10 kW.m⁻² en fonction de l'orientation des échantillons d'épicéa. Les observations faites par les études précédentes confirment que le comportement au feu des échantillons diffèrent selon leur orientation. Même si peu d'essais ont été effectués horizontalement, les vidéos de caméra rapide révèlent que la quantité de gaz de pyrolyse qui impactent les spires du cône est plus importante qu'en vertical. Il semblerait donc que l'inflammation pilotée par les spires du cône soit d'autant plus favorisée en orientation horizontale.

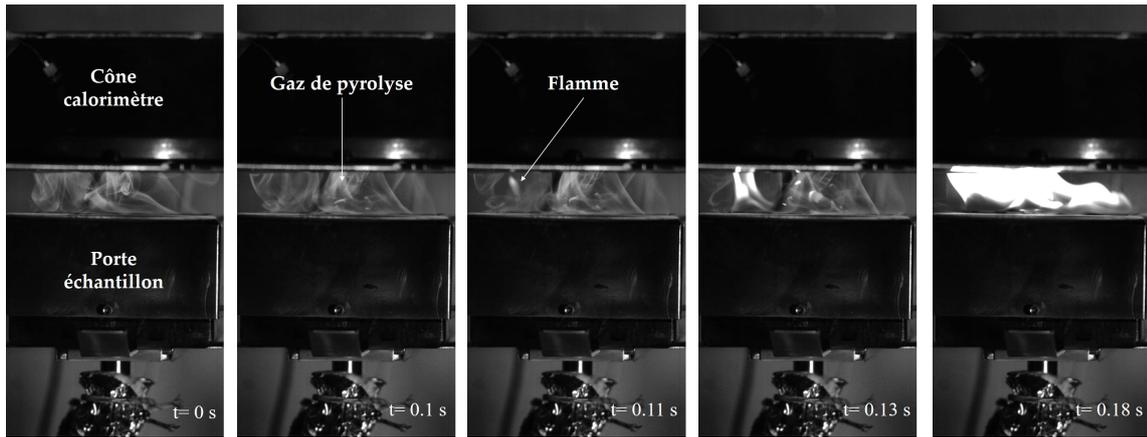


FIGURE 3.10 – Photos d'une auto-inflammation au niveau des gaz.

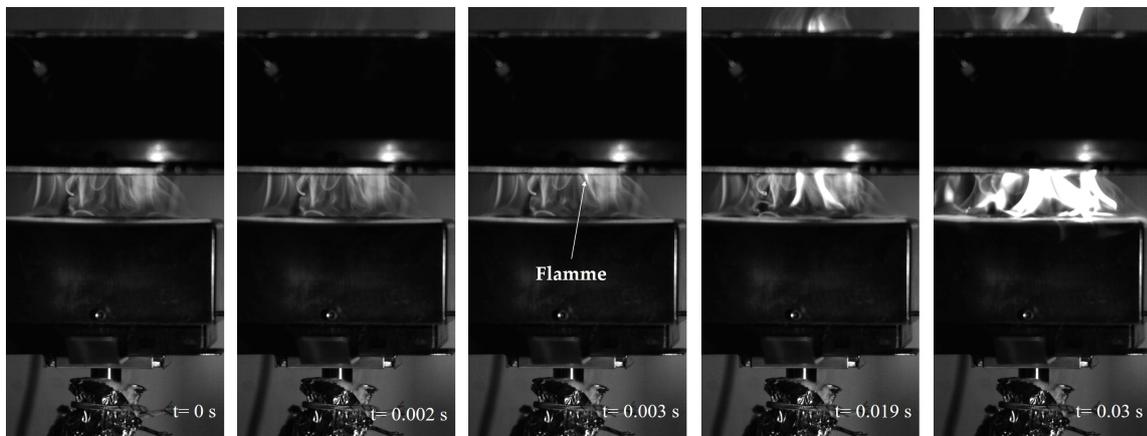


FIGURE 3.11 – Photos d'une inflammation pilotée par les spires du cône.

3.4.2 Fenêtre saphir

L'influence du dispositif expérimental sur les conditions d'auto-inflammation du bois est une question intéressante compte tenu des dispersions des temps d'auto-inflammation pour des mêmes conditions fixées. Lorsque le flux de chaleur est très élevé, la proportion d'inflammation provoquée par les spires chaudes du cône devient non négligeable. Pour prévenir ce cas de figure, une fenêtre saphir a été ajoutée, empêchant les gaz de pyrolyse de venir en contact avec les spires. Pour rappel, le saphir présente l'avantage d'être transparent à la longueur d'onde d'étude sélectionnée pour la caméra infrarouge, et de laisser passer une quantité suffisante du rayonnement en provenance du cône (environ 60 %). L'ajout de cette fenêtre saphir modifie quelque peu la configuration du cône, en particulier la distance entre le cône et l'échantillon, désormais de 4,5 cm (2,5 cm initialement). Des tests réalisés à cette distance sans fenêtre saphir avec le même flux imposé ont montré que les valeurs de vitesse de perte en masse et de temps d'inflammation étaient identiques à celles à la distance initiale. Comme présenté en section 2.4, la fenêtre saphir ne laisse passer qu'une partie du rayonnement émis par le cône calorimètre. En conséquence, la température de consigne doit être largement réajustée de façon à obtenir un flux incident qui permette l'auto-inflammation de l'épicéa sans la présence de la fenêtre (à partir de

49,5 kW.m⁻²). Les flux étudiés sont donc de 49,5 et 60 kW.m⁻² et 10 essais ont été réalisés pour chaque flux. L'humidité des échantillons était toujours comprise entre 9 et 10 % et la masse volumique initiale des échantillons entre 400 et 550 kg.m⁻³, comme pour les essais sans fenêtre.

Les évolutions des MLRPUA montrent que la vitesse de perte en masse est similaire avec ou sans la présence de la fenêtre saphir (figure D.12 dans le livret des figures). L'impact de la fenêtre saphir sur la dégradation des échantillons est inférieur à l'incertitude des mesures. La figure 3.12 présente des clichés d'une auto-inflammation se produisant lors de la campagne d'essai avec la fenêtre saphir.

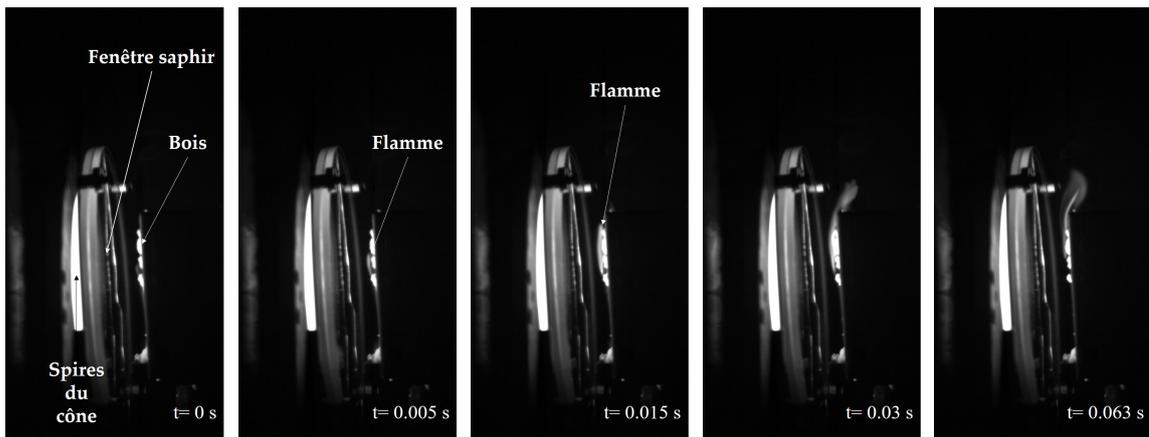


FIGURE 3.12 – Photos de l'inflammation d'un échantillon d'épicéa exposé à 60 kW.m⁻² avec la présence de la fenêtre saphir.

Les photos montrent que l'auto-inflammation de l'échantillon se produit au niveau de la surface exposée au flux de chaleur. L'intensité de la flamme est faible et l'apparition se produit à des temps longs. Tout comme pour les campagnes expérimentales précédentes, les temps d'inflammation sont relevés pour les 20 tests à 49,5 et 60 kW.m⁻² et peuvent être reliés avec la localisation de l'apparition de la flamme. Le tableau 3.3 permet d'observer les temps d'inflammation pour les deux flux imposés avec la présence de la fenêtre saphir.

TABLEAU 3.3 – Temps d'inflammation en fonction de la localisation de l'inflammation pour chaque flux imposé pour les tests équipés de la fenêtre saphir.

Localisation de l'inflammation	Flux (kW.m ⁻²)			
	49,5 kW.m ⁻²		60 kW.m ⁻²	
	Tests	$t_{in,fl}$ (s)	Tests	$t_{in,fl}$ (s)
Auto-inflammation éloignée	-	-	10 %	55
Auto-inflammation proche de la surface	60 %	> 2500	90 %	> 1200

Le tableau montre que les temps d'inflammation ainsi que les localisations sont proches des essais sans fenêtre pour 49,5 kW.m⁻². En effet, sur les 10 essais effectués pendant une heure, 6 d'entre eux s'auto-enflamment à des temps supérieurs à 2500 secondes. Cependant, pour 60 kW.m⁻², les tendances s'inversent par rapport aux essais sans fenêtre saphir :

les temps d'inflammation sont beaucoup plus longs (supérieurs à 20 minutes) et la localisation est désormais majoritairement proche de la surface exposée. L'inflammation dans les gaz de pyrolyse ne s'est produite qu'une seule fois sur les 10 essais effectués, avec un temps d'inflammation de 55 secondes. Une explication plausible est la modification par la fenêtre saphir de la répartition spectrale de l'émission en provenance cône. En effet, la fenêtre saphir est transparente dans la gamme 0,2 - 5,5 μm et coupe le rayonnement en dehors. Compte tenu des propriétés d'absorption des gaz de pyrolyse dans cette gamme spectrale, l'échauffement de ces derniers pourrait être modifié en présence de la fenêtre saphir.

3.5 Effet de l'humidité des échantillons

Comme présenté dans la section 2.1.2, le pourcentage d'humidité dans le bois a été modifié afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur le temps d'auto-inflammation ainsi que sur la dégradation de l'épicéa en orientation verticale. Dans cette section, les temps d'apparition de la flamme ainsi que la température de surface à l'inflammation sont déterminés pour quatre humidités (15, 20, 25 et 30 %) et sont comparés avec ceux obtenus pour une humidité de 9 %. Pour des flux de 49,5 à 93,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 45 essais ont été effectués avec des humidités variant de 15 à 30 % (matrice d'essai présentée en tableau D.2 du livret). La figure 3.13 présente le temps d'apparition de la flamme pour les différentes humidités et les différents flux engendrant l'inflammation.

En ce qui concerne les essais à 49,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, l'auto-inflammation des échantillons n'était pas systématique pour une humidité de 9 % (4 essais sur 10), et cela semble s'aggraver avec l'augmentation de l'humidité. En effet, sur les 5 tests réalisés à ce flux à des humidités supérieures à 9 %, l'auto-inflammation du bois ne s'est produite que pour un seul d'entre eux, à 3500 secondes. Pour un flux de 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, le temps d'auto-inflammation semble augmenter avec l'humidité. En effet, pour l'humidité de 30 %, sur quatre essais réalisés à 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, trois d'entre eux s'enflamment entre 110 et 2310 secondes. Enfin, pour les deux flux les plus élevés, l'humidité impacte le temps d'inflammation de l'épicéa. Les temps d'auto-inflammation des 200 essais réalisés à une humidité de 9 %, sont compris entre 9 et 15 secondes pour un flux de 82,5 et 93,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Ces temps augmentent de manière générale et sont plus aléatoires, pouvant aller jusqu'à 400 secondes pour une humidité de 30 %. En revanche pour une humidité de 15 %, les échantillons d'épicéa s'enflamment à temps comparables à ceux obtenus avec les humidités à 9 %, entre 9 et 12 secondes.

Même si la quantité d'essais devrait être augmentée pour permettre une approche statistique plus fine de l'influence de l'humidité sur les temps d'inflammation, il apparaît tout de même que l'augmentation de l'humidité dans le bois accentue la dispersion du temps d'inflammation. La figure 3.14 présente les températures de surface à l'inflammation en fonction du temps d'inflammation pour différents taux d'humidité.

L'augmentation de l'humidité des échantillons accentue la dispersion des temps d'inflammation et par conséquent des températures de surface à l'inflammation en particulier

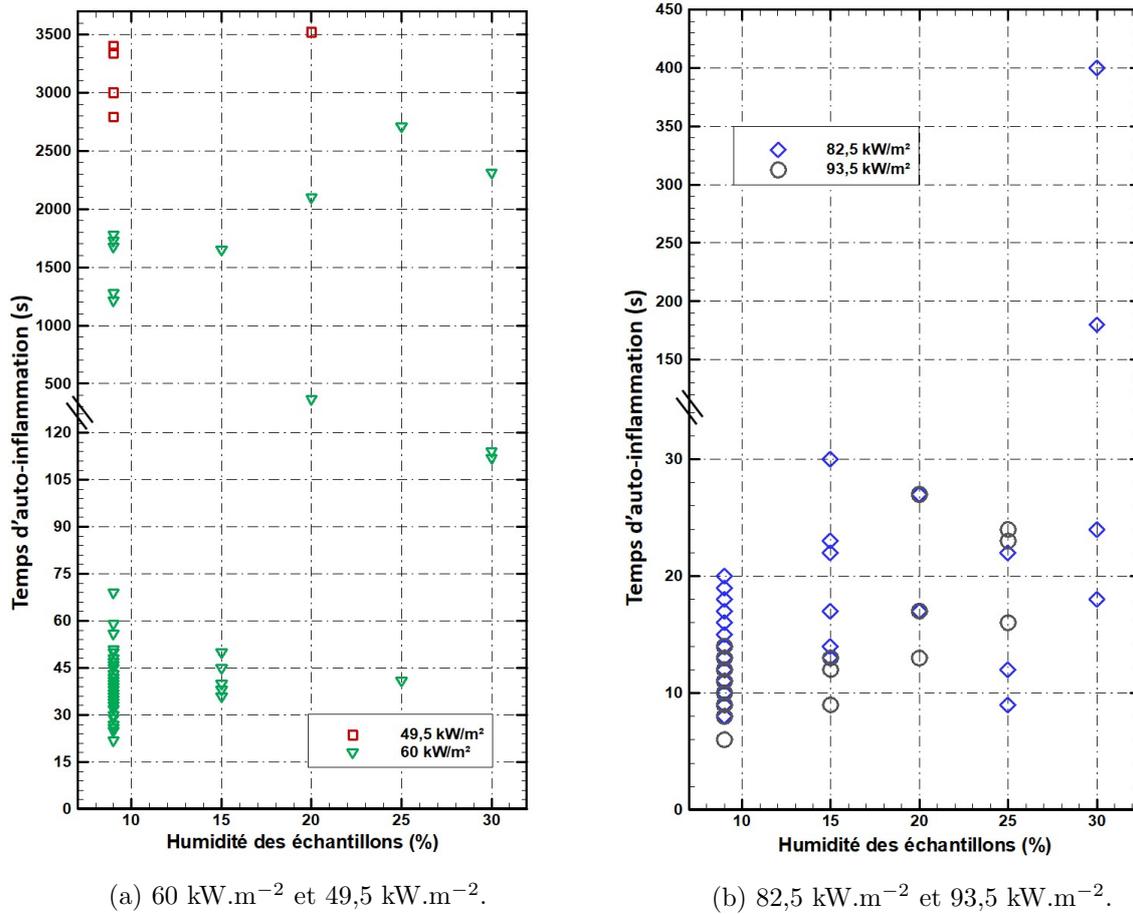


FIGURE 3.13 – Temps d'auto-inflammation en fonction de l'humidité des échantillons.

pour des hauts flux. La tendance générale des figures 3.14a et 3.14b montrent une élévation de la température d'inflammation de l'épicéa lorsque le temps d'auto-inflammation augmente, suivie d'une partie plus constante, variant de 700 à 855 °C à partir de 110 secondes d'exposition en fonction du flux appliqué. Cependant, les points représentant la variation de l'humidité des échantillons restent dans les gammes des températures de surface à l'inflammation déterminées pour les nombreux essais à une humidité de 9 %. Par exemple, pour un flux imposé de 82,5 kW.m⁻², la température de surface à l'inflammation est comprise entre 474 et 630 °C pour une humidité de 9 % et entre 551 et 619 °C pour une humidité de 15 %. Le tableau 3.4 présente les gammes des température de surface à l'inflammation en fonction du flux et de l'humidité des échantillons.

De manière générale, l'humidité dans les échantillons conduit à une augmentation du temps d'auto-inflammation et par conséquent de la température minimale d'auto-inflammation. Toutefois, les gammes de température de surface à l'inflammation restent, dans l'ensemble, dans le même intervalle quelle que soit l'humidité de l'échantillon. La dispersion des temps d'auto-inflammation ne permet pas de déduire une tendance claire de l'effet de l'humidité sur les températures de surface à l'inflammation des échantillons.

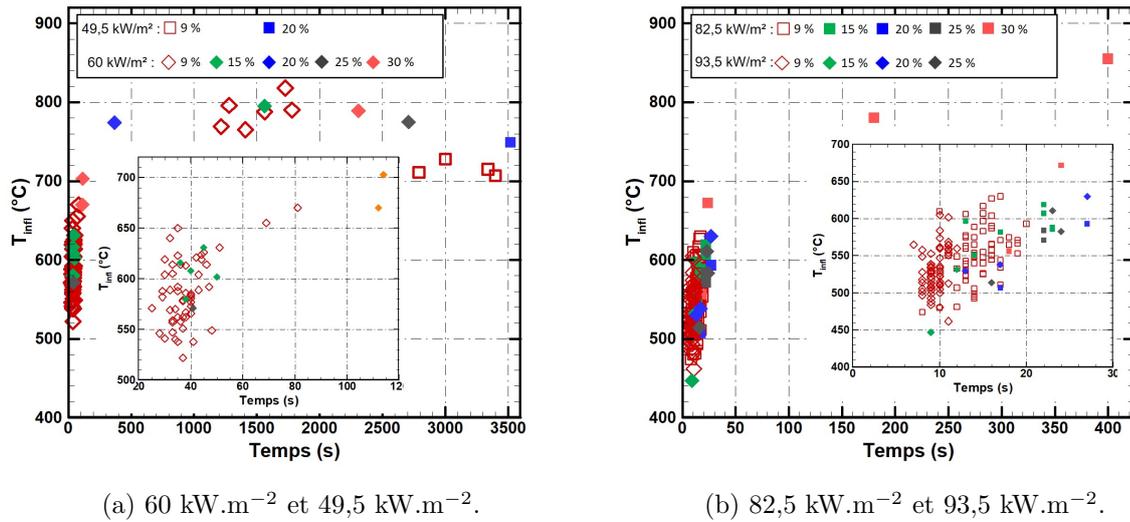

 FIGURE 3.14 – Température de surface en fonction du t_{infl} et de l'humidité des échantillons.

TABLEAU 3.4 – Gamme des températures d'inflammation en fonction du temps d'inflammation et de l'humidité des échantillons.

Flux \ Humidité	49,5 kW.m ⁻²	60 kW.m ⁻²	82,5 kW.m ⁻²	93,5 kW.m ⁻²
9 %	707 - 728 °C	522 - 818 °C	474 - 630 °C	462 - 605 °C
15 %	-	580 - 795 °C	551 - 619 °C	447 - 532 °C
20 %	749 °C	774 °C	507 - 593 °C	530 - 630 °C
25 %	-	571 - 775 °C	571 - 584 °C	514 - 611 °C
30 %	-	670 - 789 °C	556 - 855 °C	-

3.6 Effet de l'essence de bois sur les données d'auto-inflammation

Une campagne expérimentale a été réalisée sur 55 échantillons de hêtre avec une teneur en eau comprise entre 9 et 10 %. Les échantillons étaient exposés à des flux de 60 et 82,5 kW.m⁻² et les temps d'auto-inflammation ont été mesurés pour chaque essai tout comme la température de surface avec la caméra infrarouge. La localisation de l'auto-inflammation a été capturée pour certains tests avec la caméra rapide visible couplée à la caméra rapide infrarouge TELOPS.

3.6.1 Les temps d'auto-inflammation du hêtre

Les essais sur des échantillons de hêtre ont été moins nombreux (9 tests à 60 kW.m⁻² et 46 pour 82,5 kW.m⁻²) que pour l'épicéa (103 pour 60 kW.m⁻² et 97 pour 82,5 kW.m⁻²). Il est donc plus difficile de réaliser une étude statistique pour cette campagne expérimentale en particulier pour le flux de 60 kW.m⁻². Le tableau 3.5 compare les données des 261 temps d'inflammation pour l'épicéa et le hêtre en fonction du flux de chaleur appliqué.

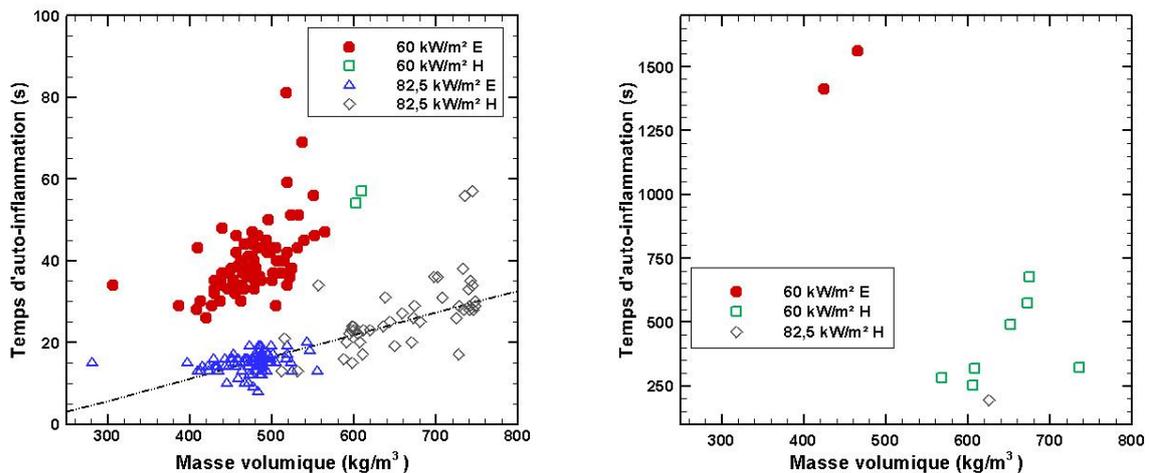
Les données font état d'un temps d'inflammation plus important pour les échantillons

TABLEAU 3.5 – Temps d'inflammation en fonction de l'essence de bois étudiée.

Essence de bois	Flux (kW.m^{-2})			
	60 kW.m^{-2}		$82,5 \text{ kW.m}^{-2}$	
	Tests	t_{infl} (s)	Tests	t_{infl} (s)
Épicéa	109	22-1780	97	8-20
Hêtre	9	54-675	45 (1)	13-59 (192)

de hêtre. Pour un flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, 85 % des échantillons d'épicéa s'auto-enflamment à des temps compris entre 13 et 20 secondes, soit sur un intervalle de 7 secondes. À ce même flux imposé, seulement 24 % des échantillons de hêtre s'auto-enflamment dans cet intervalle. En effet, sur les 46 essais réalisés à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, les temps d'auto-inflammation sont plus dispersés et 45 d'entre eux se situent à des temps d'inflammation compris entre 13 et 59 secondes. Il n'y a qu'un échantillon de hêtre qui s'auto-enflamme à un temps long (192 secondes). En ce qui concerne le flux à 60 kW.m^{-2} , les temps d'auto-inflammation sont très dispersés comme expliqué en section 3.2, même si 92 % des essais (94 tests sur 109) s'enflamment à des temps inférieurs à une minute. Pour le hêtre, seulement deux échantillons s'auto-enflamment à un temps inférieur à une minutes, les 7 autres étant compris entre 251 et 675 secondes. À noter qu'un échantillon de hêtre ne s'est pas enflammé après 30 minutes d'exposition à 60 kW.m^{-2} .

Cette comparaison met en évidence l'effet de l'essence de bois sur le temps d'auto-inflammation. Le hêtre ayant une masse volumique plus élevée que l'épicéa, une comparaison des temps d'inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons est présentée en figure 3.15 (60 kW.m^{-2} : 87 tests pour l'épicéa et 9 pour le hêtre, $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$: 86 tests pour l'épicéa et 46 pour le hêtre).



(a) Temps d'auto-inflammation compris entre 0 et 100 secondes. (b) Temps d'auto-inflammation compris entre 230 et 1700 secondes.

FIGURE 3.15 – Temps d'auto-inflammation en fonction de la masse volumique des échantillons de hêtre (H) et d'épicéa (E) pour des flux imposés de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

Ces deux figures montrent plus explicitement l'influence de la masse volumique sur

les temps d'auto-inflammation puisque, de manière générale, l'augmentation de la masse volumique accentue le temps d'inflammation. La figure 3.15a montre bien que pour un flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, le temps d'auto-inflammation est compris entre 10 et 20 secondes pour des échantillons dont la masse volumique initiale est comprise entre 400 et 550 kg.m^{-3} . Lorsque la masse volumique est comprise entre 600 et 750 kg.m^{-3} , la majeure partie des temps d'inflammation sont compris entre 20 et 40 secondes pour un flux imposé de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Pour ce même flux, l'augmentation du temps d'inflammation en fonction de la masse volumique est quasi linéaire et semble indépendante de l'essence de bois. La comparaison à 60 kW.m^{-2} est plus délicate puisque les essais réalisés avec le hêtre sont peu nombreux. Le peu de données indique tout de même un effet de la masse volumique sur le temps d'inflammation. Tout comme pour les essais réalisés avec l'épicéa, les disparités des temps d'auto-inflammation d'échantillon de hêtre à masse volumique équivalente peuvent être importantes. Par exemple, les temps d'inflammation peuvent varier de 52 à 300 secondes lorsque la masse volumique du hêtre est fixée à 600 kg.m^{-3} , pour une exposition à 60 kW.m^{-2} .

3.6.2 Localisation de l'apparition de la flamme

La localisation de l'auto-inflammation a été étudiée dans le visible et l'infrarouge à l'aide de la caméra rapide visible et d'une caméra rapide infrarouge. La caméra IR rapide a été utilisée avec deux filtres différents : un filtre à une longueur d'onde de forte émission de CO_2 ($4,45 \text{ }\mu\text{m}$) et un filtre à une longueur d'onde en dehors des émissions gazeuses ($3,9 \text{ }\mu\text{m}$). Malheureusement, pour obtenir une vitesse d'acquisition rapide (4000 images par seconde), la caméra infrarouge ne peut enregistrer simultanément la localisation de l'inflammation avec les deux filtres (le mode multispectral n'est pas activé). Les essais doivent donc être doublés afin d'observer la localisation de l'auto-inflammation à des longueurs d'onde différentes.

La section 3.2.3 a mis en évidence trois types d'inflammation lorsque les échantillons d'épicéa étaient exposés verticalement au cône calorimètre : une inflammation pilotée par les spires du cône à des temps d'inflammation très faibles, une auto-inflammation se situant dans les gaz de pyrolyse éloignés de la surface exposée à des temps d'auto-inflammation inférieurs à 100 secondes et enfin une auto-inflammation au niveau de la surface exposée à des temps d'inflammation longs. La figure 3.16 présente des images visibles et infrarouges (filtre CO_2) d'une inflammation du hêtre pilotée par les spires chaudes du cône avec un flux imposé de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

Lorsque l'inflammation est pilotée par les spires chaudes du cône, les images infrarouges n'apportent pas d'explication supplémentaire sur les raisons d'une telle inflammation. Cependant, ces images confirment bien les observations décrites en section 3.2.3 avec la caméra rapide visible pour les essais sur l'épicéa. La flamme "sort" du cône et une forte émission de CO_2 chaud (produit par la combustion gazeuse) est observée. Ces résultats laissent penser que l'énergie nécessaire à l'inflammation des gaz de pyrolyse est apportée lors de l'impact avec les spires chaudes du cône.

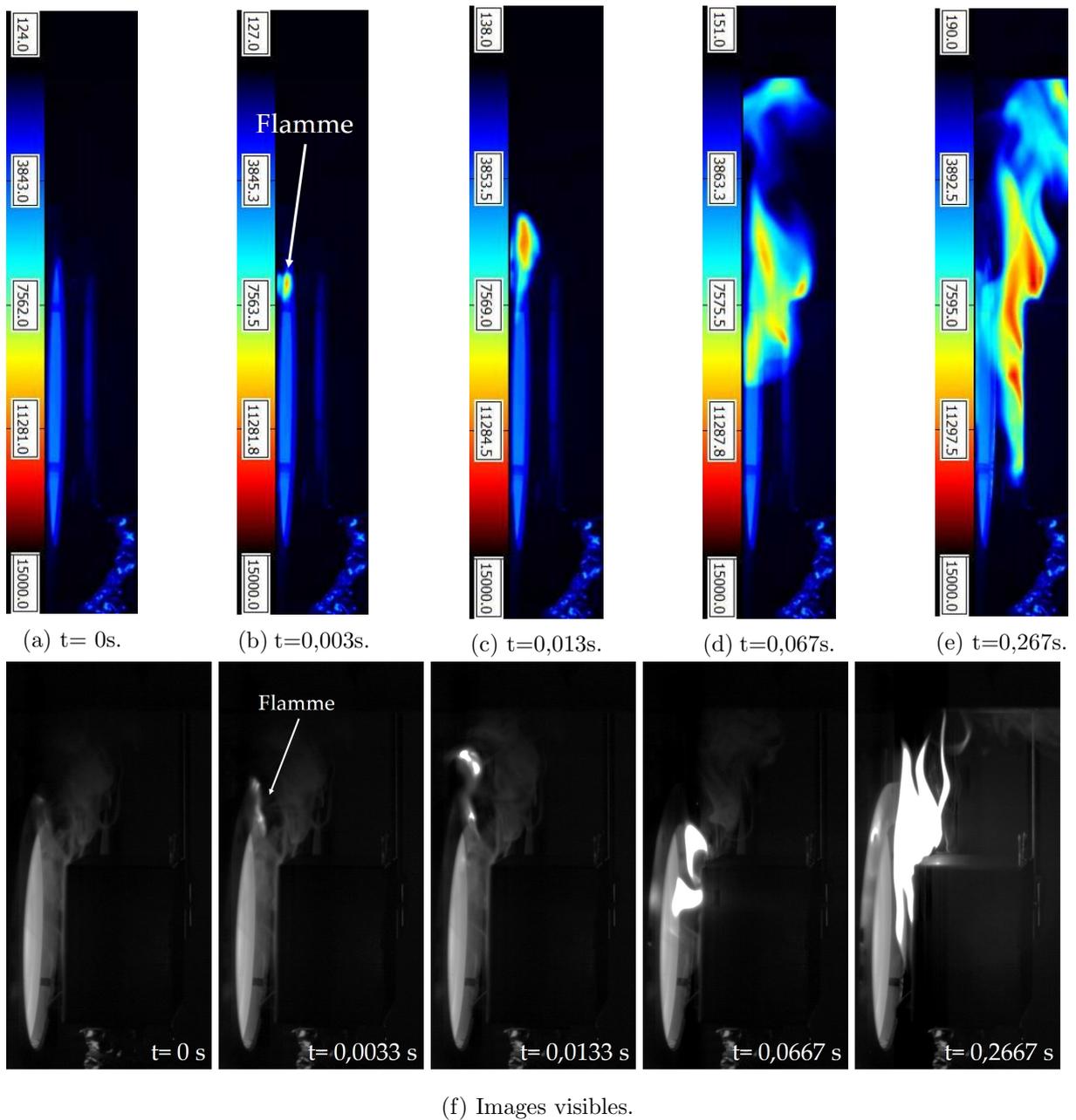


FIGURE 3.16 – Images visibles et infrarouges avec un filtre CO_2 de l'inflammation par les spires du cône d'un échantillon de hêtre exposé à $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Les autres types d'auto-inflammation ont également été observés simultanément avec les deux caméras. La figure 3.17 montre des images visibles et infrarouges avec un filtre CO_2 d'un test où la localisation de l'auto-inflammation se situe dans les gaz de pyrolyse à distance de la surface exposée. Les niveaux de gris et de DL sont volontairement modifiés pendant l'auto-inflammation afin de visualiser correctement le phénomène et éviter la saturation au niveau des images lorsque la flamme apparaît. L'échelle des DL au moment de l'apparition de la flamme est multipliée par plus de 5 entre l'image 3.17c et l'image 3.17d.

Les observations sont comparables dans l'infrarouge à la longueur d'onde de $3,9 \mu\text{m}$ (les images sont disponibles en figure D.13 dans le livret). Les images visibles montrent que

les fumées (mélange de gaz de pyrolyse et de particules) dégagées par l'échantillon sont importantes et non détectables sur les images infrarouges (ces gaz pourraient être observés si la gamme de DL était réduite, mais ce n'est pas l'objectif ici). À $t = 0,041$ s pour la figure 3.17 (ou $t = 0,01$ s pour la figure D.13 du livret des figures), des gaz chauds (détectés avec les filtres CO_2 et suies) sont libérés de la surface exposée. Cette grande quantité de gaz chauds détectés avec le filtre suies et CO_2 s'éloigne ensuite de l'échantillon jusqu'à s'auto-enflammer à plusieurs centimètres au-dessus de celui-ci. Les gaz alentours s'enflamment à leur tour et la flamme se dirige vers la surface exposée au cône, où les gaz de pyrolyse sont libérés en grande quantité.

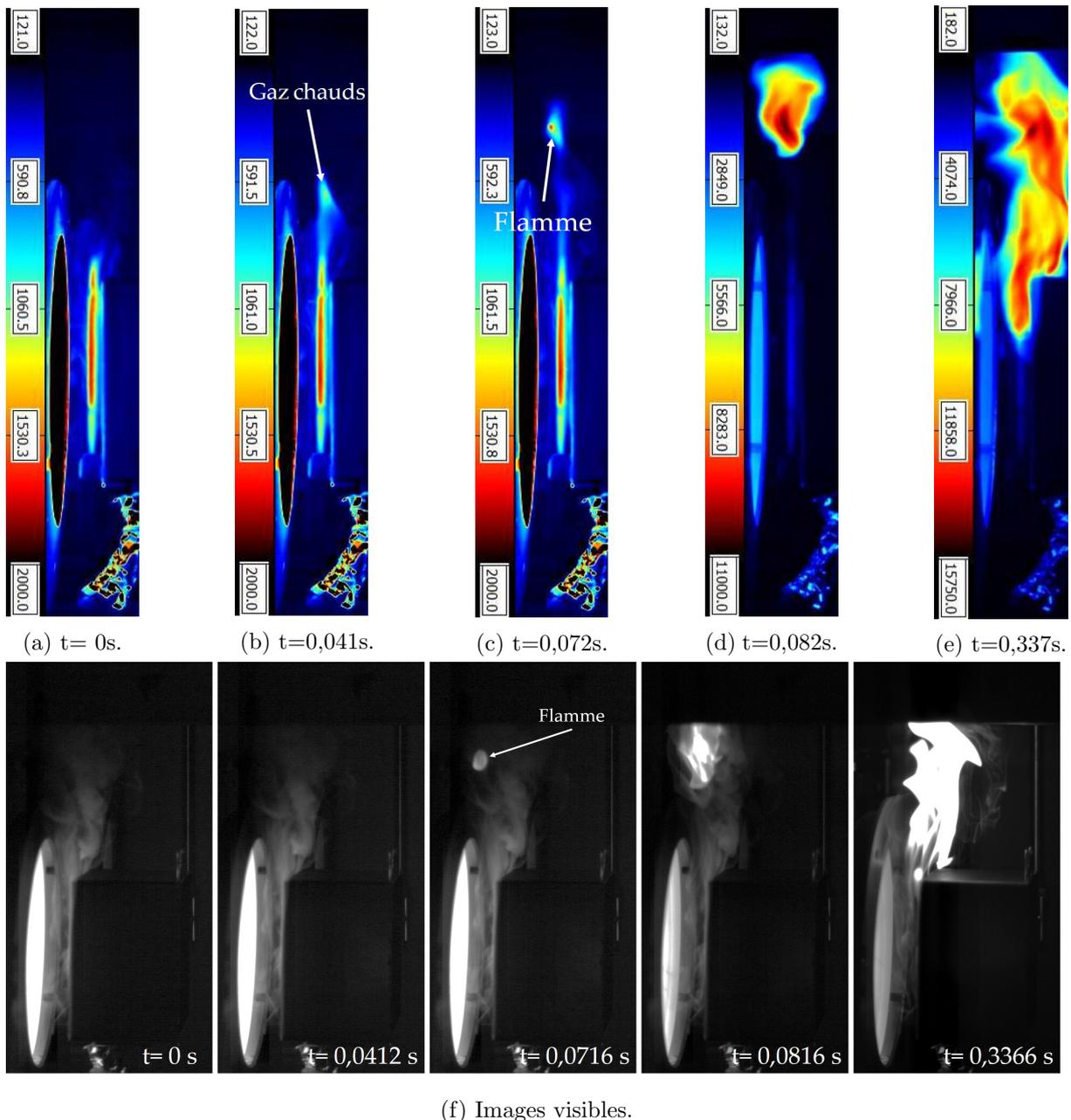


FIGURE 3.17 – Images visibles et infrarouges avec le filtre CO_2 d'une auto-inflammation dans gaz de pyrolyse d'un échantillon de hêtre exposé à $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Ces images infrarouges mettent en évidence que l'auto-inflammation semble favorisée par la présence d'une quantité suffisante de gaz chauds (discernable à la longueur d'onde des suies ou du CO_2) libérée par l'échantillon. L'auto-inflammation éloignée peut être expliquée par le manque d'oxygène entre la surface et le cône comme les images visibles peuvent le montrer (grande quantité de gaz de pyrolyse présente et donc moins d'air entraîné). Il est donc nécessaire pour ces gaz chauds de se mélanger à l'air et donc l'oxygène se situant plus haut (là où il y a moins de gaz de pyrolyse) pour que l'auto-inflammation puisse se produire. Ces interprétations basées sur une analyse d'images sont surtout qualitatives.

Enfin, le dernier type d'auto-inflammation, présenté en figure D.14 du livret des figures, montre une auto-inflammation localisée proche de la surface exposée au cône calorimètre. L'auto-inflammation s'est produite à $t_{infl} = 251$ secondes pour un flux imposé de 60 kW.m^{-2} . À ce temps d'exposition, la quantité de gaz inflammable libérée est beaucoup plus faible qu'en début d'expérience et se situe principalement au niveau des fissures. L'air présent entre le cône et l'échantillon est par conséquent plus important qu'en début d'expérience. Les images mettent en évidence une quantité importante de gaz chauds détectable avec le filtre CO_2 sortant de la surface quelques millisecondes avant de s'auto-enflammer entre la surface de l'échantillon et le cône. Ce CO_2 chaud n'est pas détectable sur les images visibles.

3.6.3 Les températures de surface à l'inflammation du hêtre

Comme pour l'épicéa, la caméra infrarouge était disposée derrière les spires du cône de façon à mesurer la température de surface tout au long du test. Les temps d'auto-inflammation sont relevés pour chaque test de façon à déduire la température de surface à l'inflammation. La figure 3.18 compare les températures de surface au moment de l'inflammation en fonction des essences de bois exposées à 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Les résultats (59 tests pour l'épicéa et 8 tests pour le hêtre) en figure 3.18a sont relatifs aux tests réalisés à 60 kW.m^{-2} et ceux de la figure 3.18b (62 tests pour l'épicéa et 45 tests pour le hêtre) correspondent aux tests réalisés à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

Pour 60 kW.m^{-2} , l'augmentation de la température de surface à l'inflammation est dans la majeure partie des cas liée à l'augmentation du temps d'apparition de la flamme. Pour les deux échantillons de hêtre s'auto-enflammant à un temps inférieur à une minute, les deux températures de surface à l'inflammation se situent dans la gamme des températures de surface à l'inflammation de l'épicéa, entre 560 et $615 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour des temps d'auto-inflammation compris entre 5 et 10 minutes, la température de surface à l'auto-inflammation est comprise entre 730 et $770 \text{ }^\circ\text{C}$. Cependant, pour un flux de chaleur imposé à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, l'augmentation du temps d'auto-inflammation pour les échantillons de hêtre n'a pas d'impact sur les températures de surface mis à part pour deux essais s'enflammant à 52 et 54 secondes où les températures de surface à l'inflammation sont d'environ $685 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'incertitude du temps d'auto-inflammation sur les températures de surface est également

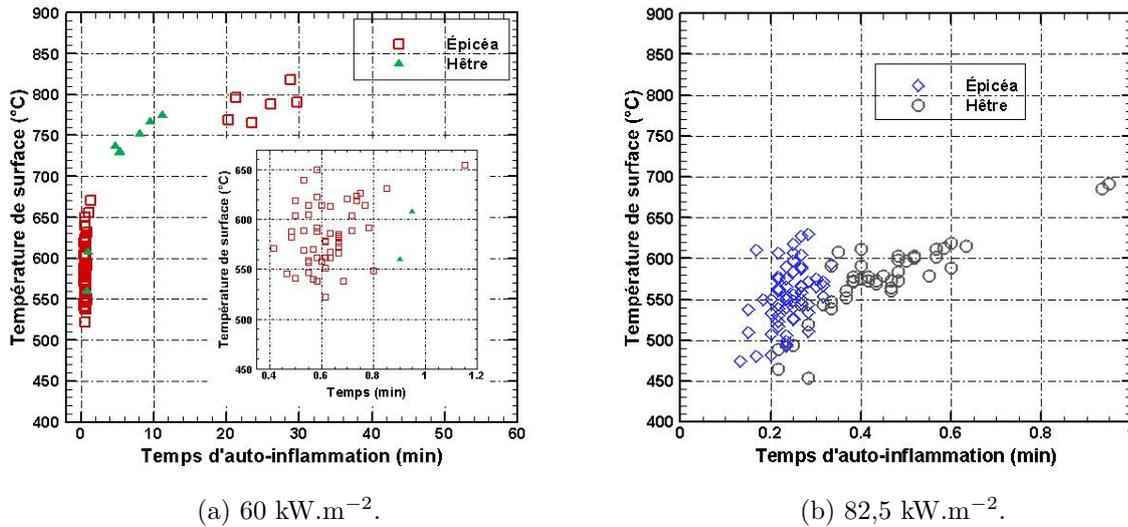


FIGURE 3.18 – Température de surface en fonction du temps d'inflammation pour les essais avec des échantillons d'épicéa et de hêtre.

analysée pour le hêtre (figure D.15 dans le livret). Les temps étant relativement longs (plus long que pour la majeure partie des essais sur l'épicéa), l'écart de température de surface entre $t_{infl} - 1$ et $t_{infl} + 1$ seconde est inférieur à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (excepté un test avec un écart de $80 \text{ }^\circ\text{C}$). Pour $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, lorsque le temps d'auto-inflammation est supérieur à 250 secondes (6 tests sur 8), l'écart de température de surface est inférieure à $15 \text{ }^\circ\text{C}$ entre $t_{infl} - 1$ et $t_{infl} + 1$ seconde.

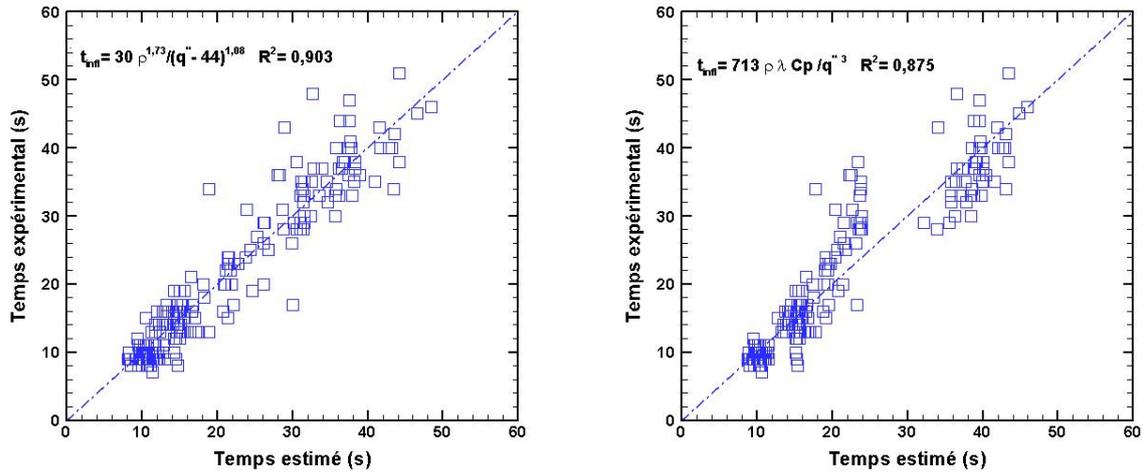
3.7 Comparaison des temps d'inflammation avec les modèles existants

Il existe de nombreux modèles permettant de déduire le temps d'inflammation piloté. Cependant, les modèles pour des auto-inflammations sont plus rares. Ces modèles sont théoriques, basés sur la thermique, et empiriques. Les paramètres à prendre en compte sont généralement : la température de surface au moment de l'inflammation T_{infl} , la température ambiante T_0 , la masse volumique ρ , la conductivité thermique λ , la chaleur spécifique C_p et le flux incident \dot{q}_{inc}'' .

Les trois modèles (équations 1.2, 1.3 et 1.4) présentés dans l'état de l'art en section 1.2.4, ont été comparés avec les données de cette étude. Seules les données à des temps inférieurs à une minute ont été considérées. Les coefficients du modèle empirique de Shi et Chew ont été estimés par minimisation et le flux critique d'auto-inflammation estimé à $44 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Cette valeur se trouve entre le flux critique d'auto-inflammation de Boonmee et Quintiere ($40 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) et celui déterminé pendant la thèse pour l'épicéa ($49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$). L'équation 1.4 présentée en section 1.2.4 devient avec le nouveau flux critique d'auto-inflammation et les nouveaux coefficients :

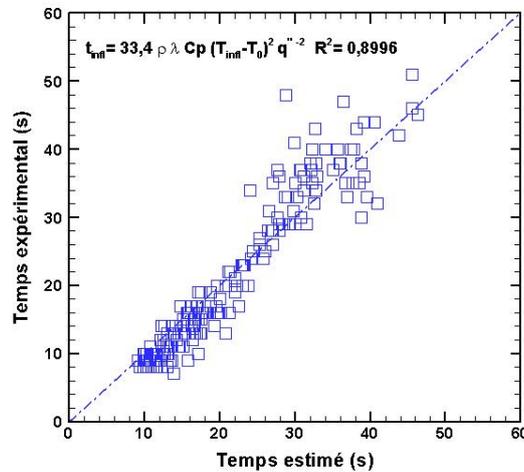
$$t_{infl} = 30 \frac{\rho^{1,73}}{(\dot{q}_{inc}'' - 44)^{1,08}} \quad (3.1)$$

La figure 3.19 compare les trois modèles présentés en fonction des 206 temps d'inflammation relevés (inférieurs à 60 secondes) pendant les essais avec les échantillons de hêtre et d'épicéa.



(a) Modèle empirique (eq. 1.4) de Shi et Shew modifié [42].

(b) Modèle empirique (eq. 1.3) de Harada [62] modifié.



(c) Modèle semi-empirique (eq. 1.2) de Quintiere [60] ou Atreya et Abu-Zaid [61] utilisé pour les inflammations pilotées.

FIGURE 3.19 – Comparaison des t_{infl} en fonction des modèles empiriques et semi-empiriques de la littérature.

Shi et Chew [42] ont également comparé ces modèles avec leurs données expérimentales qui sont au nombre de 30. Les coefficients de détermination R^2 sont équivalents à leur travaux voire même meilleurs concernant le modèle de Harada [62] puisque Shi et Chew obtiennent un R^2 de 0,7 contre 0,87 ici.

3.8 Résumé

Le présent chapitre s'est focalisé sur l'étude expérimentale de l'auto-inflammation d'échantillons de bois à l'échelle du cône calorimètre en orientation verticale. Le dispositif et la métrologie associée ont été optimisés de sorte à améliorer la fiabilité et la précision des résultats. Au total, près de 425 essais d'auto-inflammation ont été effectués en faisant varier l'humidité, l'essence de bois, le dispositif expérimental (orientation et fenêtre saphir) et le flux de chaleur. Les premiers essais effectués ont permis de situer le flux critique d'auto-inflammation de l'épicéa entre 38,5 et 49,5 kW.m⁻². Ce résultat est en bon accord avec les études existantes.

Une approche statistique, impliquant une quantité importante d'essais, a été privilégiée afin de caractériser les différents critères régissant le phénomène d'auto-inflammation. Tout d'abord, les temps d'auto-inflammation ont été analysés. Il apparaît que ces derniers diminuent lorsque le flux de chaleur appliqué augmente mais reste dispersé. En effet pour un flux de 60 kW.m⁻², le temps peut varier de 22 secondes à 30 minutes pour des mêmes conditions expérimentales.

Un intérêt s'est également porté sur la localisation du départ de flamme. Trois types d'inflammation ont été mis en évidence à l'aide d'une caméra rapide : une auto-inflammation se produisant proche de la surface exposée à des temps longs, une auto-inflammation dans les gaz éloignés de la surface exposée à des temps inférieurs à 100 secondes et une inflammation pilotées par les spires chaudes du cône pouvant légèrement diminuer le temps d'inflammation par rapport au deuxième type présenté. Les images de la caméra rapide ont également montré que l'inflammation était un phénomène ultra rapide, inférieur à 0,1 seconde entre le moment où la flamme apparaît et le moment où la flamme s'est propagée sur tous les gaz environnants. Une caméra rapide infrarouge avec différents filtres à des longueurs d'onde spécifiques a également été employée. Les vidéos ont montré que l'auto-inflammation à distance de l'échantillon (représentant la majeure des essais) se produisait suite à la libération au niveau de la surface d'une "bouffée" plus émissive de gaz de pyrolyse (plus chaude ou plus concentrée). Cette émanation de gaz monte, se dilue et dès que les conditions de mélange (gaz/air) et de température sont réunies, l'auto-inflammation a lieu.

L'étude s'est également focalisée sur la température de surface à l'inflammation. Cette donnée, considérée comme cruciale en ingénierie de la sécurité incendie, peut varier de 462 à 818 °C en fonction du flux appliqué et pour une humidité fixée. La dispersion des données est donc très importante et dépend surtout du temps d'inflammation. Les données ont montré qu'une erreur d'une seconde sur le temps d'inflammation peut engendrer une différence de 50 °C sur la température de surface à l'inflammation pour un même essai. La notion de température d'auto-inflammation du bois peut être discutée. En effet, les tests réalisés révèlent que l'auto-inflammation se situe majoritairement dans les gaz de pyrolyse, à distance de la surface exposée au cône. Les conditions nécessaires pour enflammer ces gaz ne dépendent donc plus de la température de surface mais des conditions de mélange air/gaz ainsi que de la température de la source (ici le cône) qui peut elle même

être à l'origine de l'apparition de la flamme. La température de surface à l'inflammation ne semble donc pertinente uniquement lorsque l'apparition de la flamme émane de la surface, soit à des temps longs d'exposition. Les valeurs de température de surface sont dans ce cas bien supérieures à celles généralement annoncées.

Les conditions expérimentales peuvent également influencer l'inflammation. En orientation horizontale par exemple, les données de flux critique et de temps d'auto-inflammation sont diminués. L'utilisation d'une fenêtre saphir, pour éviter que l'inflammation ne soit provoquée par les spires du cône, a modifié le type d'inflammation pour un flux donné. En effet, à 60 kW.m^{-2} , l'inflammation ne se produit plus qu'au niveau de la surface avec la fenêtre saphir alors qu'elle avait lieu essentiellement dans les gaz à distance de l'échantillon.

L'influence de l'humidité, de la masse volumique et même de l'essence de bois ont également été étudiées. Il apparaît que l'augmentation de l'humidité accentue la dispersion des résultats, déjà très importante pour une humidité fixée. Les temps d'auto-inflammation et la température d'inflammation augmentent également avec la croissance de l'humidité dans le bois. Enfin, ces paramètres se trouvent également accentués lorsque l'on passe de l'épicéa à du hêtre en particulier à cause de la variation de la masse volumique des échantillons.

Chapitre 4

Étude de la dégradation du bois

Sommaire

4.1	Dégradation sans inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface	90
4.2	Dégradation avec inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface	93
4.2.1	Influence du flux appliqué	93
4.2.2	Influence de l'apparition de la flamme	94
4.3	Température dans le matériau et front de carbonisation . . .	95
4.3.1	Mesure de la température par thermocouples	95
4.3.2	Influence de la technique d'implantation du thermocouple sur les mesures de température en profondeur.	99
4.3.3	Épaisseur de la couche de charbon et vitesse de carbonisation .	102
4.4	Influence des conditions expérimentales	105
4.4.1	Effet de l'air sur la combustion	105
4.4.2	Effet de l'humidité sur la dégradation des échantillons	109
4.4.3	Effet de l'essence de bois sur la dégradation des échantillons . .	114
4.5	Résumé	116

La dégradation des échantillons de bois en terme de température de surface, de température interne, de perte en masse et de position du front de charbon a été étudiée au cône calorimètre en position verticale. Diverses conditions expérimentales ont été explorées en faisant varier le flux imposé, le temps d'exposition, l'humidité des échantillons, la teneur en oxygène, ainsi que l'essence de bois. Ce chapitre est scindé en quatre sections : les expériences sans inflammation, les expériences avec inflammation, la mesure de température en profondeur et l'influence des conditions expérimentales.

4.1 Dégradation sans inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface

À faible flux, il a été observé que le bois pouvait se dégrader fortement sans forcément s'enflammer. Cela se produit notamment lorsque la combustion du charbon s'active. Pour un flux suffisamment faible, il est possible d'observer distinctement cette activation de la combustion du charbon sur l'évolution de la perte en masse ou de la température de surface et en profondeur. Boonmee [122] a montré, que cette transition se produisait à des temps raisonnables pour un flux de 15 kW.m^{-2} . Les résultats de Pope *et al.* [124] indiquent que l'activation de la combustion solide peut être très rapide pour des flux supérieurs à 30 kW.m^{-2} et peut ne jamais survenir pour des flux de 5 et 10 kW.m^{-2} même après une heure d'exposition. Dans cette étude, des échantillons d'épicéa ont été exposés pendant une heure à trois flux ($16,5$, 22 et $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$). L'humidité des échantillons est comprise entre 9 et 10 %. La perte en masse ainsi que la température de surface ont été mesurées pour chaque essai. La figure 4.1 montre des images infrarouges à $3,9 \mu\text{m}$ prises à différents moments au cours de tests effectués à $16,5$ et $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

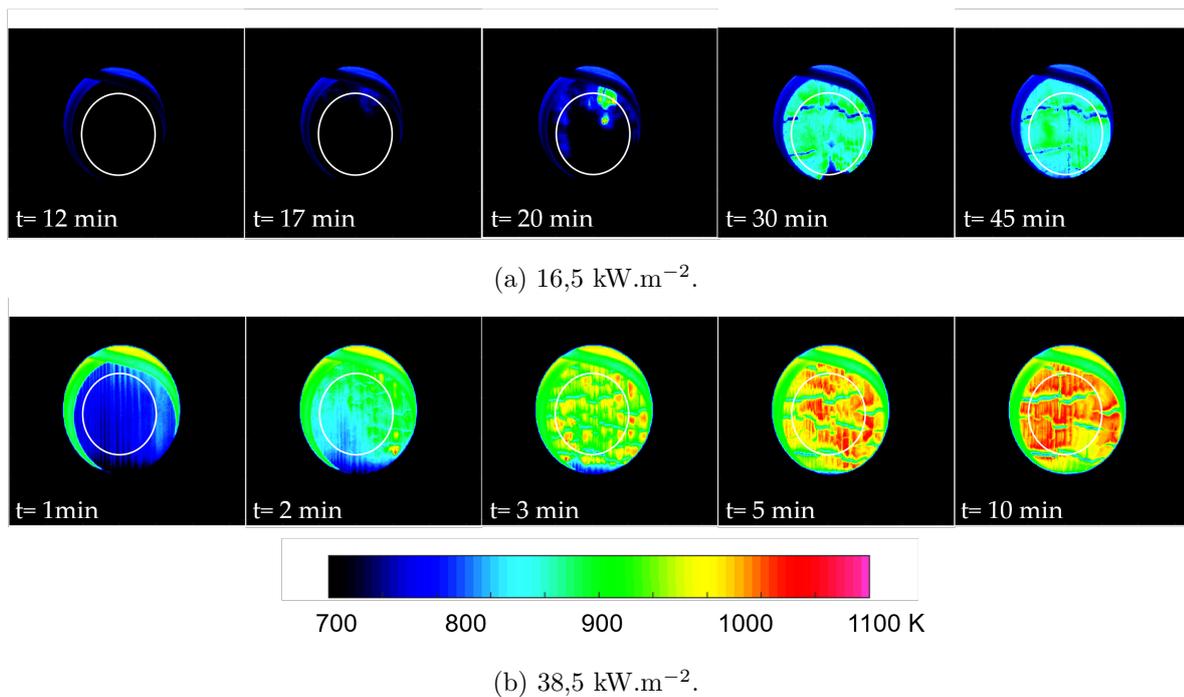


FIGURE 4.1 – Champ de température de surface en Kelvin et zone étudiée (cercle blanc) à différents temps d'exposition pour des flux de $16,5$ et $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

Ces images permettent de bien mettre en évidence l'activation plus ou moins rapide de la combustion solide selon le flux appliqué. Le début de la combustion du charbon est identifiable sur la figure 4.1a à partir de 20 minutes. Cela se traduit par des zones incandescentes qui se répartissent ensuite sur toute la surface exposée au flux. Pour l'essai à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ (figure 4.1b), la température de surface augmente rapidement jusqu'à 1000 K et la combustion solide apparaît après deux minutes d'essai seulement. Les images infrarouges sont utilisées pour calculer une température de surface moyenne sur la zone délimitée par

le cercle blanc représenté sur les images de la figure 4.1. L'utilisation de la thermographie infrarouge pour déterminer la température de surface présente un certain nombre d'avantages comparée à une mesure par thermocouple comme discuté section 1.3.3. À titre d'illustration, une comparaison des résultats obtenus par thermographie infrarouge et par thermocouple est présentée annexe B. À noter qu'au delà de quelques minutes, la totalité de la surface de l'échantillon s'est carbonisée et qu'à partir de ce moment une émissivité constante égale à 0,9 devient une très bonne hypothèse et que l'incertitude liée à ce paramètre devient faible.

La figure 4.2 présente les MLRPUA ainsi que les températures de surface pour des flux de 16,5, 22 et 38,5 kW.m⁻². Les résultats obtenus à 49,5 kW.m⁻² (flux pour lequel l'inflammation n'est pas systématique) sont également rapportés dans cette partie. Les courbes sont moyennées sur trois tests pour tous les flux et les barres d'erreur correspondent aux écart-types obtenus sur ces trois tests.

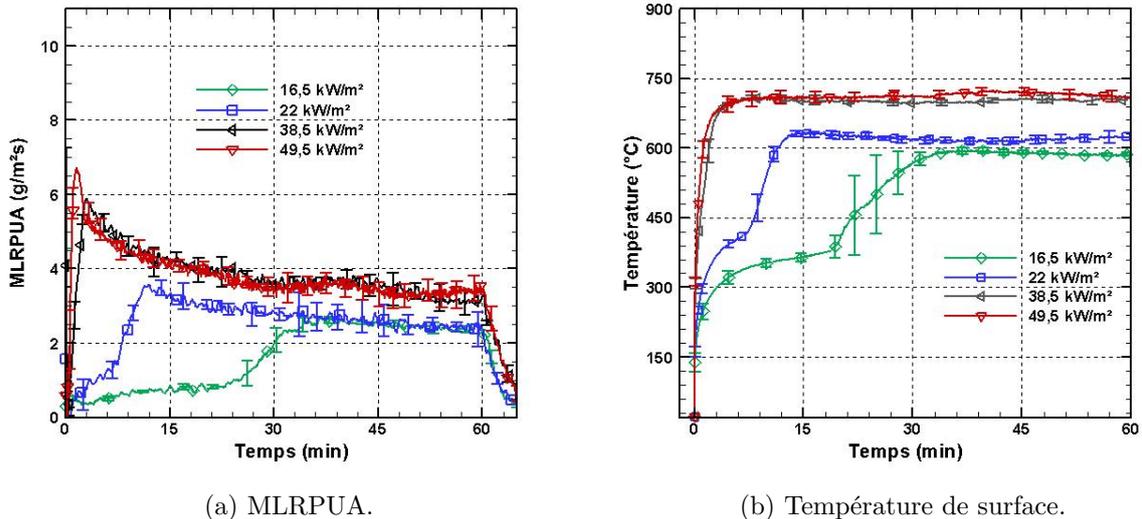


FIGURE 4.2 – MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés à 4 flux différents pendant une heure.

Pour les essais à 38,5 et 49,5 kW.m⁻², les évolutions des MLRPUA et de la température de surface sont très semblables, avec des valeurs légèrement inférieures pour 38,5 kW.m⁻². Concernant le MLRPUA, un pic est présent en début d'expérience suivi d'un plateau, à partir de 15 minutes, qui décroît légèrement tout au long de l'essai. Le pic en début d'expérience traduit une dégradation rapide des échantillons puisque le bois vierge est directement exposé à un flux de chaleur élevé. La formation d'une couche de charbon conduit à la diminution progressive du MLRPUA. Les températures de surface montrent une croissance rapide suivie d'un plateau autour de 720 °C et 740 °C pour respectivement 38,5 et 49,5 kW.m⁻². Les faibles écarts-types témoignent de la très bonne répétabilité des essais.

Pour les flux plus faibles, les évolutions des MLRPUA ainsi que des températures de surface sont très différentes. En effet, on observe dans un premier temps une croissance

des MLRPUA et de la température suivi d'un premier plateau, d'autant plus long que le flux est faible. Puis le MLRPUA et la température de surface augmentent à nouveau soudainement et ce d'autant plus rapidement que le flux est élevé. Ce changement de comportement est attribué à la combustion solide du charbon qui constitue une source de chaleur supplémentaire. Cette transition a déjà été rapportée dans des articles consacrés à l'étude au cône calorimètre de la température de surface d'échantillons de bois [41]. La température et le MLRPUA atteignent une seconde phase constante à des températures de 590 °C et 615 °C pour 16,5 et 22 kW.m⁻² respectivement et un MLRPUA de l'ordre de 2,5 g.m⁻²s⁻¹. Dans l'ensemble, les écarts-types témoignent de la bonne répétabilité des essais sauf pour la phase de transition entre la pyrolyse seule et la pyrolyse couplée à la combustion solide. Cette différence s'explique par un début de combustion qui peut varier temporellement d'un essai à l'autre, en particulier pour 16,5 kW.m⁻². Pour mettre en évidence cette différence, la figure 4.3 présente les évolutions de MLRPUA et de température de surface pour deux échantillons d'épicéa exposés pendant une heure à 16,5 kW.m⁻².

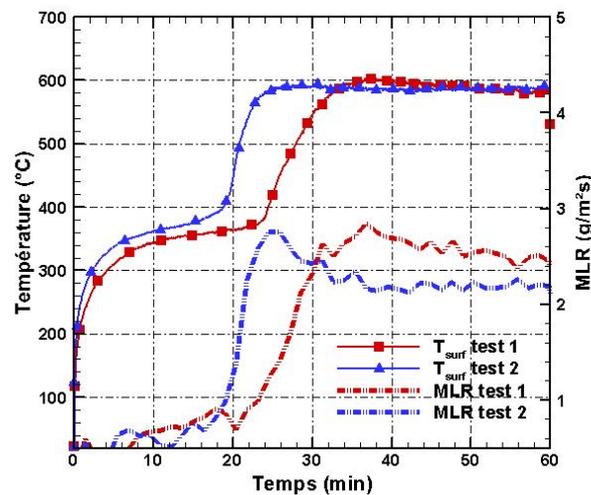


FIGURE 4.3 – MLRPUA et température de surface pour deux échantillons exposés à 16,5 kW.m⁻².

Ces courbes montrent que pour des conditions expérimentales identiques, le début de la combustion solide peut être décalé de plusieurs minutes. En effet, l'augmentation soudaine de la température de surface et de MLRPUA, traduisant le début de la combustion solide, s'opère à partir de 24 minutes pour le test 1 contre 18 minutes pour le test 2. Ce décalage est en revanche uniquement temporel, puisque les températures ainsi que les MLRPUA seuils sont à des valeurs similaires. Ce décalage peut en partie être expliqué par la disparité au niveau des propriétés des échantillons d'un essai à l'autre. Dans le cas présent par exemple, la masse volumique de l'échantillon 1 (513 kg.m⁻³) est supérieure à celle de l'échantillon 2 (455 kg.m⁻³). En conséquence, un échantillon avec une masse volumique plus faible aura tendance à s'échauffer et se dégrader plus rapidement favorisant ainsi une activation plus précoce de la combustion solide.

4.2 Dégradation avec inflammation : vitesse de perte en masse et température de surface

La section précédente a mis en évidence que l'épicéa peut fortement se dégrader au cours du temps même sans présence de flamme. L'objectif de cette section est d'étudier l'effet de l'inflammation sur la dégradation des échantillons.

4.2.1 Influence du flux appliqué

La figure 4.4 présente les évolutions de MLRPUA et de température de surface pour des flux élevés, pour lesquels l'auto-inflammation des échantillons fut systématique. Les barres d'erreur représentent les écarts-types évalués sur trois essais.

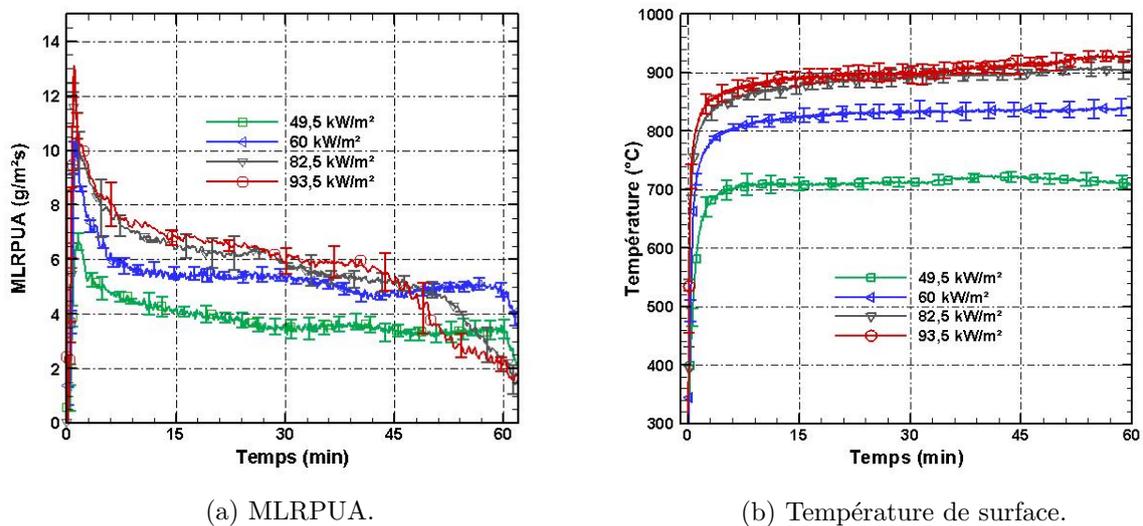


FIGURE 4.4 – MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés pendant une heure à 4 flux différents.

De manière générale, le MLRPUA augmente très rapidement jusqu'à un maximum. Puis une diminution du MLRPUA liée à l'augmentation de l'épaisseur de la couche charbon apparaît. En effet, cette couche isolante protège le bois vierge en profondeur de l'échantillon du flux incident. Le MLRPUA atteint ensuite une valeur quasi constante qui décroît légèrement tout au long de l'essai. La température de surface présente une évolution identique quel que soit le flux imposé, avec une croissance rapide de la température jusqu'à un plateau plus ou moins élevé selon le flux incident. Les écarts-types indiquent également une bonne répétabilité des essais puisque la variation de la température de surface pour un même flux est inférieure à 30 °C. Pour les tests à 82,5 et 93,5 kW.m⁻², les évolutions du MLRPUA tendent vers une valeur constante entre 6 et 7 g.m⁻²s⁻¹. Ces valeurs sont plus faibles pour 49,5 et 60 kW.m⁻² (4 et 5,5 g.m⁻²s⁻¹ respectivement), mettant en évidence l'influence du flux imposé sur la dégradation de l'épicéa. Pour les deux flux de chaleur les plus faibles (49,5 et 60 kW.m⁻²), le retrait du cône à 60 minutes induit

une diminution soudaine du MLRPUA. Pour les deux flux de chaleur les plus élevés, le MLRPUA diminue avant le retrait du cône (à un temps proche de 50 minutes) du fait de la dégradation totale des échantillons.

4.2.2 Influence de l'apparition de la flamme

Les résultats présentés dans le chapitre 3 ont montré que l'apparition de la flamme, pour des mêmes conditions fixées, peut fortement varier en particulier en terme de temps et de température de surface à l'inflammation. En effet, pour un flux de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, l'auto-inflammation peut aussi bien se produire à des temps inférieurs à une minute tout comme elle peut se produire à des temps supérieurs à 20 minutes. La température de surface à l'inflammation peut alors passer de 518 à 818 °C . L'objectif de cette section est d'observer l'impact de l'apparition de la flamme sur la dégradation des échantillons lorsque l'essai dure une heure. La figure 4.5 compare les MLRPUA ainsi que les températures de surface à $49,5$ et $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour différents types d'inflammation.

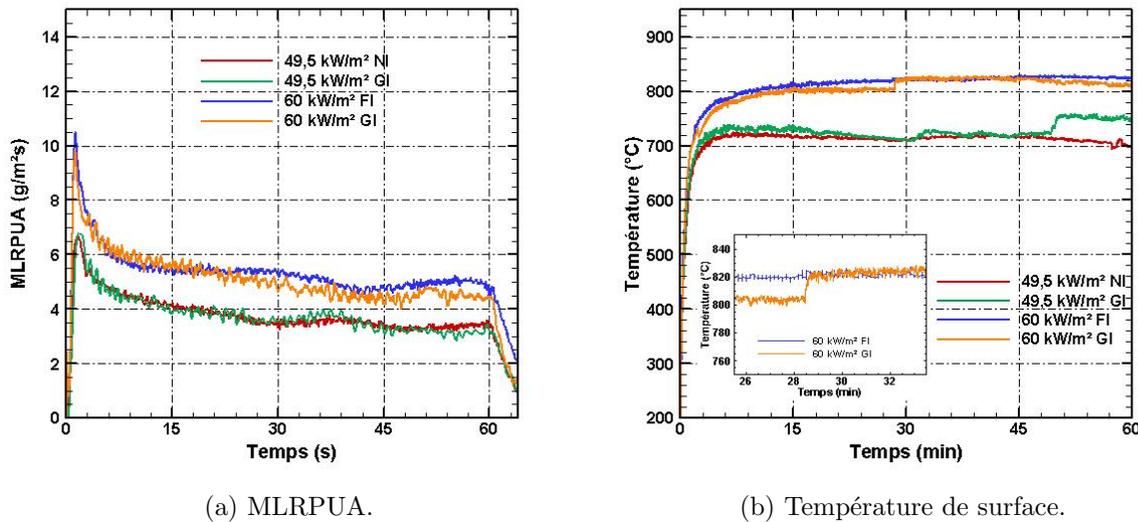


FIGURE 4.5 – MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa exposés à $49,5$ et $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant une heure. Légende : inflammation proche de la surface notée GI, pas d'inflammation notée NI et inflammation loin de la surface exposée notée FI.

Pour les essais à $49,5$ et $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, la température de surface augmente légèrement lorsque la flamme apparaît proche de la surface (GI : Glowing Ignition) à 1750 et 2950 secondes respectivement. Les températures de surface sont alors de 720 et 790 °C pour les essais respectivement à $49,5$ et $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. L'augmentation de la température de surface lorsque l'inflammation se produit à des temps longs n'est que de 25 °C . À l'échelle du cône, le flux de chaleur supplémentaire apporté par la flamme (q_f) est inférieur à $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ d'après la formule basée sur les calculs de Law [138] présentée en équation 4.1.

$$q_f = (1 - e^{0.3t_f})\sigma T_g = 0,3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2} \quad (4.1)$$

avec $T_g = 900$ °C pour la température de la flamme selon les travaux de Wasan *et al.* [139] et l'épaisseur de la flamme, $t_f = 1$ cm. La même formule donne $q_f = 1$ kW.m⁻² avec une température de flamme de 1300 °C, ce qui représente une valeur élevée de T_g .

Par ailleurs, le faible impact de l'inflammation est également mis en évidence au niveau de la perte en masse. En effet, cette dernière demeure inchangée après apparition de la flamme (quelle que soit son origine). Par conséquent, à l'échelle du cône, il apparaît qu'en orientation verticale l'épaisseur de la flamme est si faible que le flux de chaleur additionnel apportée par l'inflammation peut être négligé par rapport au flux de chaleur provenant du cône.

4.3 Température dans le matériau et front de carbonisation

4.3.1 Mesure de la température par thermocouples

La température en profondeur des échantillons a été mesurée à l'aide de thermocouples pour différents flux : de 16,5 à 93,5 kW.m⁻². Une étude comparative sur l'implantation des thermocouples dans le bois a été réalisée pour les deux essences de bois. Il s'agit plus particulièrement de comparer l'isotherme à 300 °C avec la mesure directe de la position du front de charbon afin de valider ou non la mesure par thermocouples noyés.

Thermogrammes

Dans un premier temps, des échantillons d'épicéa ont été exposés à deux flux de chaleur (16,5 et 38,5 kW.m⁻²) n'engendrant que la combustion solide sans flamme. Les figures 4.6a et 4.6b présentent les évolutions de la température dans le matériau issues des thermocouples noyés (selon la technique décrite en section 2.3.3) pour des flux de 16,5 et 38,5 kW.m⁻². La température de surface, obtenue à l'aide de la caméra infrarouge, est également reprise sur ces figures.

De manière générale, les courbes de température sont bien ordonnées en fonction de la profondeur et leur espacement est assez régulier. La température de surface est cohérente avec celles en profondeur. Il n'y a pas d'écart important entre la température de surface et la température à une profondeur de 2 mm. À mesure que le temps d'exposition augmente, certaines températures en profondeur deviennent bruitées, dépassant parfois la température de surface. En effet, lors de la combustion du charbon, la surface de l'échantillon régresse, exposant les premiers thermocouples noyés au flux provenant du cône, aux gaz de combustion et à l'air entraîné. Pour le test effectué à 16,5 kW.m⁻², l'effet de la combustion du charbon est bien perceptible au niveau de la température de surface (présenté en section 4.1) ainsi que sur les premiers millimètres de profondeur avec logiquement un léger décalage dans le temps. Pour les profondeurs supérieures à 6 mm, "l'effet" de la combustion du charbon est de moins en moins discernable au niveau des thermogrammes. On se retrouve en effet à distance de la surface en combustion, voire même du front de

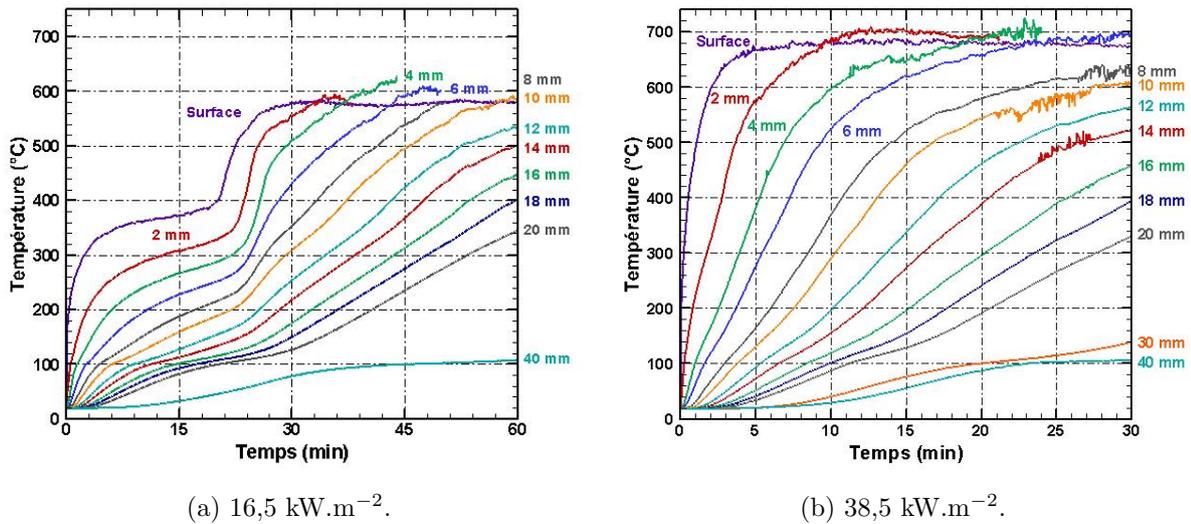
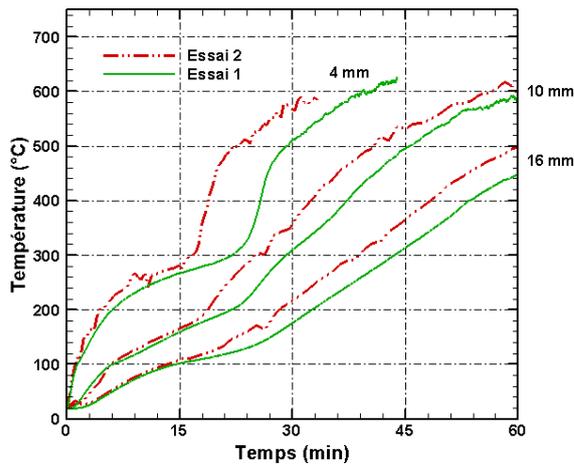


FIGURE 4.6 – Évolutions de la température de surface (caméra IR) et interne du matériau (thermocouples noyés) pour des flux de 16,5 et 38,5 kW.m⁻².

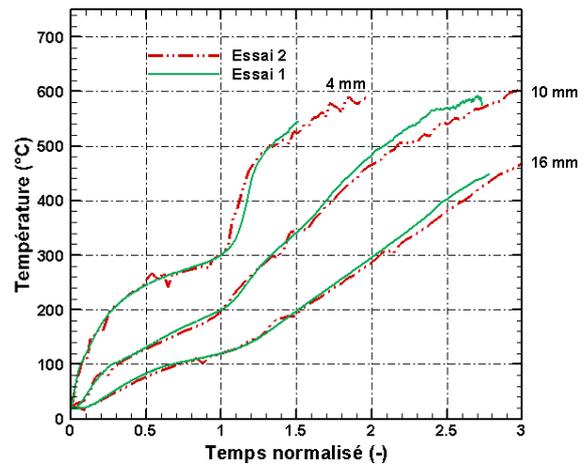
carbonisation. Pour le test effectué à 38,5 kW.m⁻², il n'y a pas eu d'inflammation mais uniquement une combustion solide qui s'est activée beaucoup plus rapidement (environ une minute après le début de l'essai) qu'à 16,5 kW.m⁻². Il est alors difficile de discerner l'effet de la combustion sur les évolutions de température interne. Après une heure d'exposition, la température maximale atteinte à 40 mm de profondeur est d'environ 100 °C à 16,5 kW.m⁻² et 250 °C à 38,5 kW.m⁻².

Comme démontré dans la section précédente, la combustion solide peut débuter à des temps pouvant être décalés de plusieurs minutes lorsque le flux imposé est de 16,5 kW.m⁻². Ce décalage temporel a une incidence sur l'estimation de la température de surface ainsi que sur le MLRPUA. Un deuxième test à 16,5 kW.m⁻² a donc été réalisé avec des thermocouples noyés. Tout comme pour la figure 4.6a (test 1), l'allure générale des courbes est identique (le thermogramme de ce second test est disponible en figure D.16 du livret des figures). Le début de la combustion solide est repéré par une croissance rapide de la température à partir de 14 minutes. La figure 4.7a compare les thermogrammes de ces deux tests pour trois profondeurs différentes (4, 10 et 16 mm). La figure 4.7b compare quant à elle les thermogrammes pour des temps normalisés par le temps pour lequel la température augmente plus rapidement sous l'effet du début de la combustion. Ce temps correspond au temps pour lequel la température atteint 300 °C à une profondeur de 4 mm, 200 °C à une profondeur de 10 mm et 120 °C pour une profondeur de 16 mm.

La combustion solide s'active aux alentours de 20 et 12 minutes pour les essais 1 et 2 respectivement, soit avec un décalage de 8 minutes. Cependant, les thermogrammes en temps normalisé, en figure 4.7b, semblent indiquer que ce décalage n'affecte pas le processus de dégradation pré et post-combustion solide de l'échantillon. Par conséquent, pour un échantillon d'épicéa exposé à 16,5 kW.m⁻², la croissance rapide de la température à 4 mm de profondeur s'opèrera à partir de 300 °C quel que soit le temps auquel la



(a) Thermogrammes.



(b) Thermogrammes normalisés selon le temps.

 FIGURE 4.7 – Comparaison des thermogrammes de deux tests effectués à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ à trois profondeurs dans les échantillons.

combustion solide débute.

L'étude de la température en profondeur a également été menée sur des cas de dégradation avec inflammation. La figure 4.8 présente les évolutions de la température de surface et dans le matériau pour des profondeurs allant de 2 à 40 mm. Les flux imposés sont de 60 et $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ (les thermogrammes obtenus pour un flux $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ peuvent être consultés en figure D.20a du livret des figures). Les barres d'erreur représentent les écarts-types évalués sur trois essais.

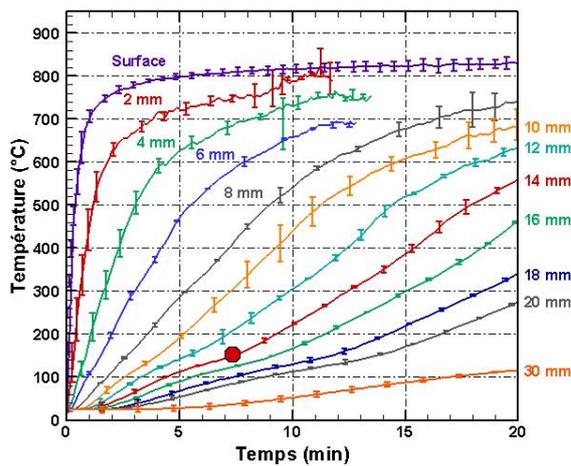
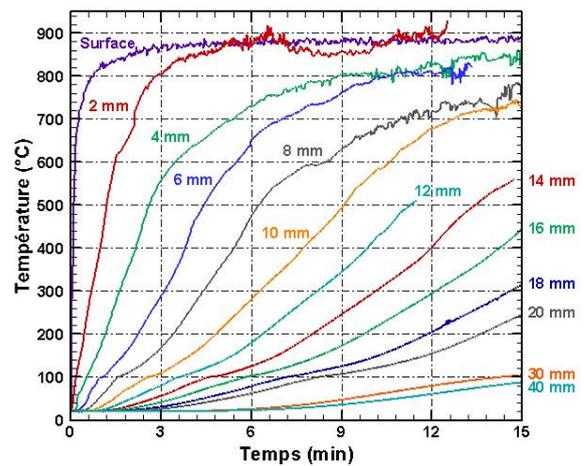

 (a) 60 kW.m^{-2} .

 (b) $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

FIGURE 4.8 – Thermogramme à différentes profondeurs dans le matériau en fonction du flux appliqué.

La température de surface atteint rapidement un plateau dont la valeur est logiquement d'autant plus élevée que le flux de chaleur est important. En raison de la faible

diffusivité thermique de l'échantillon, les températures internes tendent plus lentement vers un plateau. L'élévation de la valeur du flux de chaleur imposé accentue l'augmentation de la température dans le bois. Par exemple, la température à une profondeur de 18 mm atteint 300 °C en 18 min 30 sec pour un flux de 60 kW.m⁻², alors que cela ne prend que 14 minutes à 93,5 kW.m⁻². Les températures proches de la surface exposée (de 2 à 6 mm de profondeur) augmentent rapidement au début du test. À 2 mm de profondeur, la température atteint 600 °C en 107 et 88 secondes pour respectivement 60 et 93,5 kW.m⁻². Pour les profondeurs plus éloignées de la surface exposée (10 mm et plus), il y a une inertie avant que la température ne commence à croître légèrement. Lorsque la température atteint environ 150 °C (mis en évidence en figure 4.8a par un gros point rouge dans le thermogramme à 14 mm de profondeur), un changement de pente est observé. Ce changement est dû à la source de chaleur supplémentaire créée en surface par la combustion de la couche de charbon et transférée par conduction au sein de l'échantillon.

Profils de température

Des profils de température dans l'échantillon ont été tracés d'après les mesures par thermocouples noyés. Les résultats pour différents flux de chaleur (16,5 et 38,5 kW.m⁻²) et à différents temps (900, 1200 et 1800 secondes) sont présentés dans la figure 4.9.

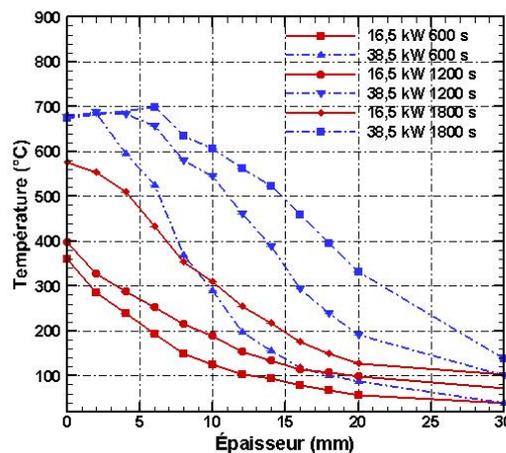


FIGURE 4.9 – Comparaison des profils de température dans le matériau pour différents temps d'exposition en fonction du flux appliqué (16,5 et 38,5 kW.m⁻²).

Les tendances observées sont plutôt classiques résultant d'une absorption du rayonnement en surface suivie d'une diffusion de la chaleur en profondeur. Pour le test à 16,5 kW.m⁻², le gap en température entre les profils à 1200 et 1800 secondes sur les 10 premiers millimètres matérialise l'effet de la combustion du charbon. Pour le test à 38,5 kW.m⁻², la combustion du charbon s'active beaucoup plus rapidement et les profils font état d'un régime établi sur les 6 premiers millimètres après 1800 secondes d'exposition.

La figure 4.10 compare les profils de température pour les flux imposés de 60 à 93,5 kW.m⁻² à différents temps (60, 300 et 600 secondes).

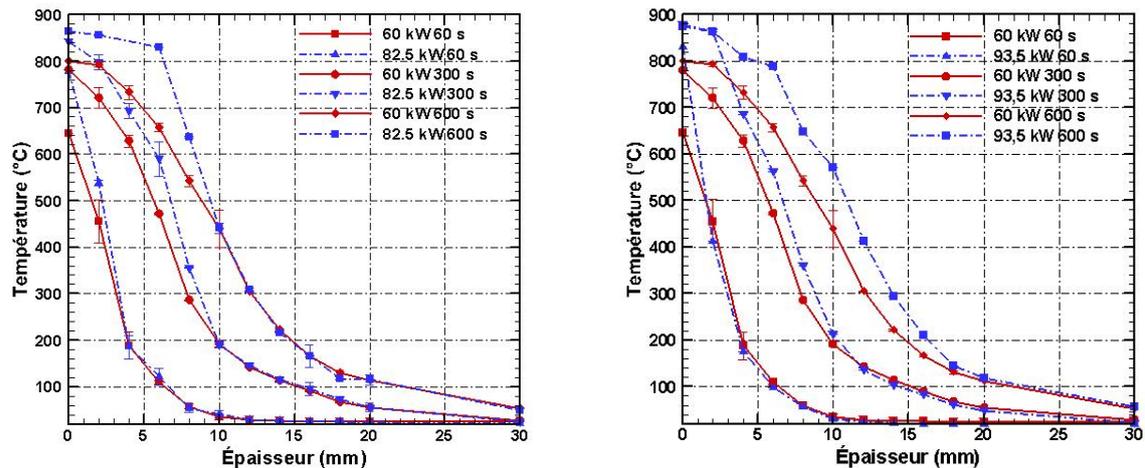
(a) 60 et 82,5 kW.m⁻² à 60, 300 and 600 s.(b) 60 et 93,5 kW.m⁻² à 60, 300 and 600 s.

FIGURE 4.10 – Comparaison des profils de température dans le matériau pour différents temps d'exposition en fonction du flux appliqué.

Les différences entre les profils de température sont principalement présentes à moins de 10 mm de profondeur pour une exposition inférieure à 10 minutes. Les températures en profondeur proches de la surface exposée augmentent rapidement jusqu'à une certaine limite proche de la température de consigne des spires du cône. Globalement, la très faible dispersion montre la bonne répétabilité des tests, même si, pour le test à 60 kW.m⁻², une plus grande dispersion des résultats est observée pour la température à 2 mm de profondeur. Pour rappel, au cours des expériences, lorsque les échantillons se dégradent et se fissurent, les premiers thermocouples se retrouvent directement exposés au cône. Lorsque cela se produit, la température mesurée devient instable et les valeurs ne peuvent plus être prises en compte avec confiance.

4.3.2 Influence de la technique d'implantation du thermocouple sur les mesures de température en profondeur.

Pour démontrer l'importance de l'implantation des thermocouples dans un échantillon de bois, certains tests ont également été effectués avec quatre thermocouples de type K gainés (1 mm de diamètre) placés respectivement à 2, 4, 6 et 8 mm de profondeur. Ces thermocouples ont été placés perpendiculairement aux isothermes après avoir percé la face arrière de l'échantillon. Comme indiqué par Reszka *et al.* [58], ces thermocouples ont été espacés de 20 mm afin de limiter les perturbations mutuelles. La figure 4.11 compare les thermogrammes en fonction du type d'implantation des thermocouples pour des flux de 16,5 et 38,5 kW.m⁻².

Pour 16,5 kW.m⁻², l'utilisation de thermocouples gainés placés perpendiculairement à la surface conduit à une sous-estimation de la température par rapport à celle obtenue à l'aide des thermocouples noyés et positionnés parallèlement à la surface exposée. La transition vers la combustion solide est tout de même captée par les thermocouples gainés

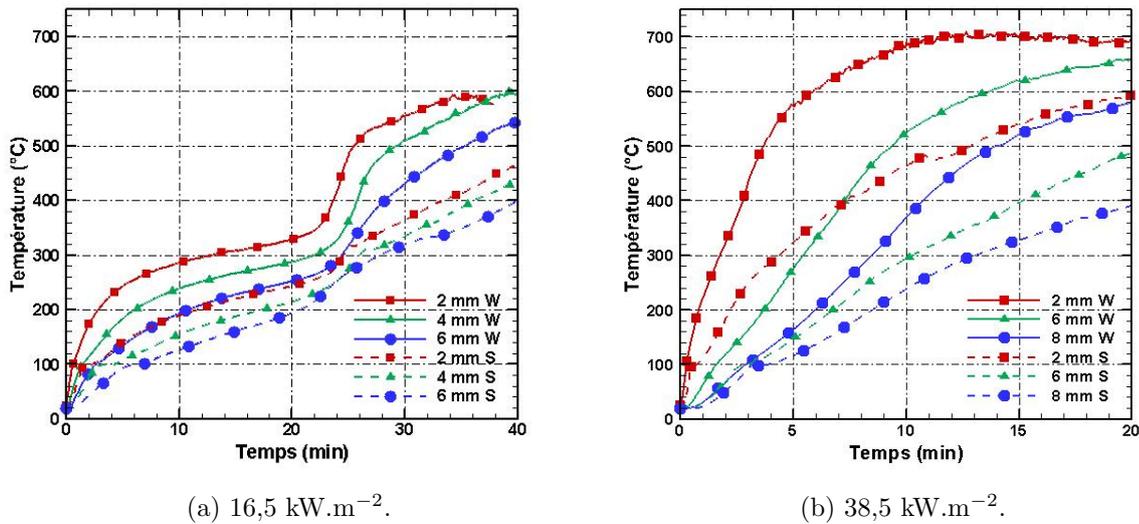


FIGURE 4.11 – Comparaison de l'évolution de la température dans le bois (à 2, 4, 6 et 8 mm de profondeur) en fonction de l'implantation des capteurs de température et du flux imposé. Légende ; S : thermocouple gainé, W : thermocouple noyé.

mais avec une latence de plusieurs minutes. L'évolution de la température pour $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ est également sous-estimée par les thermocouples gainés. Par exemple, après 30 minutes d'exposition, l'écart de température peut atteindre 200 °C entre les deux types de configuration.

Cette différence s'explique principalement par le puits de chaleur créé via la gaine du thermocouple. En effet, en raison de la conductivité élevée du thermocouple et de son grand diamètre, il y a une importante perte de chaleur par conduction induisant une sous-estimation de la température mesurée le long du thermocouple. De plus, la position du thermocouple gainé peut être imprécise. En effet, les forêts longs et minces (dans le cas présent un diamètre de 1,2 mm et une profondeur de forage de 48 mm) se courbent facilement lorsqu'ils rencontrent des hétérogénéités dans le bois (par exemple des nœuds) pendant le processus de forage. Bien qu'elle prenne beaucoup de temps, la mise en place de thermocouples intégrés est donc préférable pour améliorer la précision des températures en profondeur. De plus, comme présenté dans la section 2.3.3, grâce à leur grande flexibilité, de tels thermocouples fins permettent de mesurer simultanément la température et le MLRPUA lors des tests, ce qui n'est pas possible avec les thermocouples gainés de grand diamètre.

L'influence de l'implantation des thermocouples a également été étudiée sur trois essais à 60 kW.m^{-2} et un essai à $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$. La figure 4.12 présente la température moyenne obtenue à partir de ces trois tests avec des barres d'erreur correspondant à l'écart-type entre les tests. Pour un flux de 60 kW.m^{-2} , les barres d'erreur représentent les écarts-types évalués sur trois essais.

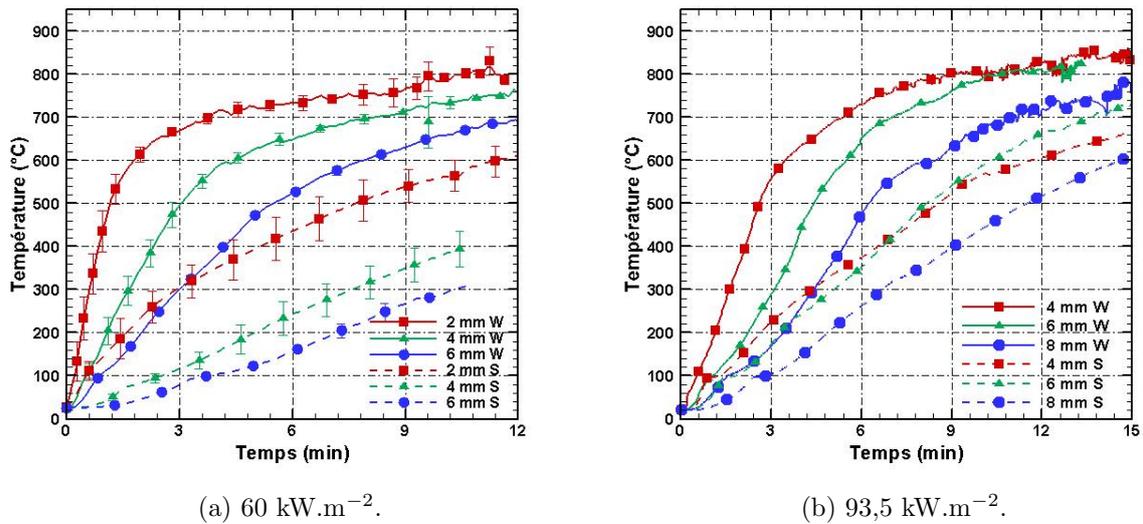


FIGURE 4.12 – Comparaison de l'évolution de la température dans le bois (à 2, 4, 6 et 8 mm de profondeur) en fonction de l'implantation des capteurs de température et du flux imposé. Légende; S : thermocouple gainé, W : thermocouple noyé.

Les évolutions de la température pour les deux types de thermocouple sont très différentes. Les températures obtenues à partir des thermocouples noyés augmentent rapidement avant d'atteindre un plateau alors que les évolutions de température fournies par les thermocouples gainés sont plus linéaires et progressives. Les différences de température peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés, ce qui est considérable. Pour les deux flux de chaleur, l'écart de température s'élève jusqu'à $400 \text{ }^\circ\text{C}$ en début de test. Après 9 minutes d'exposition, l'écart est d'environ $200 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est encore très élevé. De plus, les barres d'erreur sur les températures obtenues par les thermocouples gainés sont plus grandes que celles correspondantes aux thermocouples à fil. Cela met en évidence la moins bonne répétabilité des mesures effectuées par thermocouples gainés. Cela peut s'expliquer par des sources d'inexactitude plus importantes, notamment : la position exacte du thermocouple (processus de perçage), la résistance thermique entre le thermocouple et le bois, etc. Des simulations ont également été effectuées avec le logiciel COMSOL® afin de modéliser la température en fonction de la façon dont un thermocouple est implanté dans l'échantillon. Les simulations effectuées sont présentées dans l'annexe A. Trois paramètres importants ont été étudiés : l'orientation et le diamètre du thermocouple ainsi que la résistance de contact thermocouple/échantillon. Les simulations réalisées n'avaient pas de portée quantitative, elles ont pour but d'évaluer les écarts des températures pour des conditions fixées. Cette étude a permis de montrer que les trois paramètres peuvent tous induire une sous-estimation de la température, en particulier l'orientation du thermocouple dans le bois. L'évolution de la température est plus lente lorsque le thermocouple est disposé parallèlement au flux de chaleur. Cette observation est en très bon accord avec les mesures expérimentales puisque les thermocouples gainés placés parallèlement au gradient thermique après perçage sous-estiment très fortement la température dans l'échantillon. L'augmentation du diamètre ainsi que de la résistance de contact accentue

cet écart.

4.3.3 Épaisseur de la couche de charbon et vitesse de carbonisation

Il est souvent rapporté que la progression du front de charbon dans l'échantillon suit l'isotherme à 300 °C [64]. Nous nous sommes donc focalisés sur une implantation de thermocouples noyés (présentée en section 2.3.3) afin d'étudier avec précision la progression de la couche de charbon dans l'échantillon. Afin de valider l'estimation de l'avancée de la couche de charbon par thermocouples, une détermination directe de la position du front de charbon a également été effectuée à l'aide d'un réglet. Pour cela, des échantillons de bois ont été soumis à un flux de chaleur prescrit (60 et 93,5 kW.m⁻²) à différents temps d'exposition. Ces échantillons ont été refroidis rapidement avec de l'azote liquide en fin de test pour stopper les réactions de pyrolyse. Ils ont été ensuite coupés en leur milieu afin de mesurer la position du front de charbon. Sur la figure 4.13, la position du front de charbon est comparée à celle obtenue indirectement à partir de l'isotherme à 300 °C. Les barres d'erreur du front de charbon déduites des thermocouples (noyés et gainés) correspondent aux écarts-types obtenus sur trois tests pour chaque flux de chaleur.

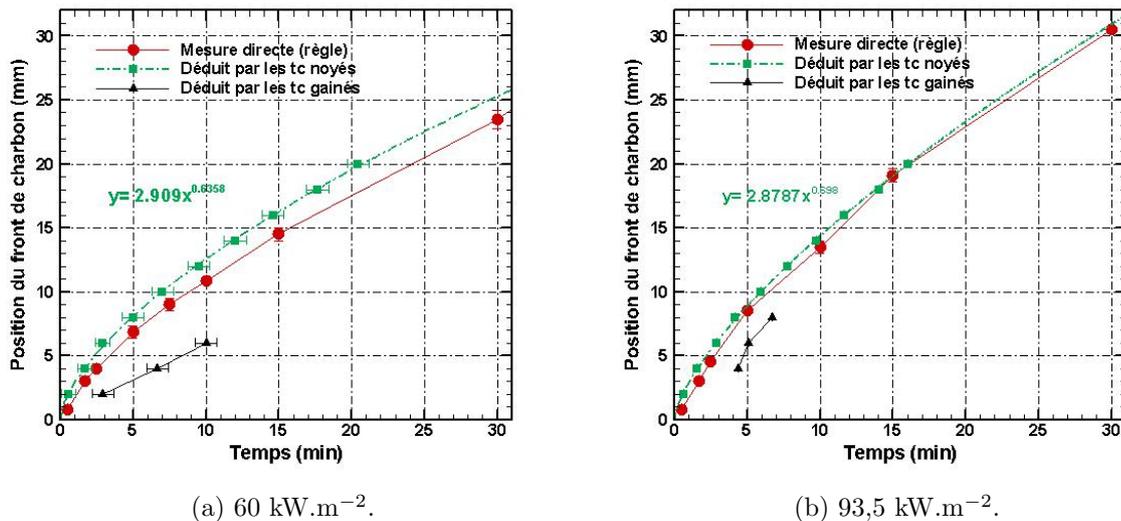


FIGURE 4.13 – Positions des fronts de charbon mesurées avec une règle et déduites de l'isotherme à 300 °C fournies par les thermocouples gainés et noyés. Pour les marques de mesure comportant des barres d'erreur, trois mesures ont été effectuées et les barres d'erreur correspondent aux écarts-types. Pour les marques simples, une seule mesure a été effectuée.

La figure 4.13 montre une bonne concordance entre les mesures directes de la position du charbon et la position déduite à partir de l'isotherme à 300 °C mesurée avec les thermocouples noyés. Cela apporte ainsi encore plus de confiance quant à la précision des mesures ainsi réalisées. En revanche, les écarts sont beaucoup plus marqués avec les thermocouples gainés. Par exemple, pour un test effectué à 60 kW.m⁻², le front de charbon est localisé à une profondeur de 6 mm après 180 secondes selon les mesures du

thermocouple noyé. En revanche, les données des thermocouples gainés indiquent que le temps nécessaire pour atteindre cette profondeur serait de 620 secondes.

Une régression, sous forme de loi puissance, de la position du front de charbon en fonction du temps a été effectuée sur les données issues des thermocouples noyés. Ceci permet notamment de remonter au taux de carbonisation par simple dérivation analytique. La figure 4.14 présente le taux de carbonisation obtenu à partir de la régression (courbe en pointillé) et celui estimé (par différences finies centrées) à partir des données brutes fournies par les thermocouples noyés (carrés verts).

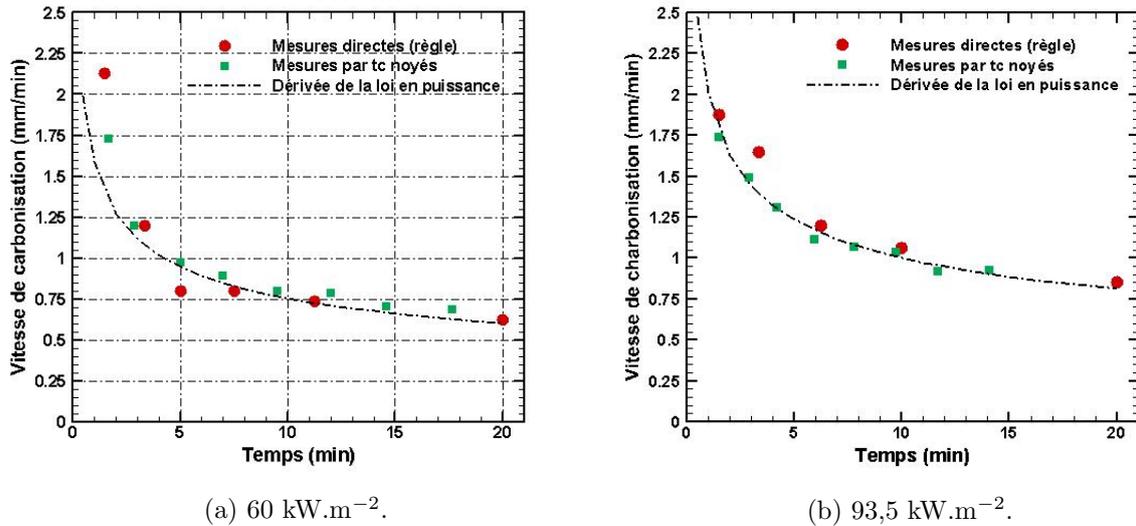


FIGURE 4.14 – Taux de carbonisation calculés à partir des fronts de charbon mesurés avec la règle et déduits de l'isotherme à 300 °C des thermocouples noyés.

Les évolutions du taux de carbonisation calculés à partir des mesures directes des thermocouples noyés sont en bon accord pour les deux flux de chaleur. Le taux de carbonisation atteint une valeur crête autour de 2,5 mm.min⁻¹ dans une partie transitoire et diminue jusqu'à un état quasi stationnaire autour de 0,8 mm.min⁻¹. Le suivi de l'isotherme à 300 °C à partir des thermocouples noyés permet en un seul test la détermination précise de la position du front de charbon ainsi que du taux de carbonisation. Avec la méthode directe, plusieurs tests (par exemple 8 au total pour le test à 60 kW.m⁻² sont nécessaires pour obtenir ce résultat. Dans ce qui suit, la variation du taux de carbonisation en fonction du temps pour différents flux de chaleur a été étudiée et est présentée en figure 4.15.

Sur cette figure sont également représentées les régressions sous forme de loi puissance pour chaque flux. Lorsque le flux de chaleur est faible, une loi de puissance incluant un décalage temporel t_0 a été choisie afin de tenir compte du délai avant le début du processus de carbonisation : $X(t) = a(t - t_0)^b$, $X(t)$ correspondant à la position du front de charbon à l'instant t . Pour le test effectué à 16,5 kW.m⁻², deux régressions ont été effectuées, la première pour le début du test, avant la combustion solide et la seconde après. Le taux de carbonisation est calculé à partir de la dérivée analytique des lois d'ajustement.

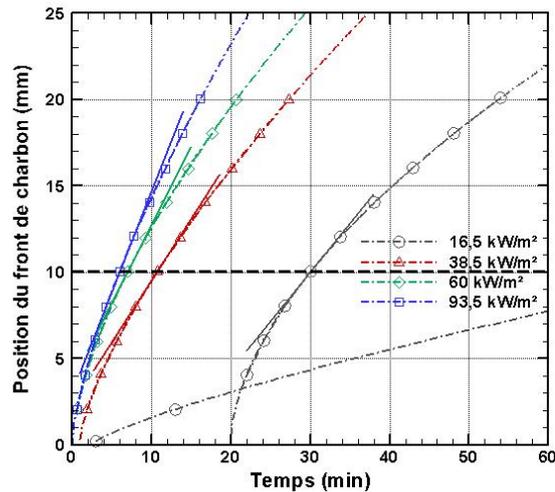
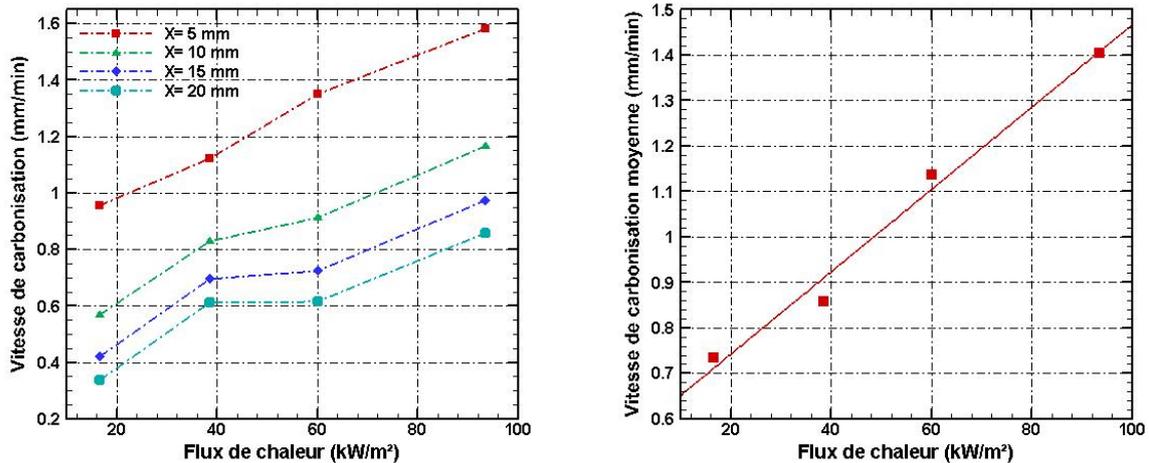


FIGURE 4.15 – Front de carbonisation en fonction du temps pour différents flux de chaleur. Points : données expérimentales - Courbes en pointillés : ajustement de la loi de puissance - Lignes simples : courbe tangente à la position $X = 10\text{ mm}$.

Étant donné le décalage temporel, comparer le taux de carbonisation à un instant identique pour les différents flux de chaleur ne serait pas pertinent. Il est plus judicieux d'effectuer cette comparaison pour une position donnée du front de charbon. Pour 10 mm par exemple, le taux de carbonisation correspond à la pente des différentes courbes à une ordonnée égale à 10 mm (ligne pointillée sur la figure 4.15). Les taux de carbonisation pour des profondeurs égales à 5, 10, 15 et 20 mm ont ainsi été déterminés et sont représentés en fonction du flux de chaleur sur la figure 4.16a. De manière assez logique, plus le flux est élevé, plus le taux de carbonisation augmente et plus la position est profonde, plus le taux de carbonisation est faible. Pour un flux de chaleur donné, à mesure que l'épaisseur de charbon augmente, le taux de carbonisation tend vers un état quasi stationnaire. Le taux de carbonisation varie plutôt linéairement avec le flux de chaleur radiatif incident, ce qui est en accord avec les travaux de Tran et White [64; 89].

Comme proposé par Tran et White [64], un taux de carbonisation moyen défini comme la profondeur atteinte par le charbon divisée par le temps nécessaire pour atteindre cette profondeur peut également être estimé pour une profondeur donnée. La figure 4.16b présente le résultat obtenu pour une profondeur de 15 mm. Pour un flux de chaleur faible, le temps pris en compte pour ce calcul est le temps moins le délai t_0 nécessaire au démarrage du processus de carbonisation. Une dépendance quasi-linéaire du taux de carbonisation moyen est discernable en fonction du flux appliqué.



(a) Taux de carbonisation en fonction du flux de chaleur à différentes profondeurs. (b) Taux de carbonisation moyen (calculé de 0 à 15 mm de profondeur) en fonction du flux de chaleur.

FIGURE 4.16 – Taux de carbonisation pour différents flux de chaleur.

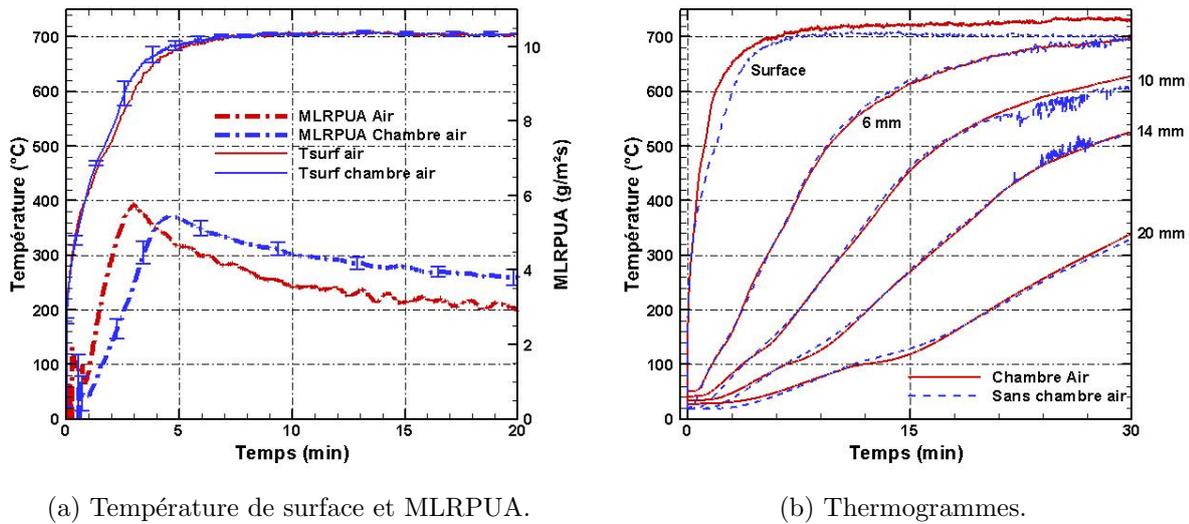
4.4 Influence des conditions expérimentales

Tout comme pour l'inflammation, l'influence des conditions expérimentales (telles que l'effet de l'humidité des échantillons ou du taux d'oxygène) sur la dégradation du bois a également été étudiée.

4.4.1 Effet de l'air sur la combustion

L'étude bibliographique a montré que la teneur en oxygène, élément moteur de la combustion solide et gazeuse, pouvait considérablement impacter la dégradation du bois. L'objectif de cette partie est de quantifier la part de la combustion solide sur la dégradation du bois en maîtrisant la teneur en oxygène lors des essais. Pour cela, une chambre à atmosphère contrôlée a été mise en place comme présentée en section 2.5. L'orientation est toujours verticale et le cône se situe à l'extérieur de cette chambre. La quantité d'oxygène présente dans la chambre est contrôlée à l'aide d'un capteur d'oxygène et de l'argon est injecté en continu avec un débit de $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ afin d'obtenir un pourcentage d'oxygène inférieur à 6 %. La fenêtre saphir est disposée sur la chambre, entre le cône et l'échantillon, de façon à ce que la chambre soit la plus étanche possible. Les échantillons sont exposés à $16,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant une heure, et à $38,5$ et $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 20 minutes. En premier lieu, une campagne expérimentale sous air a été menée de façon à s'assurer que les échantillons se comportent à l'identique avec et sans chambre. La figure 4.17 compare les températures de surface, les MLRPUA ainsi que les thermogrammes pour des essais à $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Les températures de surface et les MLRPUA ont été mesurés pour trois essais pendant 20 minutes tandis que l'essai effectué avec des thermocouples a duré 30 minutes.

De manière générale, les essais montrent que les évolutions de la température de sur-



(a) Température de surface et MLRPUA.

(b) Thermogrammes.

FIGURE 4.17 – Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur en fonction du dispositif expérimental pour un flux de $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

face et dans le matériau sont similaires. En revanche, le MLRPUA mesuré avec les expériences dans la chambre est légèrement plus élevé. Cette différence peut provenir des conditions thermiques ambiantes qui changent avec la présence de la chambre puisque celle-ci s'échauffe jusqu'à $120 \text{ }^\circ\text{C}$ durant les essais. Le décalage au niveau du pic de MLRPUA peut provenir du filtrage du rayonnement du cône par la fenêtre saphir. En effet, le saphir n'est transparent qu'aux longueurs d'onde inférieures à $5 \text{ }\mu\text{m}$ pour lesquelles le bois vierge a une absorptivité plus faible qu'aux grandes longueurs d'onde (comme présenté figure D.8). Hormis cette légère différence au niveau des MLRPUA, la dégradation générale en particulier au niveau des températures reste très comparable.

Des essais ont ensuite été réalisés avec l'injection d'argon. La figure 4.18 compare les évolutions des températures de surface, des MLRPUA ainsi que des thermogrammes pour des essais dans la chambre à $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 30 minutes.

Les résultats mettent bien en évidence l'effet de la teneur en oxygène sur la dégradation des échantillons d'épicéa. En effet, visuellement, la combustion du charbon ne se produit pas pour les essais avec de l'argon injecté dans la chambre (le pourcentage d'oxygène mesuré est de 6 %) contrairement à ceux sous air où la combustion se produit environ une minute après le début de l'essai. Une des conséquences de l'absence de combustion solide est l'absence du pic de MLRPUA pour les essais sous argon. Le MLRPUA croît pendant les cinq premières minutes de l'expérience jusqu'à une valeur constante de $3,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à la fin des essais. La température de surface mesurée pour les échantillons en présence d'argon a une évolution différente des échantillons dégradés sous air même si l'allure générale est proche. Le plateau de température est quant à lui moins marqué puisque la température de surface continue d'augmenter légèrement tout au long du test. Les valeurs de la température de surface sous argon sont inférieures à celles sous air avec une différence de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ à 5 minutes d'essai qui diminue à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ après 20 minutes.

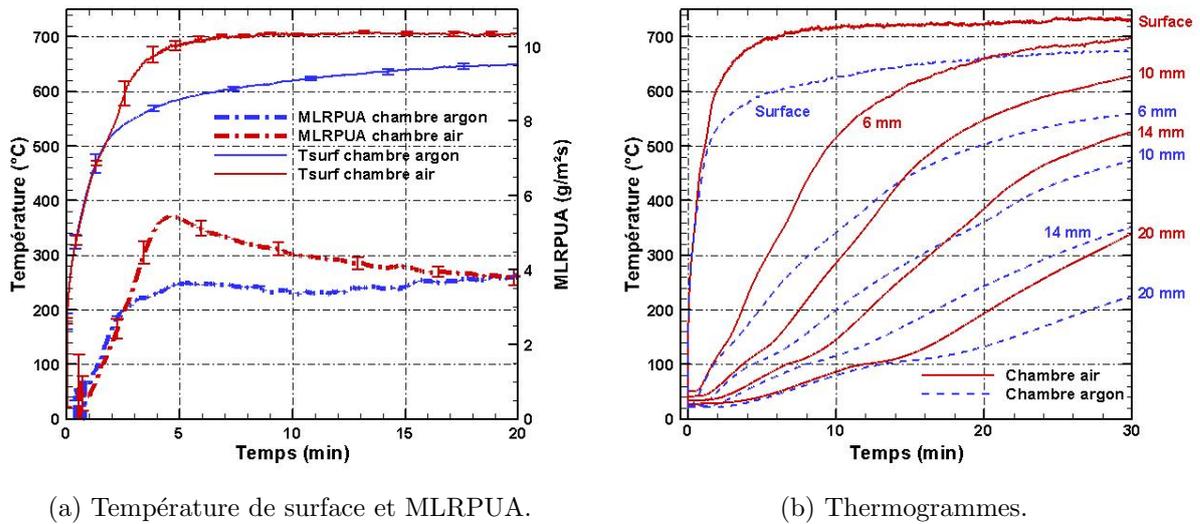


FIGURE 4.18 – Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur pour un essai sous air et un essai sous argon à 38,5 kW.m⁻².

De manière générale, les thermogrammes des essais sous air ont une croissance plus rapide que pour les essais sous argon. À 6 mm par exemple, l'écart de température est d'environ 170 °C après 10 minutes de tests. L'argon injecté dans la chambre montre que la combustion du charbon initiée par la présence de l'oxygène conduit à des températures plus élevées en profondeur. De plus, les essais sous air montrent une augmentation plus rapide de la température dès que celle-ci atteint les 150 °C. Ceci est dû à l'apport d'énergie générée par la combustion solide et n'est pas visible sur les essais sous argon. D'autres essais ont également été effectués à des flux prescrits différents et les mesures de la température en surface, en profondeur et de MLRPUA ont été effectués (figures D.17 et D.18 du livret pour un flux imposé de 49,5 et 60 kW.m⁻²). Les allures générales des courbes sont semblables à la figure 4.18 et mettent en évidence une fois de plus l'effet de l'apport d'énergie supplémentaire par la combustion du charbon.

Enfin, un dernier test a été réalisé à 16,5 kW.m⁻² de façon à observer l'impact de l'injection d'argon sur la transition vers la combustion solide (comme présenté en figure 4.2 et 4.6a). La figure 4.19 compare les évolutions des températures de surface, les MLRPUA ainsi que les thermogrammes pour quatre profondeurs sélectionnées (les thermogrammes pour l'ensemble des 12 profondeurs sont présentés en figure D.19) pour des essais à 16,5 kW.m⁻² pendant 60 minutes.

Pour les essais à 16,5 kW.m⁻², l'activation de la combustion solide sous air se distingue à partir de 20 minutes d'essai. Les quatre essais effectués à ce flux sous argon indiquent que la combustion du charbon ne se produit pas, même après une heure d'exposition. Il n'y a donc pas d'augmentation importante du MLRPUA ou des températures comme constaté lors des essais réalisés sous air. Les valeurs des MLRPUA restent quasi constantes à 1,5 g.m⁻²s⁻¹ et la température de surface augmente de façon quasi linéaire à partir de 15 minutes jusqu'à atteindre 480 °C (soit 120 °C en dessous des essais sous air). Ceci se

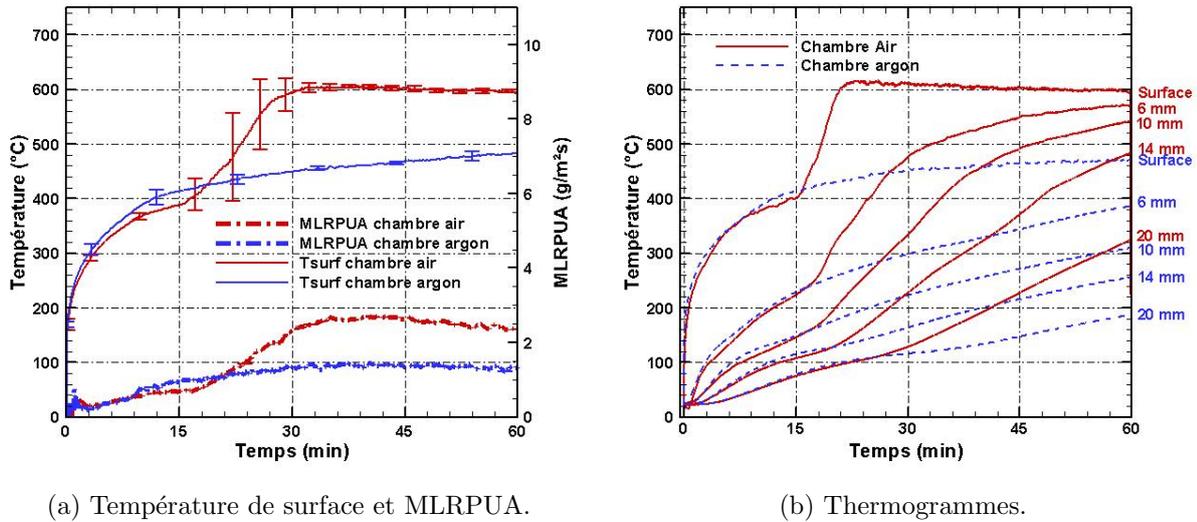


FIGURE 4.19 – Comparaison des MLRPUA, températures de surface et en profondeur en fonction de la quantité d'oxygène présent dans l'environnement à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

retranscrit également au niveau des mesures des températures en profondeur avec également une croissance quasi linéaire à partir de 15 minutes. L'écart entre les températures mesurées après une heure d'essai est supérieur à $100 \text{ }^\circ\text{C}$ quelle que soit la profondeur étudiée. Tous ces résultats permettent de bien se rendre compte du rôle de la combustion solide du bois.

De manière plus quantitative, une estimation de l'énergie supplémentaire générée par la combustion du charbon peut être réalisée à partir des tests à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$, pour lesquels la transition vers la combustion solide se distingue nettement. Pour ce faire, nous avons procédé par tâtonnement, en modifiant, à partir de 20 minutes d'essai, la consigne de température du cône de sorte à essayer de reproduire les variations de MLRPUA et de température de surface obtenus sous air. Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus en augmentant la température de consigne du cône progressivement (de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ tous les 90 secondes) jusqu'à atteindre $27,5 \text{ kW.m}^{-2}$. La figure 4.20 compare les évolutions de MLRPUA et des températures de surface de trois types d'essais différents : à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sous air et sans chambre, à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ dans la chambre sous air et à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 20 minutes suivi de la croissance du flux jusqu'à $27,5 \text{ kW.m}^{-2}$ dans la chambre sous argon.

La croissance de la température de surface ainsi que du MLRPUA à partir de 20 minutes d'essai se situent à des valeurs similaires à celles enregistrées sous air. L'apport de chaleur due à la combustion solide se situerait donc aux alentours de 11 kW.m^{-2} pour un flux initial imposé de $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Bien entendu, ce travail est exploratoire et il est nécessaire de réaliser ces expériences pour d'autres flux de chaleur. Seule une modélisation fine de la combustion solide permettrait d'explicitier précisément le flux supplémentaire généré. L'approche expérimentale qui en découlerait pour le quantifier serait sans nul doute plus rigoureuse.

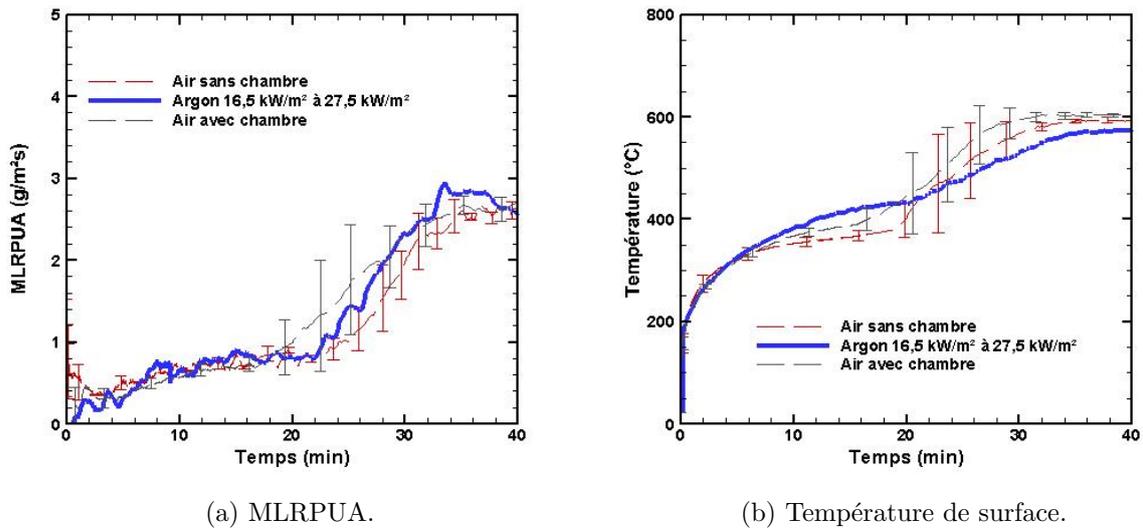


FIGURE 4.20 – Comparaison des MLRPUA et températures de surface en fonction des conditions expérimentales pour la caractérisation du flux supplémentaire généré par la combustion solide.

4.4.2 Effet de l'humidité sur la dégradation des échantillons

L'effet de l'humidité du bois, entre 9 et 30 %, a également été étudié. Pour des flux relativement faibles, il peut être intéressant de voir si la transition vers la combustion solide est décalée dans le temps en fonction de l'humidité. La figure 4.21 présente les évolutions de MLRPUA pour différentes humidités à des flux de 16,5 et 22 kW.m⁻².

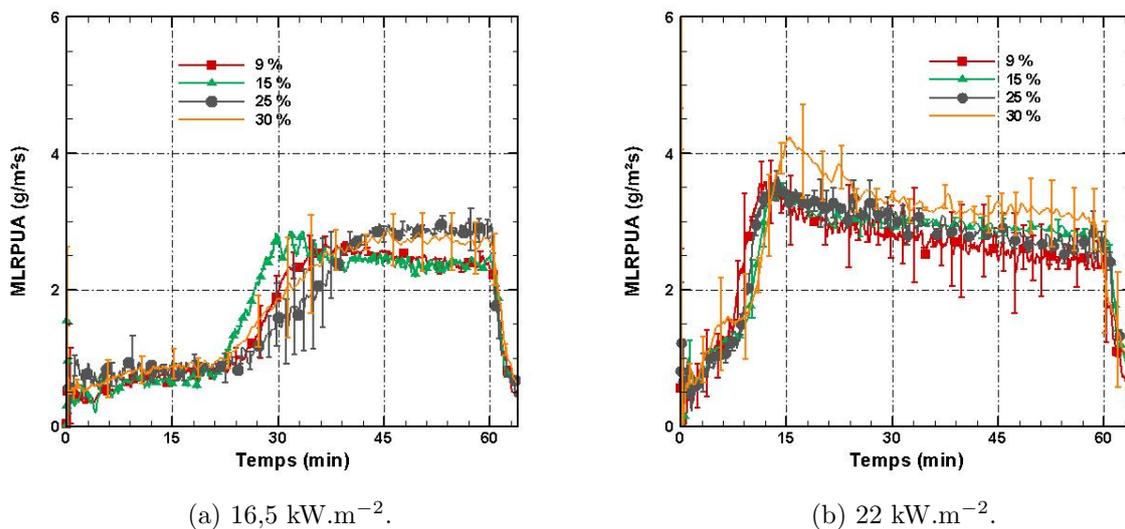


FIGURE 4.21 – Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidités étudiées.

Les évolutions des MLRPUA sont légèrement différentes en fonction de l'humidité des échantillons, tout particulièrement pour le flux de 16,5 kW.m⁻². En revanche, les courbes montrent qu'il est difficile d'affirmer que l'augmentation de l'humidité retarde la combustion du charbon. Celle-ci débute après 21 minutes d'exposition pour une humidité

de 9 % tandis que celle-ci commence à partir de 20, 25 et 22 minutes pour des humidités de 15, 25 et 30 %. Il est possible de remarquer que les écarts-types sont importants. Ces écarts peuvent être expliqués par la figure 4.3 qui met en évidence la disparité des résultats à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pour une humidité fixé. Pour une humidité faible, il existe déjà des disparités importantes concernant le début de la combustion solide. L'élévation de l'humidité des échantillons doit augmenter ces disparités puisque les conditions nécessaires à l'initiation de la combustion peuvent être ralenties par l'eau présente dans le bois. Concernant le flux à 22 kW.m^{-2} , la combustion solide débute après 5 minutes d'exposition au flux pour une humidité de 9 %. Le début de la combustion augmente légèrement entre 7 et 9 minutes lorsque l'humidité est plus élevée. Une fois la combustion solide établie, le plateau de MLRPUA est quasi identique quel que soit le flux appliqué. Ce plateau se situe entre $2,5$ et $3 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ et entre 3 et $3,5 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour un flux de 22 kW.m^{-2} . La prise d'humidité des échantillons engendre une prise de masse liée à l'eau absorbée par le bois. Le plateau de MLRPUA étant similaire pour chaque humidité, cela indique que la dégradation est ralentie par l'humidité. En effet, avec de l'eau supplémentaire à évaporer, un MLR identique ou comparable implique une perte en masse de matière sèche plus faible et donc une production de gaz de pyrolyse "sec" plus faible. Les températures de surface sont présentées en figure 4.22 pour des flux de $16,5$ et 22 kW.m^{-2} en fonction de l'humidité des échantillons.

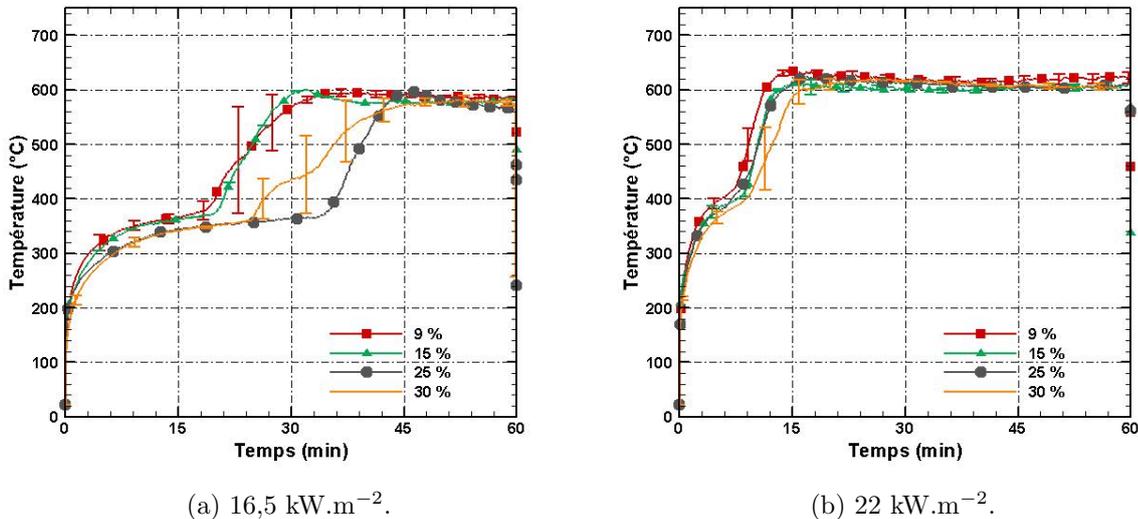


FIGURE 4.22 – Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.

Pour $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ l'augmentation de la température de surface, initiée par la combustion solide est décalée dans le temps lorsque l'humidité des échantillons augmente. Pour 22 kW.m^{-2} , le début de la combustion solide se produit à des temps relativement similaires tout comme pour les MLRPUA. Ces courbes montrent que le délai d'activation de la combustion peut être impacté par la présence d'eau dans les échantillons. En revanche, la combustion solide débute à des températures de surface identiques pour un même flux

imposé. Cette température vaut 370 °C pour $16,5\text{ kW.m}^{-2}$ et 400 °C pour 22 kW.m^{-2} . Une fois la combustion solide propagée sur toute la surface exposée au cône, les plateaux de température sont identiques quelle que soit l'humidité étudiée (entre 580 et 590 °C pour $16,5\text{ kW.m}^{-2}$ et entre 600 et 620 °C pour 22 kW.m^{-2}).

Les résultats suggèrent que l'humidité ralentit la dégradation des échantillons même si aucune tendance claire reliant augmentation de l'humidité et initiation de la combustion n'est discernable (la combustion solide d'un échantillon avec 15% d'humidité peut débuter à des temps plus courts que des échantillons à 9% d'humidité). Deux essais supplémentaires ont été réalisés avec des thermocouples noyés dans les échantillons. L'usinage et l'installation des thermocouples noyés ont a tout d'abord été effectués avant de placer les échantillons dans les enceintes saturées en humidité. La figure 4.23 compare les thermogrammes à $16,5$ et $38,5\text{ kW.m}^{-2}$ en fonction de l'humidité des échantillons.

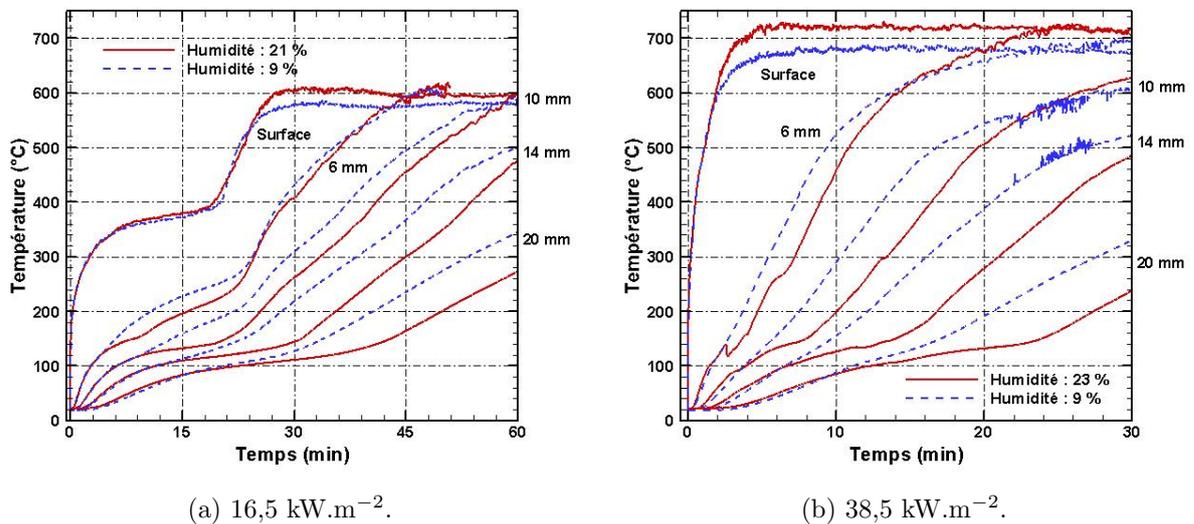


FIGURE 4.23 – Comparaison des thermogrammes en profondeur en fonction des différentes humidités étudiées.

L'augmentation de la température en profondeur est, d'après les deux figures, retardée par la présence d'eau dans les échantillons. L'écart pour un temps fixé peut aller jusqu'à 100 °C pendant la croissance de la température à une même profondeur. La différence entre les courbes est d'autant plus présente que la position des thermocouples est éloignée de la surface exposée. La migration de l'eau dans l'échantillon vers la face non exposée au flux de chaleur est sans doute la cause de ce ralentissement dans la croissance de la température en particulier entre 120 et 160 °C . Ces essais mettent en exergue de façon plus évidente l'effet retardant de l'humidité dans les échantillons sur la dégradation du bois.

L'effet de l'humidité sur la dégradation des échantillons a également été étudiée pour des flux élevés, engendrant l'inflammation. La figure 4.24 permet de mettre en évidence l'influence de l'humidité des échantillons sur les MLRPUA en fonction des deux flux étudiés (60 et $93,5\text{ kW.m}^{-2}$).

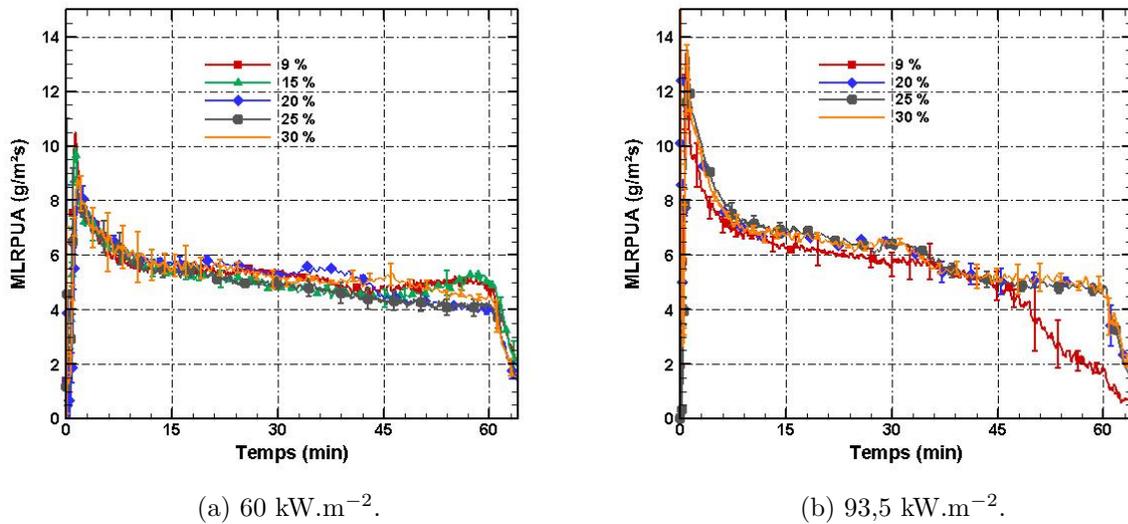


FIGURE 4.24 – Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidité étudiées.

Les MLRPUA pour $49,5$ et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sont disponibles en figure D.21 dans le livret des figures. Les courbes montrent que les évolutions des MLRPUA sont très similaires quelle que soit l'humidité de l'échantillon, traduisant à nouveau l'effet retardant de l'humidité sur la dégradation. La chute du MLRPUA après 45 minutes d'essai à $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pour une humidité de 9 % est due à une dégradation totale des échantillons. En plus de la perte en masse, la température de surface a été mesurée tout au long des essais avec la caméra infrarouge. La figure 4.25 présente les évolutions de la température de surface en fonction de l'humidité des échantillons pour des flux imposés de 60 et $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ (les températures de surface pour $49,5$ et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sont disponibles en annexe D.22 dans le livret des figures).

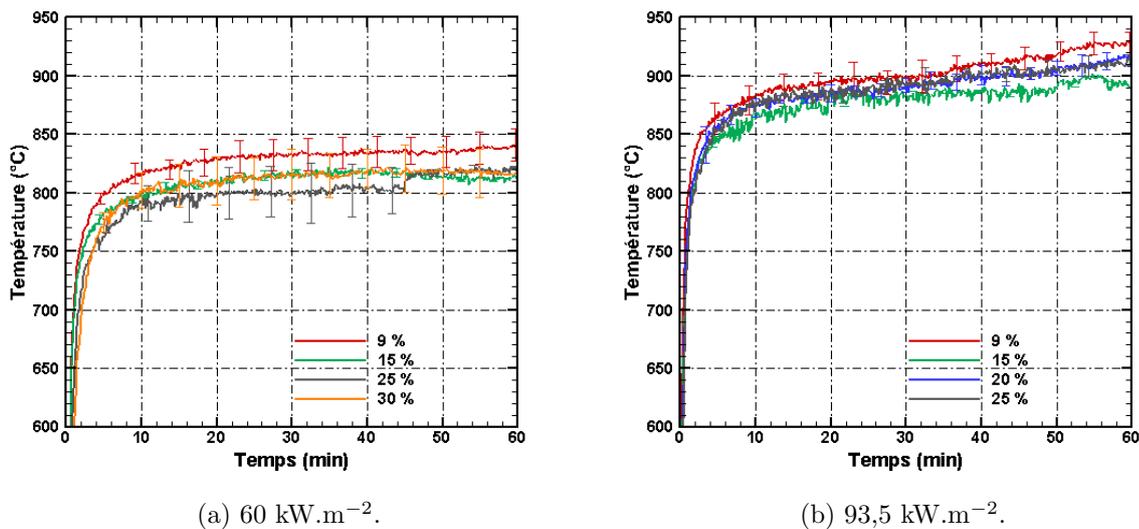


FIGURE 4.25 – Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.

Les températures de surface sont également impactées par l'augmentation de l'humidité des échantillons mais sans tendance claire. Par exemple, pour un flux de 60 kW.m^{-2} , la température de surface passe de 840 à 820 °C pour des humidités de 9 et 25% respectivement. L'écart maximal existant est de 40 °C .

Deux essais supplémentaires ont également été effectués avec des thermocouples noyés dans les échantillons. Le protocole est identique à celui présenté précédemment pour les essais à faible flux. La figure 4.26 compare les thermogrammes pour des flux de 60 et $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$ en fonction des humidités.

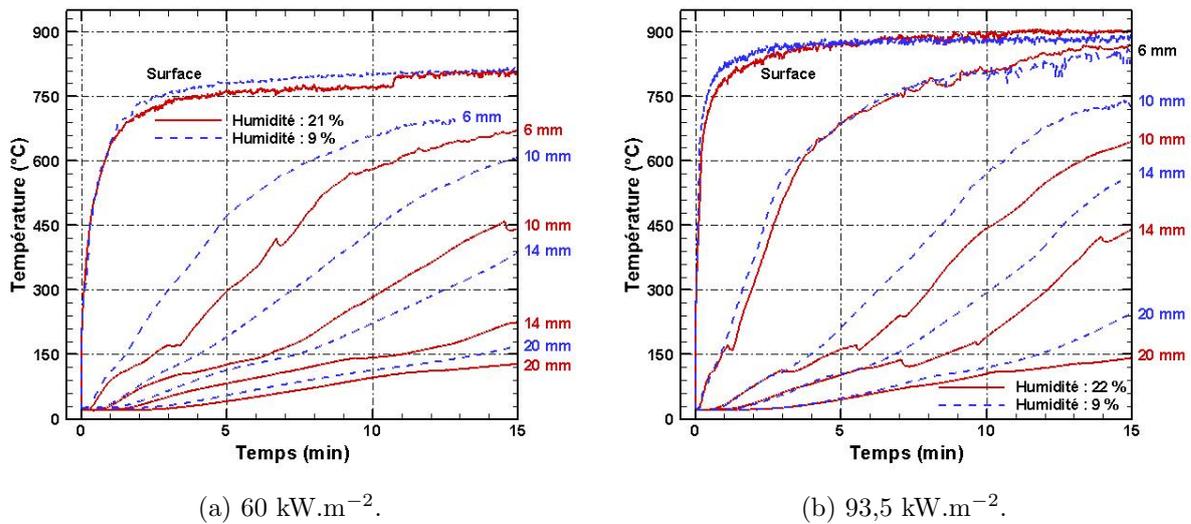


FIGURE 4.26 – Comparaison des thermogrammes en profondeur en fonction des différentes humidités étudiées.

Les écarts des températures pour les essais à 60 kW.m^{-2} sont similaires à ceux observés sur les figures 4.23. La différence de température entre un échantillon à 9 et 21% d'humidité peut s'élever jusqu'à 100 °C . Le saut de 25 °C de la température de surface après 11 minutes d'essai traduit l'échauffement de la surface exposée suite à l'inflammation. En revanche, pour $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$, la température mesurée à 6 mm de profondeur est quasiment similaire pour les deux humidités. Mais dès lors que la température est mesurée à une distance éloignée de la surface exposée, l'écart de température apparaît à nouveau. Enfin, la figure 4.27 compare la position du front de charbon, déduite de l'isotherme à 300 °C avec les thermocouples noyés, en fonction de l'humidité des échantillons.

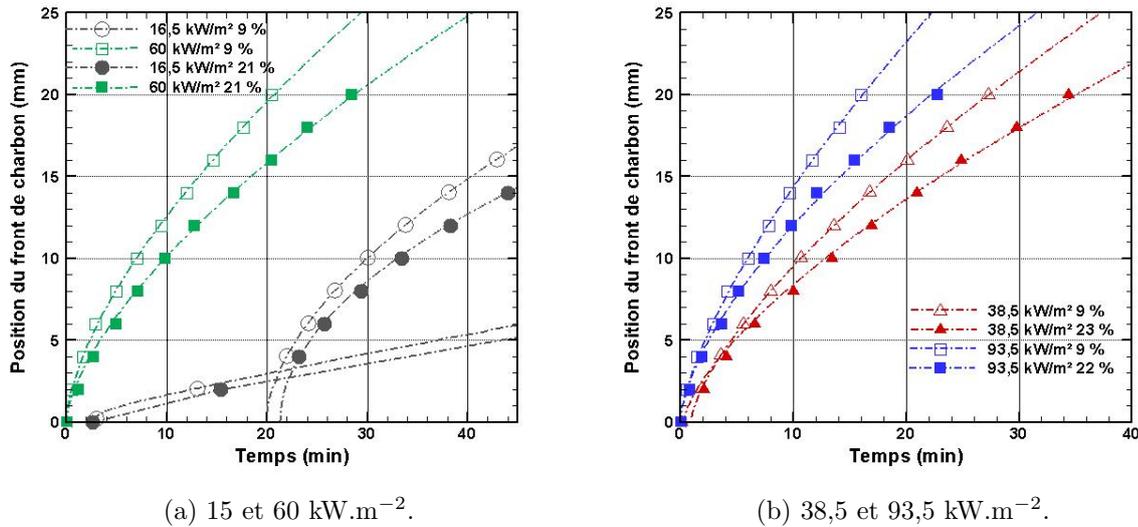


FIGURE 4.27 – Comparaison des profondeurs de charbon en fonction des différentes humidités étudiées.

Les courbes mettent en évidence l'effet de l'humidité sur l'évolution de la position du front de charbon. L'augmentation d'humidité ralentit la progression de la couche de charbon. Les écarts tendent également à se creuser au cours de la dégradation. Par exemple, pour 60 kW.m^{-2} , le front de charbon atteint les 20 mm de profondeur après 21 et 28 minutes d'essai pour une humidité de 9 et 21 % respectivement. Ces différences apparaissent pour tous les flux imposés.

4.4.3 Effet de l'essence de bois sur la dégradation des échantillons

Les mesures de température de surface et de perte en masse ont également été effectuées sur des échantillons de hêtre au cours de leur exposition au cône. La figure 4.28 présente les MLRPUA ainsi que les températures de surface pour des flux de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$. À noter qu'il n'y a pas eu d'auto-inflammation pour l'essai présenté en figure 4.28a à 60 kW.m^{-2} pendant 30 minutes.

Pour les deux flux imposés, la température de surface de l'épicéa augmente plus rapidement et atteint un plateau plus élevé que le hêtre. Celle-ci atteint $810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le hêtre et $870 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'épicéa lorsque le flux est de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ après 5 minutes d'exposition. À 60 kW.m^{-2} , la température de surface est de $810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'épicéa et $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le hêtre après 10 minutes d'essai. L'écart des températures de surface dans la phase plateau est d'environ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ selon l'essence de bois. En revanche, les évolutions des MLRPUA pour les deux flux montrent que la dégradation du hêtre est plus importante que celle de l'épicéa. Le pic en début d'expérience est plus élevé pour le hêtre et la phase de plateau est comprise entre 8 et $9,6 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour le hêtre et entre 4,9 et $6,4 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour l'épicéa selon le flux imposé. Cela équivaut à une différence de 29 % pour 60 kW.m^{-2} , et 39 % pour $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$. Des essais ont également été réalisés avec des thermocouples noyés

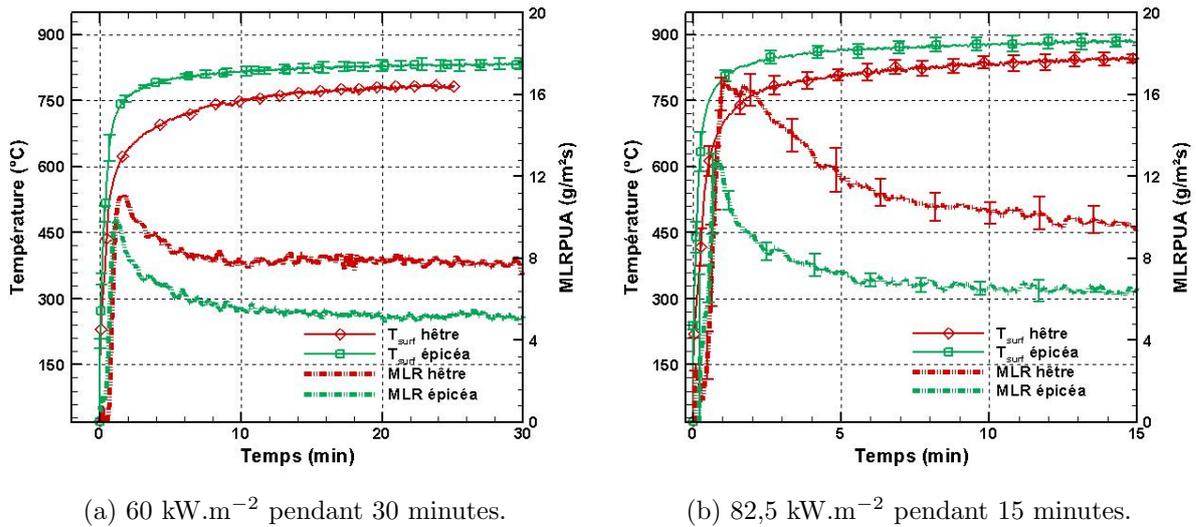


FIGURE 4.28 – MLRPUA et température de surface pour des échantillons d'épicéa et de hêtre exposés à 2 flux différents.

dans le hêtre. Les tests effectués avec l'épicéa ont montré une bonne répétabilité des essais et ne seront pas multipliés ici pour le hêtre. La figure 4.29 compare les thermogrammes ainsi que les profils de température en fonction de l'essence de bois pour un flux de 82,5 kW.m⁻² (les thermogrammes à toutes les profondeurs pour le hêtre sont disponibles en figure D.23 du livret des figures).

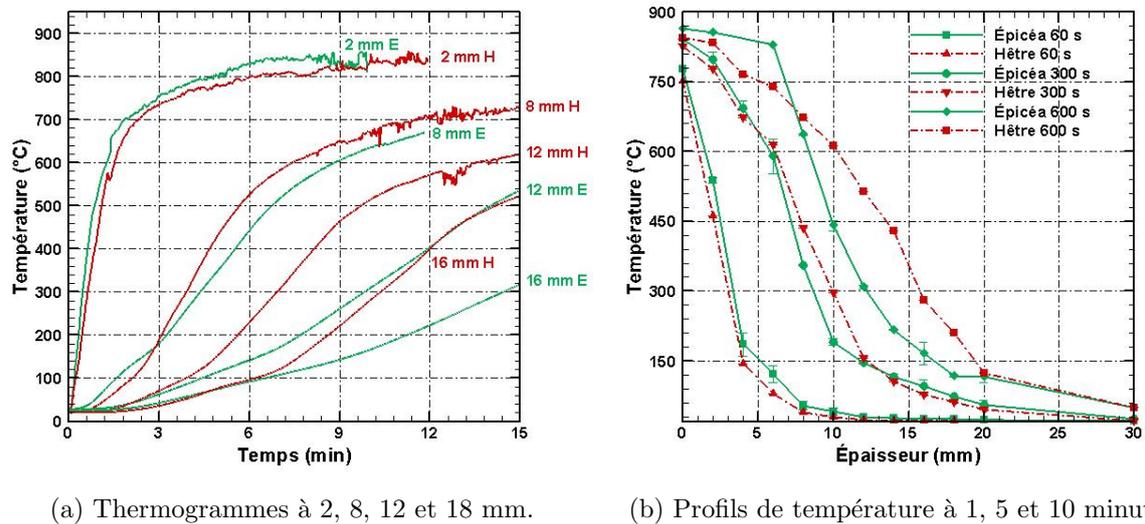


FIGURE 4.29 – Comparaison des thermogrammes à différentes profondeurs et des profils de température entre l'épicéa et le hêtre pour un flux de 82,5 kW.m⁻² (E : épicéa, H : hêtre).

La figure 4.29a montre que les thermogrammes sont relativement proches pour les thermocouples à 2 et 8 mm de profondeur. La température à 2 mm est légèrement plus élevée pour l'épicéa tout comme la température de surface (figure 4.28b). En revanche, les températures sont inférieures pour l'échantillon d'épicéa à partir de 8 mm. Cet écart peut

aller jusqu'à 200 °C après 15 minutes d'essai à 18 mm. Quant aux profils de température, ils sont quasiment identiques après 1 minute d'exposition. Cependant, après 10 minutes d'essai, la température est plus importante pour l'épicéa sur les 6 premiers millimètres. Au delà de cette profondeur, la température du hêtre est bien plus élevée avec des valeurs qui peuvent être 200 °C supérieures par rapport à celles de l'épicéa. Ces mesures peuvent expliquer la raison pour laquelle les MLRPUA sont plus élevés pour le hêtre. Les propriétés thermiques des deux essences de bois montrent que l'estimation du coefficient de diffusivité thermique est plus élevée de 35 % pour le hêtre ($1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'épicéa contre $1,35 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le hêtre). Ce paramètre peut donc expliquer les raisons d'une dégradation plus rapide du hêtre par rapport à l'épicéa.

4.5 Résumé

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre a été d'étudier en détail la dégradation du bois soumis au flux radiatif provenant d'un cône calorimètre. Pour cela, des mesures de perte de masse, de température de surface et de température à l'intérieur des échantillons ont été réalisées. Au total, 140 essais ont permis de mettre en évidence l'effet du flux imposé, de l'humidité des échantillons, de la concentration en oxygène sur la dégradation. La première section a montré que les échantillons d'épicéa peuvent fortement se dégrader malgré l'absence de l'inflammation, en particulier en raison de la combustion solide du bois qui conduit à une augmentation de la température de surface et dans le matériau. Si le flux imposé est suffisamment faible, il est possible d'observer la transition vers la combustion solide. Cette transition est mise en évidence avec toutes les techniques de mesure mises en place (balance, caméra infrarouge et thermocouples). Les conditions expérimentales d'humidité des échantillons influencent les résultats obtenus puisque pour tous les essais effectués, la présence d'eau dans les échantillons avait tendance à ralentir l'augmentation de la température dans le bois et donc la dégradation de celui-ci. Le flux imposé va également augmenter la dégradation des échantillons.

La présence d'oxygène pour initier et alimenter la combustion des échantillons a également été étudiée. Les résultats ont montré qu'une quantité d'oxygène inférieure à 6 % dans l'enceinte à atmosphère contrôlée, permet d'éviter l'activation de la combustion solide du matériau. Les grandeurs mesurées sont inférieures à celles sous air mettant ainsi en évidence la part non négligeable de la combustion solide sur la dégradation des échantillons. L'apport de chaleur due à la combustion solide a été estimée à une dizaine de $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (pour un flux incident de $16,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)

La deuxième section était consacrée à l'étude de la dégradation des échantillons avec inflammation. De manière générale, l'augmentation du flux a tendance à accélérer le processus de dégradation. Les mesures effectuées ont montré que le flux généré par la flamme était relativement faible. En conséquence, à l'échelle du cône et en orientation verticale, la flamme ne génère pas un flux suffisamment important pour conduire à une augmentation significative de la dégradation des échantillons.

Une grande attention a été également portée sur la mise en place de thermocouples sur

la mesure de la température dans le matériau. Les essais ont montré que la différence de température pouvait être de plusieurs centaines de degrés pour des mêmes conditions fixées en fonction du type d'implantation des thermocouples. L'orientation et la position exacte du thermocouple ou encore le contact entre le bois et le capteur sont des paramètres qui influencent les mesures. L'usinage spécifique des échantillons et la mise en place de thermocouples très fins ont été validés grâce à la mesure directe de la couche de charbon. La progression du front de charbon, pour un flux imposé, n'est pas linéaire puisqu'elle décroît en début d'expérience jusqu'à atteindre une valeur quasi constante. En revanche, la vitesse de carbonisation augmente linéairement, passant de $0,73 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour un flux de $16,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ à $1,4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour un flux de $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Chapitre 5

Étude de l'auto-extinction du bois

Sommaire

5.1	Passage d'un flux de chaleur élevé à un flux nul	119
5.2	Étude de l'auto-extinction avec le double cône coulissant pour un temps d'exposition fixé	121
5.2.1	Flux de chaleur conduisant à l'auto-extinction du bois	121
5.2.2	Temps d'auto-extinction	123
5.2.3	Température de surface et vitesse de perte en masse	124
5.3	Influence du temps d'exposition du premier flux de chaleur sur l'auto-extinction du bois	127
5.3.1	Flux de chaleur critique	127
5.3.2	MLRPUA critique	129
5.4	Influence de l'essence de bois sur l'auto-extinction	131
5.5	Résumé	134

L'étude de l'auto-extinction du bois est plutôt récente et suscite encore un grand nombre de questions quant aux conditions nécessaires la provoquant. Un dispositif dédié, basé sur deux cônes calorimètres disposés sur un système coulissant a été mis en place afin d'étudier ce phénomène au travers de critères tels que le flux critique, le MLRPUA critique ou encore la température de surface à l'extinction. Les flux ainsi que les temps d'exposition ont été variés de façon à observer l'impact de ces deux grandeurs sur l'auto-extinction de l'épicéa. Afin d'étudier l'effet de l'essence, des essais ont également été réalisés sur le hêtre.

5.1 Passage d'un flux de chaleur élevé à un flux nul

Une campagne expérimentale préliminaire a été menée afin d'étudier l'auto-extinction de l'épicéa. Le protocole consistait à exposer les échantillons à un flux suffisamment élevé (60 ou 82,5 kW.m⁻²), pour provoquer l'inflammation rapide de l'échantillon, puis à retirer instantanément ce flux en coulissant le cône. Des temps d'exposition de 5 minutes à une heure ont été appliqués. Pour cette étude, seuls le temps d'auto-extinction et le MLRPUA

ont été mesurés. La figure 5.1 présente les évolutions des MLRPUA pour un flux de chaleur imposé de 60 kW.m^{-2} et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pour les différents temps d'exposition étudiés.

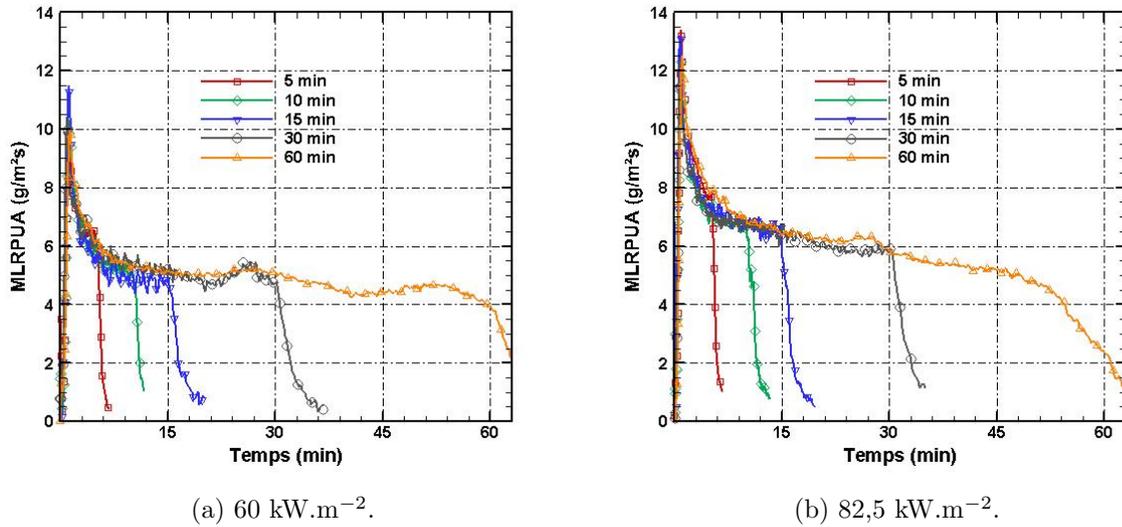


FIGURE 5.1 – Évolution des MLRPUA pour un flux appliqué de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 5, 10, 15, 30 et 60 minutes.

Les évolutions des MLRPUA ont déjà été décrites précédemment avec, en début d'expérience, un pic suivi d'un plateau à partir de 10 minutes d'essai, qui décroît légèrement tout au long du test. L'apparition de la flamme se produit à environ 15 secondes pour $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ et 35 secondes pour 60 kW.m^{-2} . Pour le test de 60 minutes à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, la diminution observée à partir de 50 minutes indique que l'échantillon est complètement dégradé, il n'y a plus de bois à brûler.

Le cône est, au moment souhaité, coulissé afin de ne plus agresser l'échantillon. Cela entraîne une chute rapide du MLRPUA. Le bois est considéré éteint lorsque la flamme a complètement disparu de la surface exposée. L'auto-extinction est rapide puisque le temps d'extinction varie entre 10 et 40 secondes quel que soit le temps d'exposition au flux de chaleur imposé. Pour chaque test, le MLRPUA correspondant au moment où la flamme disparaît est relevé. Le tableau 5.1 présente les MLRPUA à l'extinction pour les tests effectués à 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ à différents temps d'exposition.

TABLEAU 5.1 – MLRPUA à l'auto-extinction pour des flux de 60 et $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ en fonction du temps d'exposition.

Flux de chaleur (kW.m^{-2})	MLRPUA à l'auto-extinction ($\text{g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)				
	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
82,5	7,3	4,97	4,9	4,94	3
60	5,9	4,94	4,88	4,7	3,7

De manière générale, le taux de perte de masse critique diminue lorsque l'exposition au flux de chaleur augmente. Ces valeurs sont plus élevées lorsque l'exposition temporelle est plus faible, car il s'agit d'un état transitoire (pic de MLRPUA) où la couche de charbon

commence tout juste à se former. Après 5 minutes d'exposition, le régime n'est pas encore établi et le MLRPUA critique est d'autant plus élevé que le flux incident est important. De 10 à 30 minutes, en régime permanent, le MLRPUA critique est sensiblement le même quel que soit le flux thermique imposé. Il est estimé à $4,89 \pm 0,13 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, en bon accord avec Emberley *et al.* [113]. Cependant, après une heure d'exposition à $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$, la plupart des tests étaient déjà éteints après le retrait du cône comme expliqué ci-dessus. Pour ceux où la flamme subsistait, le MLRPUA critique est inférieur aux autres temps d'exposition car le bois vierge résiduel est d'autant plus protégé que la couche de charbon est épaisse.

Une campagne supplémentaire a été effectuée dans le but d'étudier la possible ré-inflammation du bois. L'expérience consistait à exposer les échantillons face à un flux de chaleur conduisant à l'auto-inflammation pendant 5 ou 10 minutes. Après ce temps, le cône a été coulissé pendant 2 minutes et le temps d'extinction était enregistré. Ce processus était répété trois fois pour chaque échantillon avec le même flux de chaleur. Cette étude est présentée dans la référence [140].

5.2 Étude de l'auto-extinction avec le double cône coulissant pour un temps d'exposition fixé

L'étude menée précédemment a mis en évidence l'impact du temps d'exposition sur le MLRPUA à l'extinction. Ces essais ont également montré que lorsque le bois n'est plus sollicité thermiquement par le cône, le temps d'extinction est très court et la dégradation s'interrompt rapidement. Cette expérience ne permet cependant pas de déterminer la sollicitation thermique critique permettant d'entretenir ou non la flamme générée par l'échantillon. En conséquence, le dispositif dédié décrit en section 2.2.1, consistant à coulisser deux cônes avec deux flux différents a été mis en place. Le protocole est organisé de façon à exposer un échantillon de bois pendant un temps prescrit à un premier flux de chaleur permettant l'auto-inflammation ($60, 82,5$ ou $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$) provenant du premier cône. À la fin du temps imparti, le second cône est coulissé de façon à exposer l'échantillon à un flux de chaleur moins élevé (de $38,5$ à 60 kW.m^{-2}).

5.2.1 Flux de chaleur conduisant à l'auto-extinction du bois

Comme expliqué précédemment, l'échantillon a été exposé à un premier flux de chaleur élevé permettant l'auto-inflammation pendant 15 minutes avant de coulisser le second cône devant l'échantillon. Ce temps a été fixé de sorte à s'assurer que le régime établi était atteint avant de basculer au second flux. Le tableau C.1 présente les résultats obtenus pour 95 tests effectués sur l'épicéa en fonction des flux imposés. Les valeurs en % présentent la proportion d'auto-extinction des échantillons en fonction de la paire de flux imposés.

Ce tableau montre une augmentation du flux de chaleur maximale nécessaire pour que l'auto-extinction se produise lorsque le premier flux de chaleur augmente. Par exemple,

TABLEAU 5.2 – Étude de l'extinction de l'épicéa sur 95 tests pour une exposition de 15 minutes. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
60	-	√ √ √ : 0 %	√ √ √ : 0 %
55	-	-	√ √ √ : 0 %
52	-	√ √ √ √ √ √ √ √ : 0 %	√ √ √ √ √ √ √ † † : 25 %
49,5	√ √ √ √ √ : 0 %	† † † √ √ √ √ √ : 37,5 %	† † † † † √ √ √ : 62,5 %
47	√ √ √ √ √ √ √ † : 12,5 %	† † † † † † √ √ : 75%	† † † † † † † † : 100 %
44	† † † † † † √ √ : 75 %	† † † † : 100 %	-
41	† † † † † † † † : 100 %	-	-
38,5	† † † : 100 %	† † † † : 100 %	-

pour 60 et 93,5 kW.m^{-2} , il faut passer respectivement à 41 et 47 kW.m^{-2} pour obtenir une auto-extinction systématique. Ce résultat est plutôt logique puisque pour un même temps d'exposition, la dégradation sera d'autant plus importante que le flux est élevé. Par conséquent, le flux de chaleur nécessaire pour dégrader le bois vierge restant et libérer suffisamment de gaz de pyrolyse pour maintenir la flamme doit être plus élevé. Cependant, près du flux de chaleur critique, l'auto-extinction du bois n'est pas systématique pour chaque essai. L'explication peut provenir de l'état de surface de l'échantillon dégradé. En effet, le maintien de la flamme est assuré par une quantité suffisante de gaz de pyrolyse sortant de la surface après avoir traversée la couche de charbon. Cette libération de gaz est pilotée par le flux thermique imposé et en quelque sorte par la taille des fissures. Par conséquent, lorsque le flux thermique imposé se situe à la limite entre l'auto-extinction du bois et le maintien de la flamme, la taille des fissures aura un rôle déterminant dans l'extinction de la flamme. La figure 5.2 présente des clichés de surface de deux échantillons.

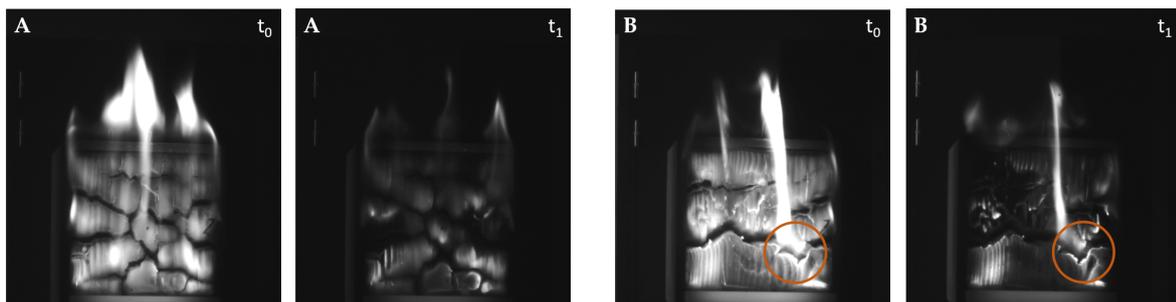


FIGURE 5.2 – Photos de deux échantillons de bois (A et B) après 15 minutes d'exposition à 93,5 kW.m^{-2} . t_0 : moment où le flux de chaleur est retiré, t_1 : 20 s après t_0 .

Pour un même protocole expérimental, les images montrent la différence au niveau de la surface de l'échantillon. L'échantillon B présente une grande fissure (environ 1,5 cm avec le cercle orange) grâce à laquelle la flamme se maintient, augmentant ainsi le délai d'extinction. Cette formation de fissures ne peut être contrôlée et explique en partie pourquoi l'auto-extinction n'est pas systématique pour une combinaison de flux de chaleur identique.

En conséquence, une approche statistique a été adoptée afin de déterminer le flux critique d'auto-extinction. Les résultats sont présentés sur la figure 5.3 comme la proportion des cas où une extinction de flamme a été observée en fonction du second flux de chaleur. Les mesures (symboles) ainsi que les interpolations "shape preserving"¹ (lignes en pointillés) sont affichées. Le flux thermique critique est défini comme la valeur en dessous de laquelle plus de 50 % d'extinction de flamme (en utilisant la courbe d'interpolation) est observée. Ce flux thermique critique est égal à 44, 48,5 et 50,5 kW.m⁻² pour respectivement un premier flux de chaleur égal à 60, 82,5 et 93,5 kW.m⁻².

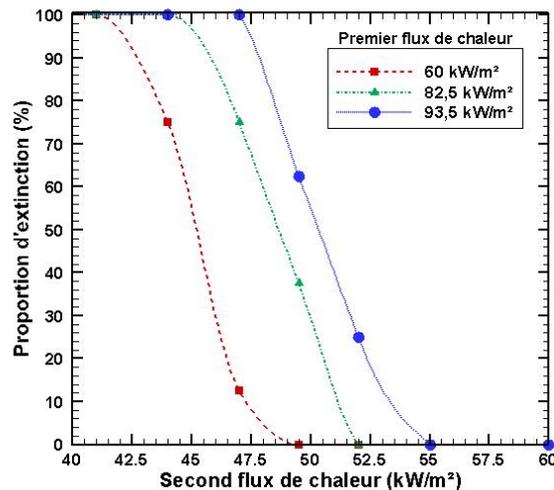


FIGURE 5.3 – Pourcentage d'extinction de flamme en fonction du flux de chaleur appliqué à l'échantillon lors de la deuxième étape (pour différents flux de chaleur appliqués lors de la première étape).

5.2.2 Temps d'auto-extinction

Pour chaque essai, le temps d'extinction, correspondant au moment où la flamme visible disparaît complètement, a été mesuré. Le tableau 5.3 donne le délai moyen d'extinction observé pour tous les cas testés.

Logiquement, pour un premier flux donné, c'est-à-dire pour une colonne donnée du tableau, plus le second flux est faible, plus le délai moyen d'extinction est court. En effet, plus le flux de chaleur est faible, plus le MLRPUA diminue rapidement sous une valeur critique de libération de gaz de pyrolyse permettant le maintien de la flamme. Dans tous les cas, le délai moyen d'extinction n'a pas dépassé 120 secondes après avoir coulissé les cônes.

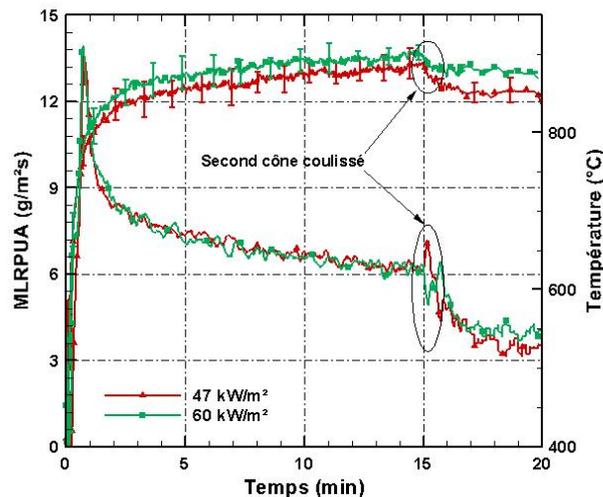
1. Piecewise cubic Hermite interpolation réalisée sous matlab®

TABLEAU 5.3 – Délai moyen d'extinction lorsque l'auto-extinction se produit en fonction des flux de chaleur exposés († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
52	-	-	† : 110±10
49,5	-	† : 93 ±9	† : 98±10
47	† : 100	† : 82±27	† : 89±26
44	† : 92±23	† : 57±12	-
41	† : 58±16	-	-
38,5	† : 36±4	† : 55±9	-

5.2.3 Température de surface et vitesse de perte en masse

La figure 5.4 présente les évolutions moyennes de la température de surface (barres d'erreurs correspondant aux écarts types obtenus à partir de trois tests) pour les deux cas présentés dans la section précédente, soit un premier flux thermique de 93,5 kW.m⁻² pendant 15 min suivi d'un second flux de chaleur égal à 47 ou 60 kW.m⁻².


 FIGURE 5.4 – Température de surface et MLRPUA pour un premier flux de chaleur de 93,5 kW.m⁻² imposé pendant 15 min, suivi d'un second flux (60 et 47 kW.m⁻²) imposé pendant 5 min.

La température de surface augmente rapidement au début, suivie d'une croissance progressive jusqu'à 900 °C. Après 15 minutes, l'échantillon est exposé au deuxième cône avec un flux de chaleur inférieur. La température de surface commence alors à diminuer et, selon le second flux de chaleur appliqué, une nouvelle température d'équilibre est atteinte. Parallèlement, une diminution du MLRPUA est également observée après coulissement des cônes qui tend rapidement (après une centaine de secondes) vers une valeur constante autour de 4 g.m⁻²s⁻¹. Lorsque le second flux de chaleur appliqué est de 60 kW.m⁻², il y a maintien de la flamme tandis que l'auto-extinction se produit pour 47 kW.m⁻² avec un

MLRPUA à l'extinction de $3,8 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Lorsque l'auto-extinction du bois se produit, la valeur du MLRPUA ne s'annule pas puisque la combustion du charbon et la dégradation du bois en profondeur se poursuivent. Il est d'ores et déjà possible d'observer que la limite au niveau du MLRPUA entre auto-extinction ou non est très fine.

Température de surface au moment de l'auto-extinction

La figure 5.5 présente les champs de température obtenus à différents temps pour un premier flux de chaleur de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ (pendant 900 secondes) suivi d'un second à 44 kW.m^{-2} après le coulisement. Ces clichés ont été obtenus à l'aide la caméra infrarouge équipée du filtre à $3,9 \mu\text{m}$. Pour le post-traitement en température, l'émissivité a été fixée à 0,95.

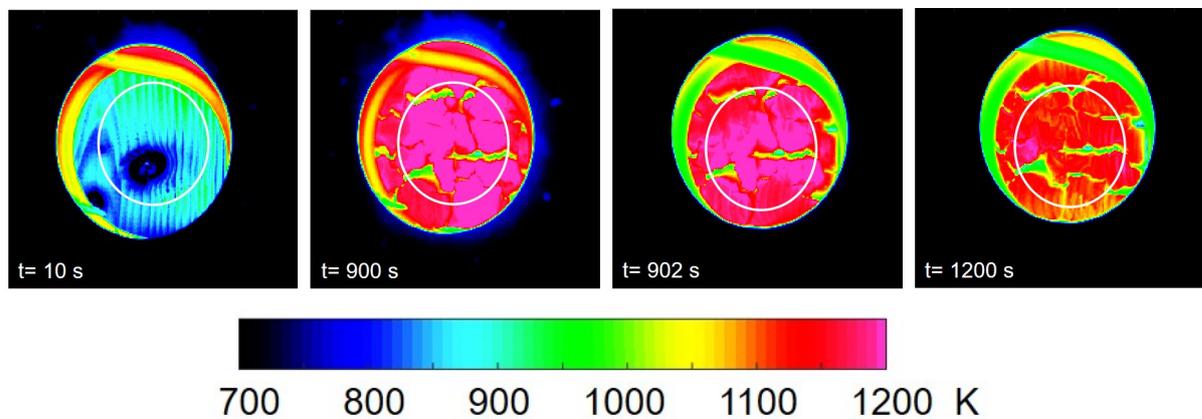


FIGURE 5.5 – Champ de température en Kelvin et zone étudiée (cercle blanc) à différents temps d'exposition pour deux flux de chaleur différents ($82,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 900 s et 44 kW.m^{-2} de 902 s à 1200 s).

Le cercle blanc correspond à la zone étudiée, où la température de surface moyenne a été calculée. Le champ de température en surface est assez homogène, à l'exception des températures estimées dans les fissures. La différence de température de consigne entre les deux cônes est bien perceptible entre les images prise à 900 et 902 secondes (notamment au niveau de la spire en zone haute de l'image). Pour cet essai, l'extinction de la flamme s'est produite environ 60 secondes après le changement du flux. À noter que la température de surface de l'échantillon est restée assez élevée ($\pm 1150 \text{ K}$) longtemps après l'extinction de la flamme, en raison du flux de chaleur apporté à l'échantillon par le cône et de la chaleur supplémentaire due à la combustion solide de l'échantillon [32; 41].

Les températures de surface atteintes après le coulisement du cône sont rassemblées dans le tableau 5.4 (95 tests au total). Ces températures de surface correspondent à une valeur moyenne (sur 245 secondes) prise 30 secondes après avoir coulisé le cône.

Les températures de surface relevées à l'extinction sont assez élevées, autour de $800 \text{ }^\circ\text{C}$, mais aucune tendance significative ne semble se dégager. La température de surface au moment de l'auto-extinction est aux alentours de 780 , 835 et $845 \text{ }^\circ\text{C}$ (moyenne sur les températures de surface pour lesquelles l'extinction s'est produite) pour des flux de 60 ,

TABLEAU 5.4 – Température de surface (°C) à l'auto-extinction en fonction des flux imposés († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
60	-	√ : 874±3	√ : 879±1
55	-	-	√ : 862±11
52	-	√ : 854±10	† : 850; √ : 866±6
49,5	√ : 805±18	† : 843±4; √ : 849±8	† : 837±9; √ : 853± 7
47	† : 792 √ : 792±7	† : 833±6; √ : 845±3	† : 841±31
44	† : 763±24; √ : 786±16	† : 840±11	-
41	† : 776±9	-	-
38,5	† : 789±4	† : 820±13	-

82,5 et 93,5 kW.m⁻². Pour une paire de flux de chaleur, il est également possible de noter que la température de surface est, dans la plupart des cas, inférieure lorsque l'échantillon s'auto-éteint. Il apparaît que la température de surface à l'extinction ne constitue pas un véritable critère simple à mettre en avant dans l'étude de l'auto-extinction du bois.

Vitesse de perte en masse conduisant à l'auto-extinction

Les résultats présentés ci-dessous se focalisent tout particulièrement sur la détermination d'une valeur seuil du MLRPUA conduisant ou non à l'auto-extinction du bois. Pour cela, des valeurs de MLRPUA moyennées ont été déduites pour chaque paire de flux de chaleur appliquée. Pour chaque test, la moyenne du MLRPUA est réalisée sur 250 secondes après coulissement des cônes. Cette moyenne débute 30 secondes après l'exposition au second flux de chaleur, lorsque la perte en masse est à nouveau constante. La figure 5.6 présente les valeurs de MLRPUA après le coulissement du second cône en fonction du flux appliqué.

Sur cette figure, les tests pour lesquels l'auto-extinction s'est produite sont représentés par des symboles pleins, alors qu'ils sont représentés par des symboles vides lorsque l'extinction n'a pas eu lieu. Une valeur critique de MLRPUA peut être déterminée autour de 4 g.m⁻²s⁻¹. En effet, l'extinction de la flamme s'est produite presque à chaque fois que le MLRPUA était en dessous de cette valeur critique, et presque jamais au-dessus. Ce MLRPUA critique est cohérent avec ceux obtenus par Emberley *et al.* [121; 113] et légèrement supérieur à ceux rapportés par Bartlett *et al.* [118]. En dessous de cette valeur, le processus de dégradation et le MLRPUA sont trop faibles pour libérer suffisamment de gaz de pyrolyse pour maintenir la flamme. Il est à noter que cette valeur est la même quel que soit le premier flux exposé. Cependant, les deux figures précédentes révèlent que la plage de MLRPUA entre auto-extinction ou non est très étroite.

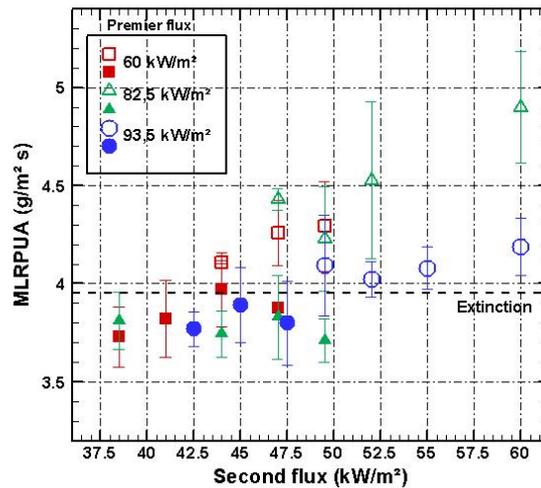


FIGURE 5.6 – Détermination d'un MLRPUA moyen mesuré après le coulisement du cône pour 15 minutes d'essai (symboles vides : pas d'extinction de flamme, symboles pleins : extinction de flamme).

5.3 Influence du temps d'exposition du premier flux de chaleur sur l'auto-extinction du bois

5.3.1 Flux de chaleur critique

Les mesures présentées jusqu'à présent correspondent à des tests réalisés pour un unique temps d'exposition (égal à 15 minutes). Cependant, le temps d'exposition peut affecter les paramètres déterminés, en particulier au début d'essai, lorsque la dégradation du bois est transitoire (pic de MLRPUA par exemple). Par conséquent, la même série de tests a été réalisée avec trois autres temps d'exposition au premier flux : 6 (38 tests), 9 (38 tests) et 18 (38 tests) minutes. Après ce temps, un second flux de chaleur plus faible est appliqué. Les paramètres comme le MLRPUA ou le flux de chaleur pour l'auto-extinction du bois sont étudiés. Les tableaux en annexes D.3, D.4 et D.5 regroupent les essais effectués sur l'épicéa pour lesquels l'auto-extinction s'est produite ou non en fonction des flux thermiques imposés.

Le temps d'extinction est également compris entre 30 et 120 secondes comme présenté dans le tableau 5.3. L'auto-extinction survient d'autant plus rapidement que le second flux de chaleur est faible. Cela montre que le délai d'extinction dépend davantage des valeurs de flux de chaleur appliquées que du temps d'exposition au premier cône. Comme pour les tests de la section 5.2.3, l'auto-extinction n'est pas systématique pour un second flux thermique imposé. La figure 5.7 montre la fréquence d'auto-extinction de la flamme en fonction du temps d'exposition (la proportion d'extinction pour $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ est disponible en figure D.24 du livret).

Le flux de chaleur pour l'auto-extinction est défini comme précédemment, c'est-à-dire le flux de chaleur pour lequel la probabilité d'extinction est supérieure à 50 % (valeur

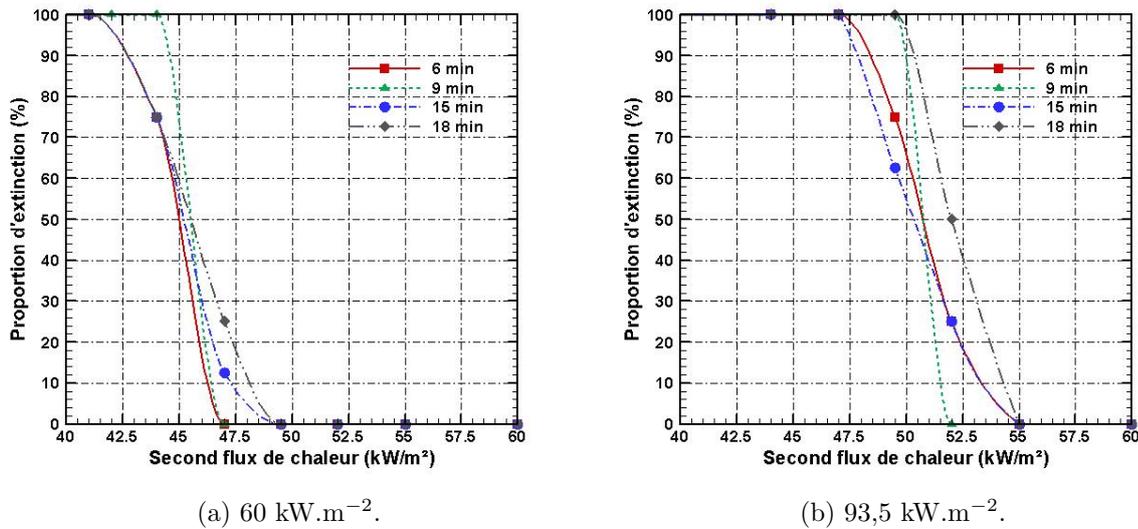


FIGURE 5.7 – Pourcentage d’extinction de la flamme en fonction du temps d’exposition et du flux thermique appliqué à l’échantillon lors de la deuxième étape.

obtenue à partir de la courbe d’interpolation). Comme évoqué précédemment, le flux de chaleur nécessaire pour maintenir la flamme augmente avec le premier flux de chaleur appliqué. Par exemple, pour une durée d’exposition de 6 minutes, le flux de chaleur pour une fréquence d’extinction de flamme de 50 % est égal à 45, 49,5 et 50,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour un premier flux de chaleur respectivement de 60, 82,5 et 93,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Cependant, les flux thermiques critiques menant à l’auto-extinction sont quasiment identiques quel que soit le temps d’exposition au premier flux thermique. En effet, pour un flux de chaleur élevé, le flux critique d’auto-extinction varie sur une plage de 2 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour des durées d’exposition allant de 6 à 18 minutes. Cela signifie que multiplier par trois le temps d’exposition et donc a priori augmenter considérablement l’épaisseur du charbon ne modifie pas le flux de chaleur pour auto-éteindre les échantillons de bois.

Ce résultat semble contre intuitif. En effet, on s’attend à une croissance de l’épaisseur de charbon avec le temps et donc à un flux critique d’extinction plus élevé en raison du rôle barrière du charbon. Chaque échantillon de bois a donc été coupé en son milieu, après les tests, pour mesurer l’épaisseur de la couche de charbon et déterminer comment celle-ci varie avec le flux et le temps d’exposition. La figure 5.8 présente l’épaisseur de charbon en fonction du flux d’auto-extinction et du temps d’exposition.

On constate que le temps d’exposition n’augmente pas significativement l’épaisseur de la couche de charbon du moins lorsque l’état stationnaire est atteint. Il s’avère que pour l’épicéa, la régression de la surface due à la consommation de la couche de charbon par combustion correspond à la vitesse de propagation du front de charbon. En effet, pour 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, l’épaisseur de charbon passe de 9,7 mm pour 6 minutes d’exposition à 11 mm pour 18 minutes d’exposition. C’est pourquoi le flux thermique critique pour l’auto-extinction du bois reste presque constant quel que soit le temps d’exposition. Cette observation est comparable pour chaque flux de chaleur (60, 82,5 et 93,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) et

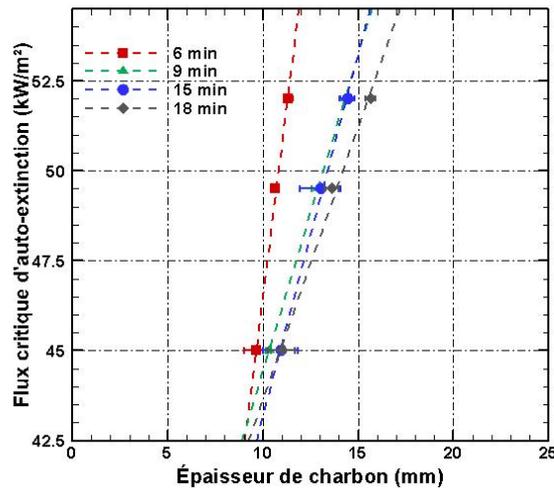


FIGURE 5.8 – Épaisseur de charbon en fonction du flux de chaleur conduisant à l'auto-extinction de la flamme (pour différents flux de chaleur appliqués pendant la première étape et les temps d'exposition).

montre que l'auto-extinction du bois est sensible au premier flux de chaleur à partir du moment où l'état de dégradation devient stationnaire. En revanche, l'évolution différente de la courbe à 6 minutes montre qu'il existe tout de même une dépendance temporelle lorsque la dégradation du bois est encore transitoire. D'autre part, cet état stationnaire dépendrait du premier flux de chaleur et expliquerait pourquoi le flux de chaleur critique pour l'auto-extinction augmente avec le premier flux de chaleur imposé.

5.3.2 MLRPUA critique

La figure 5.9 présente les MLRPUA en fonction du second flux appliqué permettant la détermination du MLRPUA critique d'auto-extinction en fonction du temps d'exposition (un temps d'exposition supplémentaire est ajouté en figure D.25 du livret).

Le MLRPUA critique est le même quel que soit le temps d'exposition. En effet, lorsque le temps d'exposition est multiplié par trois, le MLRPUA pour l'auto-extinction est constant, toujours autour de $4 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. L'extinction de la flamme ne se produit pas si le MLRPUA reste significativement au-dessus de cette valeur. Cela signifie que la quantité de gaz de pyrolyse libérée quel que soit le flux de chaleur et le temps d'exposition est suffisante pour maintenir la flamme. Les figures 5.6 et 5.9 montrent que le MLRPUA critique pour l'auto-extinction est indépendant du temps d'exposition mais également des flux de chaleur appliqués. Par conséquent, toutes les données de MLRPUA pendant les tests sont traitées pour déterminer un MLRPUA critique d'auto-extinction indépendamment des flux de chaleur et des temps d'exposition. La figure 5.10 montre le nombre de tests réalisés (173 au total) et la fréquence d'extinction des flammes selon le MLRPUA.

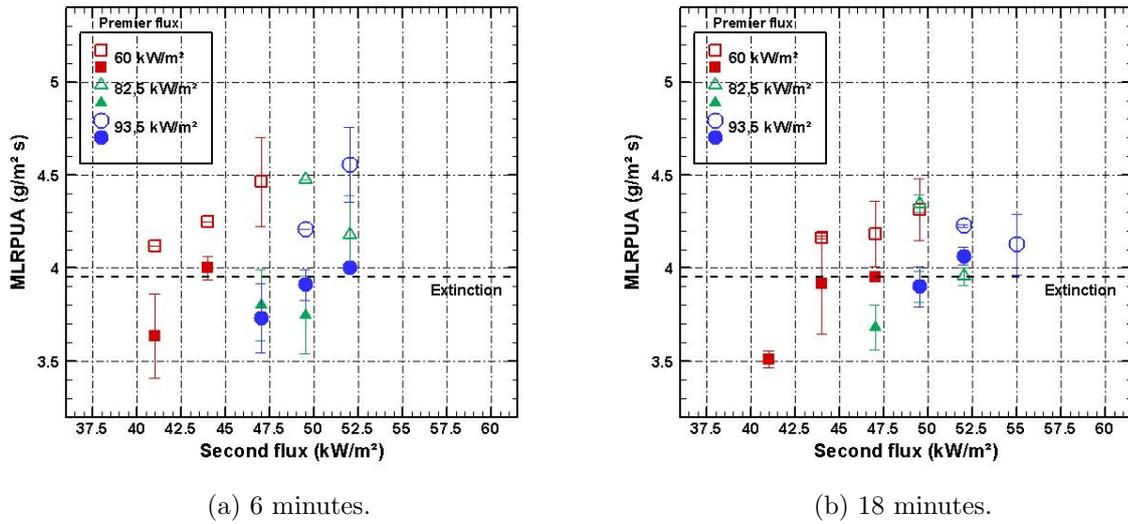
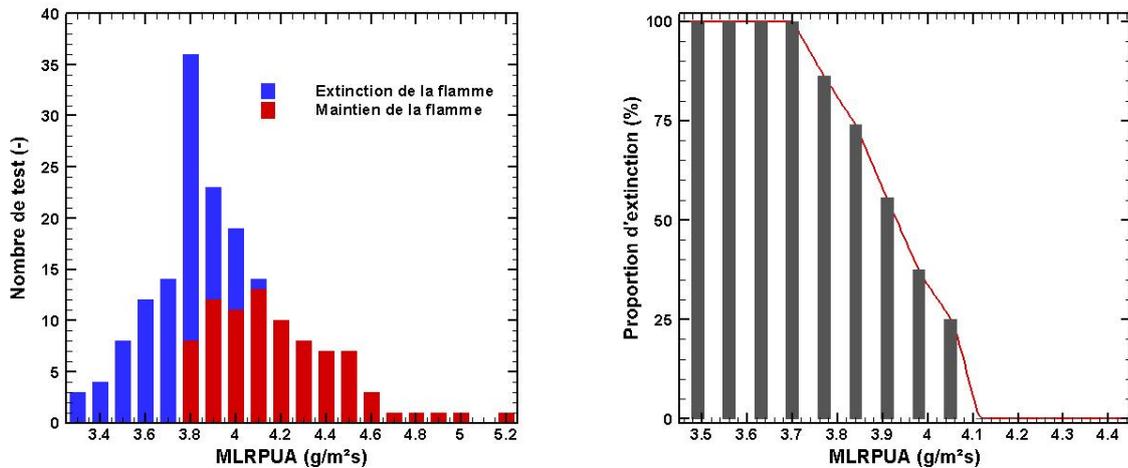


FIGURE 5.9 – MLRPUA mesuré après le coulisement du cône (marques vides : pas d'extinction de flamme, marques pleines : extinction de flamme) pour deux temps d'exposition (6 et 18 minutes).



(a) Nombre de test en fonction de la valeur du MLR- (b) Proportion d'extinction en fonction des valeurs PUA d'extinction. critique de MLRPUA.

FIGURE 5.10 – Proportion d'extinction de la flamme et nombre de tests réalisés en fonction du MLRPUA enregistré pour chaque essai (173 essais).

En ce qui concerne l'occurrence des tests, l'entretien de la flamme peut se produire à partir de $3,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. La valeur du MLRPUA pour l'auto-extinction est comprise entre $3,8$ et $4,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Le MLRPUA critique pour l'auto-extinction est considéré comme le MLRPUA en dessous duquel la probabilité d'auto-extinction est supérieure à 50 %. Cette valeur est égale à $3,95 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ quels que soient les flux de chaleur et les temps d'exposition appliqués aux échantillons de bois.

5.4 Influence de l'essence de bois sur l'auto-extinction

Les échantillons de hêtre ont surtout été choisis dans le but de comparer les résultats obtenus pour les échantillons d'épicéa lors de l'auto-extinction. Les chapitres consacrés à l'auto-inflammation et la dégradation ont montré que les résultats étaient impactés par l'essence de bois étudiée. Emberley *et al.* [113] ont montré dans une campagne expérimentale dédiée à l'auto-extinction du bois que l'essence était d'ailleurs un des principaux facteurs de dispersion des résultats sur le flux critique d'auto-extinction par exemple. La campagne expérimentale menée pour cette essence contient moins de tests que pour l'épicéa (55 tests pour le hêtre contre 207 pour l'épicéa). Les échantillons de hêtre ont été exposés à deux flux de chaleur à savoir 60 et 82,5 kW.m⁻² pendant 90 secondes, 9 et 15 minutes. Les matrices d'essai effectuées sur le hêtre ainsi que les résultats obtenus en fonction des flux de chaleur appliqués sont présentés en dans le livret (tableaux D.6, D.7 et D.8). La figure 5.11 présente le pourcentage d'extinction des échantillons de hêtre en fonction du temps d'exposition et du second flux de chaleur appliqué.

Dans le cas du hêtre, le temps d'exposition au premier flux de chaleur, ici 82,5 kW.m⁻², influence le flux critique d'extinction. En considérant le flux critique d'extinction étant celui pour lequel la proportion de maintien de la flamme est de 50 %, alors ce flux critique augmente avec le temps d'exposition. En effet, celui-ci passe de 38,5 à 47 kW.m⁻² lorsque le temps d'exposition passe de 9 à 15 minutes. Les essais réalisés avec un temps d'exposition de 90 secondes n'ont pas conduit à l'extinction du hêtre. Le second flux de chaleur minimal appliqué était de 33 kW.m⁻², signifiant que le flux critique d'auto-extinction pour ce temps court se situe à une valeur inférieure à 33 kW.m⁻².

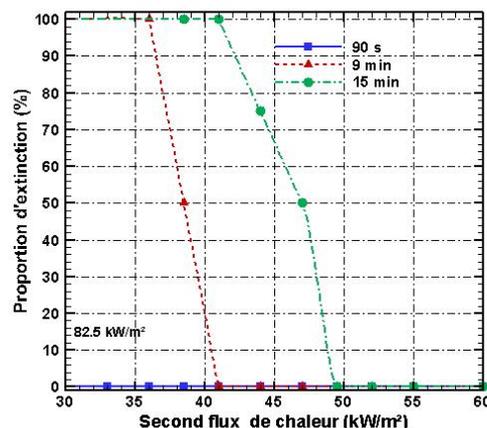
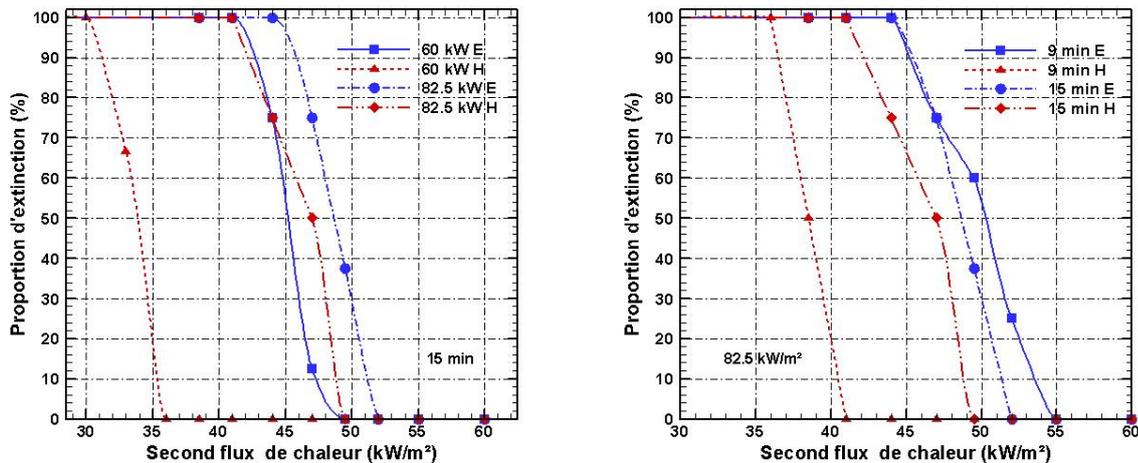


FIGURE 5.11 – Pourcentage d'extinction de la flamme en fonction du temps d'exposition et du flux thermique appliqué à l'échantillon lors de la deuxième étape (55 tests) pour un premier flux de 82,5 kW.m⁻².

La figure 5.12a compare le pourcentage d'extinction en fonction des flux appliqués ainsi que de l'essence de bois. Le temps d'exposition au premier flux est fixé à 15 minutes.

Le flux critique d'extinction dépend du premier flux de chaleur imposé ainsi que de l'essence de bois. Pour une exposition de 15 minutes à 82,5 kW.m⁻², le flux critique



(a) Pourcentage d'extinction en fonction du flux imposé (60 et 82,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) pour un temps d'exposition de 15 minutes. (b) Pourcentage d'extinction en fonction du temps d'exposition (9 et 15 minutes) pour un flux de 82,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

FIGURE 5.12 – Comparaison du pourcentage d'extinction de la flamme en fonction de l'essence de bois (E : épicéa et H : hêtre), du premier flux appliqué et du temps d'exposition.

d'extinction est quasiment identique avec une valeur de 44 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour l'épicéa et 47 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le hêtre. En revanche pour un premier flux appliqué de 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, le flux critique d'extinction du hêtre est très inférieur, de 14 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, par rapport à celui de l'épicéa. Cette observation montre que l'auto-extinction des échantillons dépend à la fois du flux de chaleur appliqué, de l'essence de bois et du temps d'exposition. La figure 5.12b compare le pourcentage d'extinction en fonction du temps d'exposition (9 ou 15 minutes) ainsi que de l'essence de bois. Le flux appliqué ici est de 82,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Cette fois-ci, les courbes montrent que le temps d'exposition influence nettement l'extinction du hêtre contrairement à l'épicéa. En effet, les résultats présentés en section 5.3, montrent que le temps d'exposition était indépendant du flux critique d'extinction pour l'épicéa. Concernant le hêtre, le flux critique d'extinction passe de 38,5 à 47 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour une exposition de 9 et 15 minutes respectivement. Cette seconde campagne expérimentale, variant l'essence de bois démontre que les conditions de flux et de temps d'exposition influencent le critère de flux critique d'extinction. La perte en masse a également été enregistrée afin de déduire le MLRPUA critique d'extinction. La figure 5.13 présente les valeurs de MLRPUA du hêtre après le coulisement du second cône en fonction du flux appliqué.

Le temps d'exposition au premier flux de chaleur est de 15 minutes (24 tests). Pour un même temps d'exposition, le MLRPUA critique d'extinction dépend fortement du premier flux de chaleur appliqué contrairement aux essais sur les échantillons d'épicéa. Cette limite se situe aux alentours de $5 \pm 0,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ pour un flux de 60 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et de $5,7 \pm 0,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ pour un flux de 82,5 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Les valeurs des MLRPUA critiques pour le hêtre sont supérieures à celles de l'épicéa (3,95 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ indépendamment du temps d'exposition et du flux appliqué). La variation des résultats obtenus selon l'essence de bois

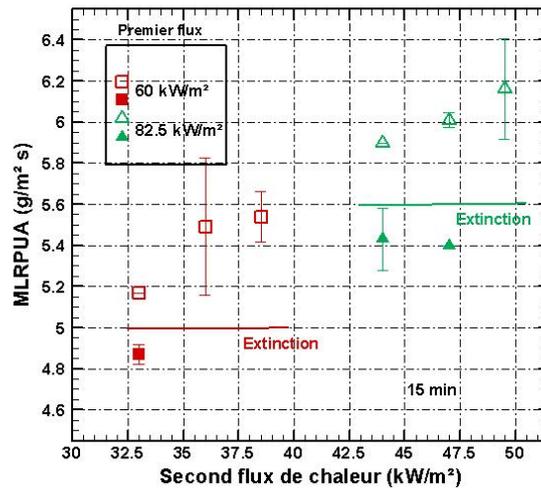


FIGURE 5.13 – Détermination du MLRPUA critique d'auto-extinction mesuré expérimentalement pour les échantillons de hêtre après le coulisement du cône (symboles vides : pas d'extinction de flamme, symboles pleins : extinction de flamme).

considérée met en évidence la complexité de l'étude de l'extinction du matériau bois. Ces différences peuvent provenir des fissures (profondeurs, tailles, nombre), de la composition des gaz de pyrolyse ou encore de la capacité du charbon à brûler. La figure 5.14 présente les MLRPUA en fonction du second flux appliqué et différents temps d'exposition. Le flux est fixé à $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et le temps d'exposition varie de 9 à 15 minutes.

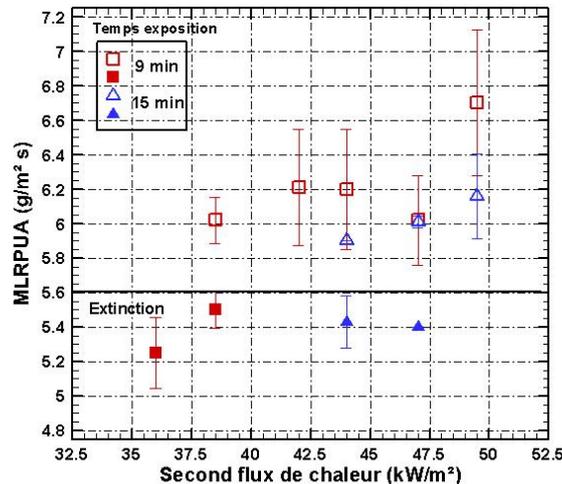


FIGURE 5.14 – MLRPUA mesuré pour les échantillons de hêtre après le coulisement du cône pour un flux appliqué de $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (symboles vides : pas d'extinction de flamme, symboles pleins : extinction de flamme).

Lorsque le flux de chaleur est identique, la limite de MLRPUA est la même quel que soit le temps d'exposition. Cette limite se situe à $5,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Au dessus de cette valeur, l'auto-extinction du bois ne se produit pas.

5.5 Résumé

L'auto-extinction du matériau bois est étudiée depuis seulement quelques années expérimentalement et la quantité de données est très limitée. Lors de ce travail, 257 essais ont permis d'étudier l'auto-extinction selon différents protocoles expérimentaux : retrait instantané du flux imposé, passage d'un flux élevé à un flux faible à l'aide de deux cônes, changement d'essence de bois. Ces protocoles ont une influence significative sur les résultats et donc sur des éventuels critères qui en découleraient et qui pourraient être utilisés dans l'ingénierie incendie. En effet, la première campagne expérimentale a montré qu'en retirant instantanément le flux imposé, la valeur du MLRPUA correspondant au temps d'extinction diminue avec le temps d'exposition. Un nouveau dispositif expérimental constitué de deux cônes sur un système coulissant a été mis en place pour la deuxième campagne expérimentale. Ce dispositif permet de déduire des critères précis de flux et de MLRPUA critiques à l'extinction de l'épicéa contrairement aux études menées jusqu'à présent qui utilisaient un cône unique en diminuant sa température de consigne pour remonter au flux critique d'extinction. L'auto-extinction du bois n'est pas systématique en particulier lorsque la paire de flux prescrite est proche du flux critique d'extinction. Ces différences peuvent être attribuées à l'aspect de la surface exposée au flux de chaleur. En effet, si la surface contient un nombre important de fissures de plus ou moins grande taille, alors la libération de gaz de pyrolyse à travers ces canaux permettra d'entretenir la flamme plus longtemps.

Dans ce chapitre, une approche statistique a été adoptée, impliquant un nombre important de tests, afin de déterminer des critères tel que le MLRPUA critique d'auto-extinction. Une valeur constante de $3,95 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a été obtenue pour les échantillons d'épicéa, quel que soit le temps d'exposition et le premier flux imposé. Le flux critique d'extinction dépend du premier flux imposé mais reste compris entre 45 et 52 kW.m^{-2} . En revanche, lorsque l'essence de bois change, le comportement des échantillons de bois concernant l'auto-extinction n'est plus le même. En effet, pour du hêtre, le temps d'exposition et le premier flux imposé influencent le MLRPUA et le flux critique d'auto-extinction. La différence peut atteindre 12 kW.m^{-2} pour deux flux différents à un temps fixé. Le MLRPUA varie également de 5 à $5,6 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour un temps d'exposition fixé mais pour deux flux différents. La part de charbon qui brûle semble expliquer la différence entre ces deux essences de bois. L'épicéa est un bois tendre avec une densité relativement faible et la dégradation complète du charbon est non négligeable contrairement au hêtre qui a une densité très élevée et une combustion de charbon qui est beaucoup plus faible que celle de l'épicéa.

Chapitre 6

Le changement d'échelle

Sommaire

6.1 Les panneaux radiants	135
6.1.1 Métrologie	136
6.1.2 Étude de l'auto-inflammation	136
6.1.3 Étude de la dégradation	140
6.2 Le SBI	145
6.3 Résumé	146

L'objectif de ces campagnes est d'étudier l'auto-inflammation et la dégradation de l'épicéa et d'en déduire des similitudes avec le changement d'échelle. Les partenariats avec différents laboratoires ont permis d'effectuer plus de cinquante essais à trois échelles supérieures à celle du cône calorimètre avec différentes agressions thermique. Ces essais sont : les panneaux radiants (partenariat avec le LERMAB), le mini-SBI (partenariat avec l'UMET) et le SBI (partenariat avec le CSTB). Les essais les plus pertinents, principalement présentés dans ce chapitre, sont les panneaux radiants puisque l'agression thermique est proche de celle du cône.

6.1 Les panneaux radiants

Des essais ont été effectués à plus grande échelle avec quatre panneaux radiants orientés verticalement, permettant de former une surface émettant du rayonnement d'environ 1 m^2 . Le dispositif expérimental ainsi que la métrologie ont été présentés en section 2.6. L'objectif de ces tests était de soumettre des échantillons d'épicéa à des flux équivalents à ceux étudiés à petite échelle (cône calorimètre) pour observer l'effet du changement d'échelle sur l'auto-inflammation et la dégradation du bois. Les mesures effectuées sont les mêmes que celles réalisées à l'échelle du cône (flux critique, température de surface, localisation et temps de l'apparition de la flamme, MLRPUA, température dans le matériau ou encore position du front de charbon). Les panneaux de bois mesurent $50 \text{ cm} \times 53 \text{ cm}$. Leur surface est donc 26,5 fois plus élevée que les échantillons utilisés pour les essais au cône (100 cm^2 pour le cône contre 2650 cm^2 pour les panneaux radiants).

6.1.1 Métrologie

Le dispositif expérimental a été présenté dans le chapitre 2, figure 2.11. Avant chaque essai, l'échantillon est protégé par une plaque de plâtre sur laquelle ont été fixées des plaques de laine de roche le temps que les panneaux radiants atteignent leur température de fonctionnement établi. Une balance de précision a été placée sous l'échantillon de façon à mesurer la perte en masse et en déduire la vitesse de perte en masse par unité de surface (MLRPUA). Les deux caméras rapides, visible et infrarouge, ont également été employées pour localiser l'apparition de la flamme. Trois échantillons ont été équipés de douze thermocouples noyés (usinage présenté en section 2.3.3) de façon à mesurer l'évolution de la température dans le matériau. La ligne de thermocouples se situe au centre de l'échantillon (à une hauteur de 25 cm) tout comme la soudure chaude entre les deux fils (à une largeur de 26,5 cm). Un de ces échantillons a été équipé d'une seconde ligne de thermocouples noyés, 10 cm au dessus de la première ligne. Le but est de mesurer l'évolution de la température 10 cm au dessus du centre de l'échantillon et de quantifier l'hétérogénéité de l'apport de chaleur supplémentaire par la flamme (celle-ci étant a priori plus épaisse en partie supérieure). Enfin, la caméra infrarouge FLIR a été utilisée pour la mesure de la température de surface. Elle a été placée derrière les panneaux radiants, qui ont dû être légèrement espacés afin de laisser entrevoir la surface de l'échantillon. La distance panneaux/échantillon et l'espacement entre les panneaux ont été préalablement déterminés, par un calcul de facteur de forme, pour obtenir un flux incident le plus homogène possible sur toute la surface de l'échantillon (les cartographies des flux à la paroi sont disponibles dans le livret en figure D.26). La distance entre les quatre panneaux a ainsi été variée de 4 à 25 cm en fonction du flux souhaité. Le tableau D.9 dans le livret des figures présente la distance panneaux/échantillon ainsi que l'espacement entre les quatre panneaux pour les différents flux retenus. Ces flux sont identiques à ceux de la petite échelle, à savoir 16,5, 38,5, 49,5 et 60 kW.m⁻² et ont été mesurés à l'aide d'un fluxmètre radiatif.

6.1.2 Étude de l'auto-inflammation

Lors des essais menés avec les panneaux radiants, tous les échantillons se sont enflammés dès 38,5 kW.m⁻² alors que l'inflammation n'a jamais été observée à ce flux lors des essais au cône. Le flux critique d'auto-inflammation est donc 11 kW.m⁻² inférieur à celui du cône (auto-inflammation des échantillons aux alentours de 49,5 kW.m⁻² à petite échelle). En revanche, l'épicéa ne s'est pas auto-enflammé pour un flux de 16,5 kW.m⁻² tout comme pour les échantillons à petite échelle exposés à ce même flux. Le flux critique d'auto-inflammation semble donc diminuer avec le changement d'échelle.

Temps et localisation de l'auto-inflammation

Pour chaque essai le temps d'auto-inflammation, t_{infl} , a été enregistré tout comme la localisation de l'apparition de la flamme avec les caméras rapides (visible et infrarouge).

Le tableau 6.1 compare les temps d'auto-inflammation entre les essais au cône et ceux aux panneaux radiants.

TABLEAU 6.1 – Temps d'auto-inflammation en fonction de l'échelle.

Flux (kW.m ⁻²)	Panneaux radiants		Cône	
	Tests	t_{infl} (s)	Tests	t_{infl} (s)
60	7	11 - 19	103	25 - 1200
49,5	7	51 - 94	10	3000
38,5	4	75 - 235	7	-

Les résultats indiquent que le temps d'auto-inflammation est fortement réduit lorsque l'échelle d'étude augmente (pour rappel, la figure 3.1 présente les temps d'auto-inflammation obtenus au cône). En effet, pour 60 kW.m⁻², à l'échelle intermédiaire, le temps d'inflammation est compris entre 11 et 19 secondes. À l'échelle du cône, ces temps d'inflammation correspondaient plus à ceux obtenus pour un flux de 82,5 kW.m⁻². Pour 49,5 kW.m⁻², le temps d'auto-inflammation moyen est supérieur à 3000 secondes pour la petite échelle contre 67 ± 12 secondes pour l'échelle intermédiaire. Enfin, le temps d'auto-inflammation à 38,5 kW.m⁻² est de 139 ± 62 secondes, ce qui reste un temps d'auto-inflammation relativement court par rapport aux temps d'inflammation qui ont déjà pu être enregistrés à l'échelle du cône. En revanche, le maintien de la flamme n'était pas continu tout au long des essais à 38,5 kW.m⁻² (extinction puis ré-inflammation).

Au total 15 essais ont pu être filmés avec les deux caméras rapides afin de localiser l'apparition de la flamme. Comme présenté en section 2.3.2, la caméra infrarouge rapide est équipée d'un filtre à 4,45 μm correspondant à une zone de forte émission du CO₂ chaud. Les films infrarouges ont montré que des gaz chauds, provenant des panneaux radiants, étaient présents en grande quantité dans l'espace entre l'élément chauffant et le combustible. Ces gaz chauds restent cependant à proximité des panneaux radiants (à moins de 5 cm de la surface des panneaux) et n'impactent pas l'échantillon. Lorsque l'auto-inflammation se produit à des temps longs, elle est toujours localisée au niveau de la surface comme illustré sur la figure D.27 du livret pour un test effectué à 38,5 kW.m⁻². La flamme est alors initiée par un point chaud solide (qui se détache légèrement de la surface sous l'effet de la chaleur) au niveau du centre de la surface exposée aux panneaux et qui enflamme les gaz de pyrolyse en provenance de l'échantillon. L'inflammation pour les 12 autres essais à 49,5 et 60 kW.m⁻² s'est produite à des temps courts. Contrairement à l'échelle du matériau, aucun cas d'inflammation n'a été provoqué directement par les panneaux radiants. Pour rappel, lors des essais au cône, des inflammations initiées par les spires chaudes du cône avaient été observées. Dans le cas présent, la distance échantillon/panneaux est beaucoup plus importante que la distance cône/échantillon et les gaz de pyrolyse n'impactent donc pas les panneaux ni la zone de flamme située à proximité. L'apparition de la flamme se situe donc toujours au niveau des gaz de pyrolyse comme pour la majeure partie des essais réalisés à petite échelle (lorsque l'auto-inflammation est à des temps d'inflammation courts). La figure 6.1 présente un exemple d'auto-inflammation à un temps court. L'échelle des Digital Levels varie d'une image à l'autre de façon à

être adaptée au mieux à chaque image.

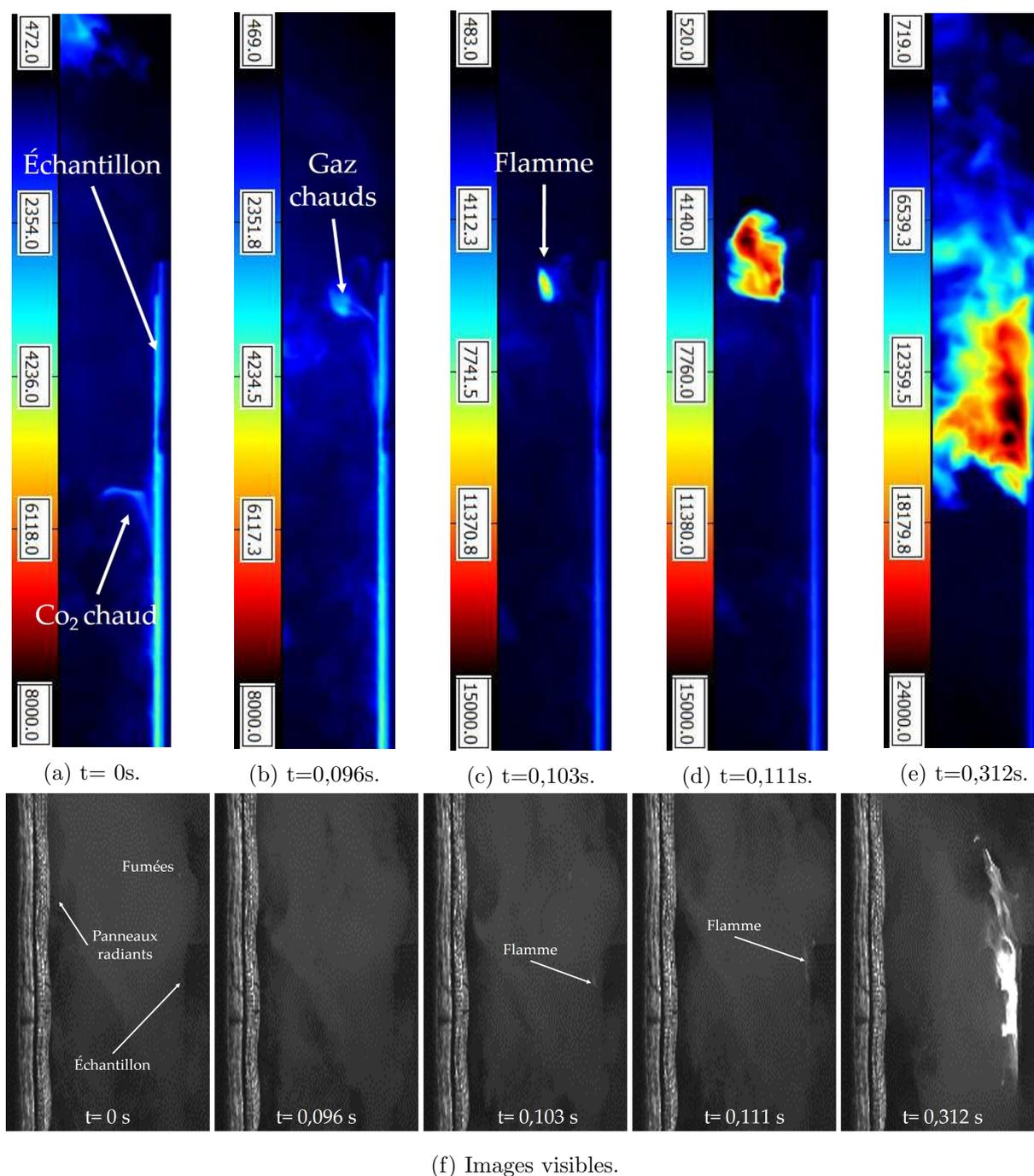


FIGURE 6.1 – Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde du CO_2 d'une auto-inflammation par les gaz éloignés de la surface exposée pour un flux de $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tout comme pour les essais à petite échelle, l'apparition de la flamme au niveau des gaz de pyrolyse éloignés de la surface exposée est initiée par une grande concentration de gaz chauds (détecté avec le filtre CO_2) qui s'échappe de la surface de l'échantillon. Cette quantité augmente continuellement en température, se mélange avec l'air en montant, puis, dès que les conditions de température et de mélange sont réunies, l'auto-inflammation se produit. Ce type d'auto-inflammation est identique pour les 11 autres essais. En revanche,

la localisation de l'inflammation est plus aléatoire qu'à petite échelle. En effet, lors des essais au cône, l'auto-inflammation dans les gaz à distance de la surface se situait en partie haute de l'échantillon. Lors des essais aux panneaux radiants, elle se produit aussi bien sur la partie haute, centrale ou basse, même si la région supérieure est privilégiée. L'inflammation étant un phénomène local et la surface de l'échantillon 28 fois plus importante que celle du cône, il apparaît logique que sa localisation soit plus dispersée même si le phénomène est identique (quantité importante de gaz chaud qui s'échappe de la surface puis qui s'enflamme dès que les conditions sont réunies). Le fait que la surface de l'échantillon à cette échelle soit bien plus grande qu'à l'échelle du cône explique également la raison pour laquelle une inflammation à un flux de $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ se produit (alors qu'elle n'a jamais été observée à l'échelle du cône). En effet, l'inflammation est un phénomène local qui doit rassembler un nombre important de conditions pour que la flamme apparaisse. Par exemple, les images obtenues par les caméras rapides montrent que l'inflammation se produisant à proximité de la surface est initiée par une esquille de bois qui atteint une température plus élevée que la température de surface moyenne ce qui permet l'auto-inflammation. Ce phénomène local à une probabilité plus élevée de se produire lorsque la surface de l'échantillon augmente.

Température de surface au moment de l'inflammation

La figure 6.2 présente la température de surface en fonction des temps d'inflammation pour 15 essais (60 kW.m^{-2} : 6 tests, $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$: 5 tests et $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$: 4 tests). L'émissivité des échantillons est toujours fixée à 0,9.

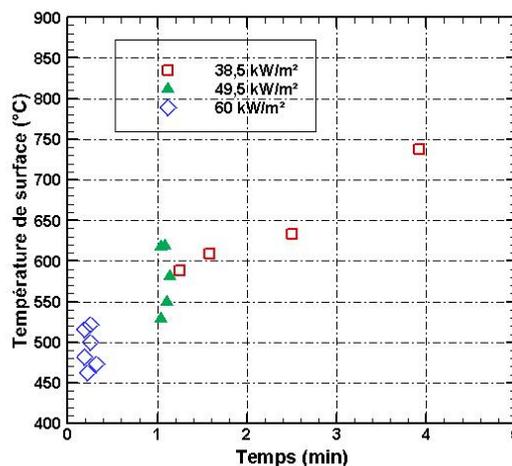


FIGURE 6.2 – Température de surface au moment de l'inflammation.

La température de surface à l'auto-inflammation des échantillons est là encore liée au temps d'auto-inflammation. En effet, plus ce temps est court et plus la température de surface correspondante sera faible. La température de surface à l'inflammation est comprise entre 462 et 619 °C pour des temps d'inflammation inférieurs à 2 minutes et entre 633 et 738 °C pour des temps supérieurs à 2 minutes. Ces valeurs restent en bon

accord avec les essais au cône puisque la température de surface à l'inflammation variait alors entre 462 et 660 °C pour des temps d'inflammation inférieurs à 2 minutes et entre 707 et 818 °C pour des temps supérieurs à 2 minutes.

6.1.3 Étude de la dégradation

Vitesse de perte en masse et température de surface

Les mesures des vitesses de perte en masse étaient très bruitées pendant les essais aux panneaux radiants. Ces essais étant menés en extérieur, l'effet du vent sur le porte échantillon est à l'origine de cette perturbation. Les MLRPUA obtenues après lissage par moyenne mobile sont présentées en figure D.28 du livret. Celles-ci demeurent assez bruitées. Un lissage complémentaire a donc été fait à la main. La figure 6.3 compare les évolutions des MLRPUA obtenus pour les deux échelles (cône et panneaux radiants).

De manière générale et pour un flux imposé identique, les résultats à l'échelle intermédiaire (panneaux radiants) sont plus élevés par rapport au cône, en particulier les températures de surface. Le MLRPUA et la température de surface sont présentés en figure 6.3a pour un flux de $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pour lequel l'inflammation ne se produit pas. On remarque que la transition vers la combustion du charbon est également observée à cette échelle. Cette transition se situe à des temps (20 minutes), des températures de surface et des MLRPUA similaires pour les deux échelles. Le plateau de température de surface (600 °C pour le cône et 650 °C pour les panneaux radiants) et de MLRPUA ($2,5$ et $3 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour le cône et les panneaux radiants respectivement) sont équivalents même si ces valeurs sont légèrement plus élevées pour l'échelle intermédiaire.

Pour les flux plus élevés, pour lesquels l'inflammation survient, le MLRPUA est plus élevé à l'échelle des panneaux radiants qu'à l'échelle du cône, en particulier pour le pic de MLR qui atteint une valeur 50 à 100 % plus grande. En régime établi, l'écart se réduit significativement et un excès de 20 à 25 % est observé. Cet écart est relativement modéré comparé au changement d'échelle effectué puisque la surface a elle été multipliée par plus de 25. La normalisation du MLRPUA par la surface de l'échantillon s'avère donc plutôt efficace pour obtenir une grandeur peu sensible au changement d'échelle. Concernant la température de surface, les figures 6.3b et 6.3c indiquent que les températures de surface en régime établi sont plus élevées pour l'échelle intermédiaire. En effet, celle-ci est 250 °C plus élevée pour un flux imposé de $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$. La différence est de 100 °C pour $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ après 20 minutes d'essai. Trois raisons peuvent expliquer les écarts entre les mesures de température de surface et de MLRPUA :

1. Une épaisseur de flamme plus importante à l'échelle intermédiaire. L'émission de la flamme devient alors non négligeable à $3,9 \text{ }\mu\text{m}$ et peut être prise compte dans la détermination de la température de surface.
2. Une dégradation plus poussée des échantillons due au flux généré par cette flamme plus épaisse. Cet écart peut également expliquer la raison pour laquelle les valeurs de MLRPUA sont légèrement plus élevées.

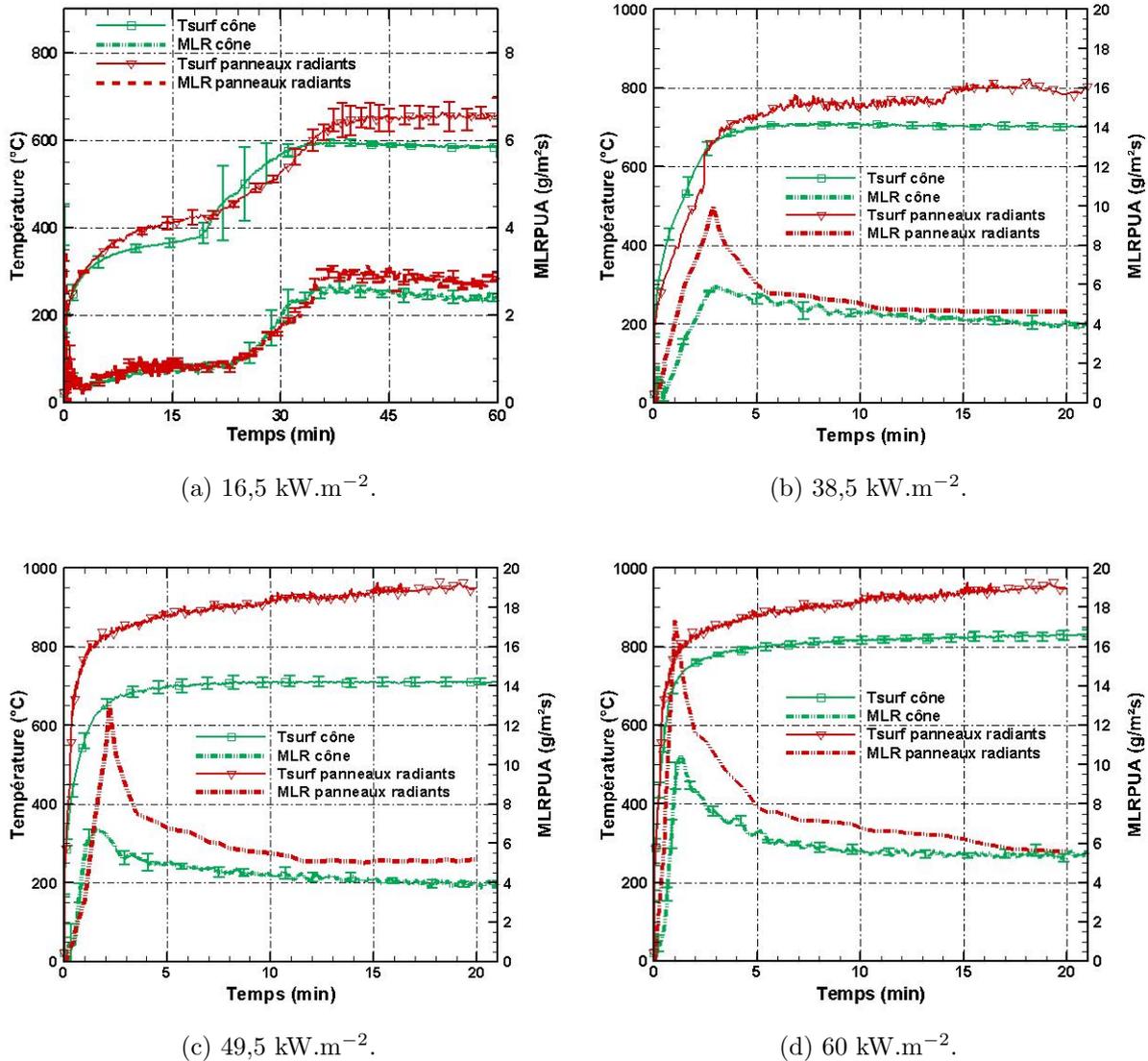
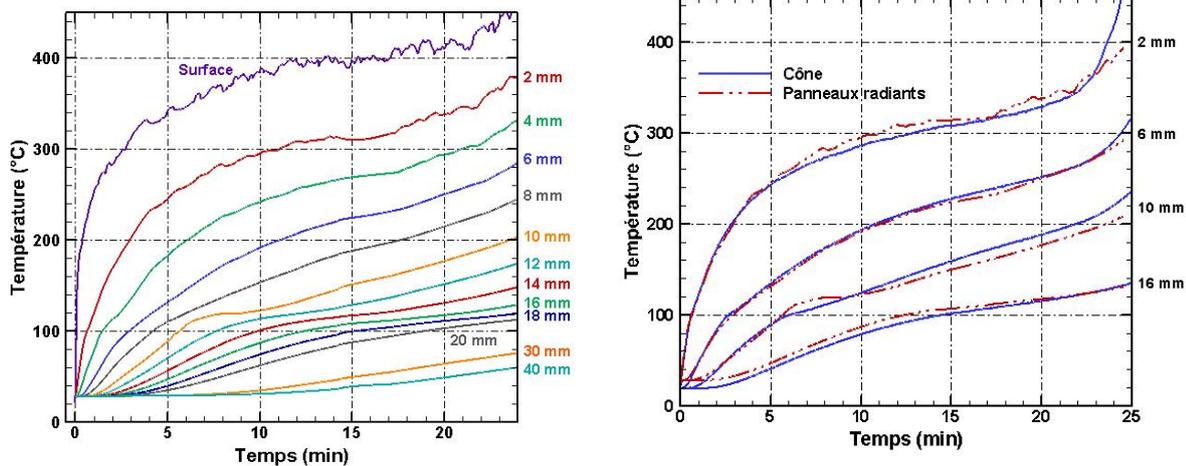


FIGURE 6.3 – Comparaison des MLRPUA et T_{surf} entre les essais aux panneaux radiants et au cône calorimètre pour des flux identiques.

3. Le porte échantillon ne protège pas les bords latéraux des échantillons. Ceux-ci sont donc très dégradés par la flamme pendant les essais, augmentant potentiellement la valeur du MLRPUA.

Température dans le matériau et front de carbonisation

La figure 6.4a présente l'évolution des températures dans le bois, mesurées par thermocouples noyés, pour un flux imposé de $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ pendant 25 minutes. La figure 6.4b compare l'effet de l'échelle (cône et panneaux radiants) sur quelques températures en profondeur.



(a) Thermogrammes pour un test de 25 minutes. (b) Comparaison des thermogrammes selon l'échelle étudiée.

FIGURE 6.4 – Thermogrammes de deux échantillons exposés à $16,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 25 minutes et comparaison avec les essais au cône.

La figure 6.4a met en évidence un début de combustion solide à 22 minutes pour une température de surface comprise entre 400 et 410 °C. Ces seuils de temps et de température de surface sont en bon accord avec les essais effectués à petite échelle (départ de la combustion après 20 minutes d'essai à une température de surface de 380 °C pour le cône). Cette similitude se retrouve également sur les thermogrammes de la figure 6.4b. En effet, même si les courbes ne présentent que la partie avant le début de la combustion solide, les températures peuvent être considérées comme identiques pour les deux échelles étudiées. Un essai a également été réalisé à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour lequel l'auto-inflammation de l'échantillon s'est produite à 19 secondes. La température a été mesurée à deux endroits : au milieu de l'échantillon et sur la partie supérieure (à 10 cm au dessus du centre). L'évolution des températures à quatre profondeurs sélectionnées (l'ensemble des thermogrammes pour toutes les profondeurs est disponible dans le livret en figures D.29 et D.30) est représentée en figure 6.5a pour les deux hauteurs. Les profils déduits des thermocouples noyés sont présentés en figure 6.5b. Globalement, on retrouve une évolution classique des thermogrammes pour les faibles profondeurs, avec une croissance rapide de la température jusqu'à atteindre un plateau au voisinage de 750 °C.

On constate que la température en profondeur augmente plus rapidement pour les thermocouples situés dans la partie supérieure de l'échantillon. À 8 mm, la température en partie supérieure est de 145 °C plus élevée que celle au milieu de l'échantillon après 10 minutes d'essai. Cet écart est tout aussi important à 12 mm après 20 minutes d'essais avec une différence de 120 °C entre les deux lignes de thermocouples. Il semblerait qu'à plus grande échelle la distribution de température ne soit pas homogène dans une section donnée de l'échantillon. Les thermogrammes en figure 6.6 sont moyennés de façon à comparer les températures internes mesurées lors des essais aux panneaux avec celles au cône. Tout comme pour les essais à faible flux, les évolutions de la température en profondeur

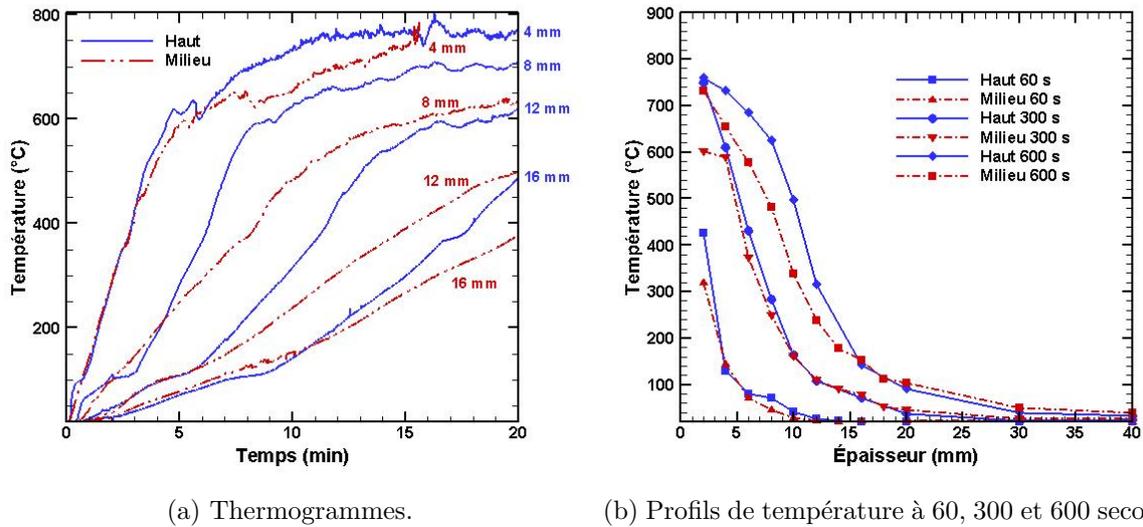


FIGURE 6.5 – Comparaison des évolutions de la température en fonction de la localisation des thermocouples noyés (partie haute de l'échantillon : Haut, milieu de l'échantillon : Milieu) pour un flux de 60 kW.m^{-2} .

sont très similaires en dépit du changement important de l'échelle. L'écart maximal est de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la phase de croissance de la température à 4 mm de profondeur. Cette comparaison conforte les interprétations des différences de températures de surface (émission de la flamme détectée par la caméra) ainsi que du MLRPUA entre les deux échelles (effet de bord sur la dégradation).

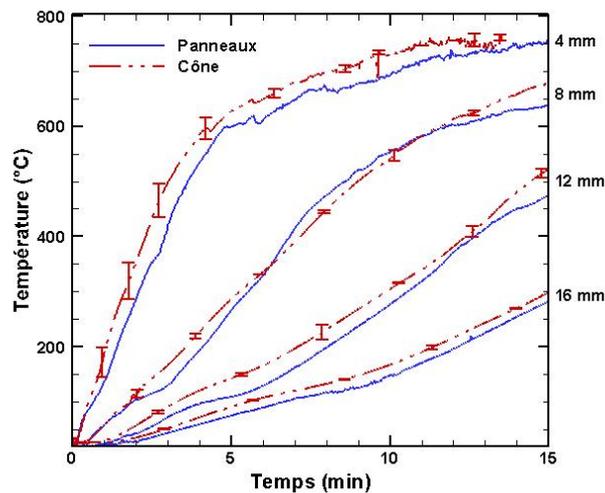


FIGURE 6.6 – Comparaison des thermogrammes pour des échantillons exposé à 60 kW.m^{-2} selon l'échelle étudiée.

Tout comme pour les essais au cône, des échantillons ont été exposés pendant différents temps à un flux prescrit afin de mesurer la position du front de charbon. Cependant, au vue de leur taille, les échantillons à l'échelle intermédiaire ont été refroidis avec de l'eau

plutôt qu'à l'azote et ont été coupés après les essais en leur milieu selon la hauteur et la largeur. Les mesures de position du front de charbon ont été réalisées tous les 5 cm dans la largeur et dans la hauteur. Celles-ci ont montré que le front de charbon est relativement homogène sur tout l'échantillon mis à part au niveau des nœuds qui ont tendance à ralentir la progression du front. L'avancée du front de charbon, ainsi que sa combustion, sont nettement plus importantes sur les cotés latéraux de l'échantillon (non "protégés" par le porte échantillon). La figure 6.7 compare les positions du front de charbon pour un même flux de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ en fonction de la mesure réalisée (directe par règle ou déduite de l'isotherme à $300 \text{ }^\circ\text{C}$) et de l'échelle étudiée (cône ou panneaux radiants)¹.

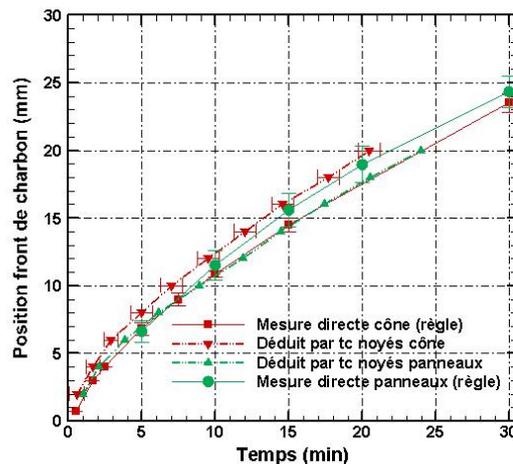


FIGURE 6.7 – Comparaison de la position du front de charbon dans les échantillons en fonction de l'échelle étudiée pour un flux imposé de $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

À l'échelle intermédiaire, les évolutions du front de charbon déduit par les thermocouples noyés sont en très bon accord avec la méthode directe par règle. La mesure de la position du front par méthode directe est légèrement supérieure à celle déduite par thermocouples à partir de 10 minutes. Cette différence reste tout même très légère puisque l'écart de la position est inférieur à 1 mm. Pour un même flux, la position du front de charbon, et donc la vitesse de carbonisation, sont très similaires que les tests soient effectués à l'échelle du cône ou à l'échelle des panneaux radiants. La figure 6.8 présente les évolutions de la position du front de charbon pour les trois flux imposés pour lesquels l'inflammation s'est produite ($38,5$, $49,5$ et $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$).

Comme présenté à petite échelle, le flux imposé influence la progression du front de charbon. Pour un flux de $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, la position du front de charbon se situe à 20 mm après 30 minutes de test. Cette même profondeur de charbon est atteinte après 20 minutes d'essai à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

1. La mesure directe de la position du front de charbon effectuée au réglet sur les échantillons testés avec les panneaux radiants sont la moyenne des 17 mesures (9 mesures selon la hauteur, 9 mesures selon la largeur, la mesure centrale étant commune aux deux axes) réalisées pour chaque échantillon.

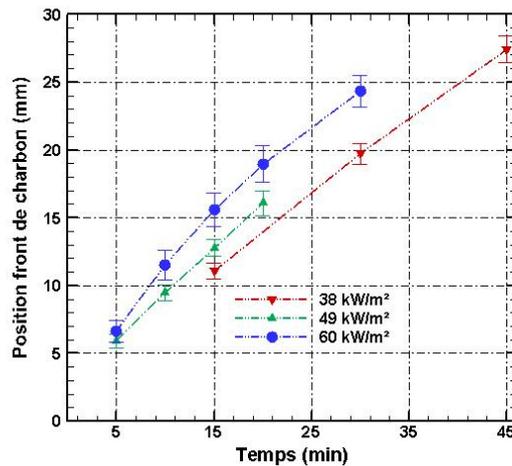


FIGURE 6.8 – Comparaison de la position du front de charbon en fonction du flux imposé avec les essais aux panneaux radiants.

6.2 Le SBI

Une campagne expérimentale utilisant le SBI comme moyen d'essai a été effectuée dans les locaux du CSTB, le but étant d'étudier la dégradation d'échantillons de bois soumis à une agression thermique différente de celle provenant d'un panneau radiant ou du cône (dispositif expérimental en section 2.7). L'annexe C présente en détail les résultats intéressants de cette campagne regroupant des cartographies de flux à la paroi en fonction des puissances de brûleur ou encore la mesure de température par thermocouples noyés. Les conditions expérimentales de ces essais rendent la comparaison avec les essais réalisés jusqu'à présent difficile. En effet le flux reçu par l'échantillon est à présent fortement hétérogène, la flamme provenant de l'échantillon et celle du brûleur se mêlent. La comparaison la plus pertinente consiste à confronter les mesures du front de charbon obtenus au SBI avec celles au cône en fonction du flux et du temps d'exposition. Les panneaux se dégradent de manière hétérogène lors des essais SBI puisque le flux mesuré sur une paroi incombustible peut passer de 50 à 1,5 kW.m⁻² en fonction de la position du fluxmètre. Les panneaux ont donc été découpés tous les 5 cm et le front de charbon a été ensuite mesuré sur toute la longueur des bandes de bois coupées. La figure 6.9 compare les positions du front de charbon des essais SBI et cône à différents flux.

Les positions mesurées pour des flux de 38,5 et 49,5 kW.m⁻² sont en très bon accord compte tenu de l'échelle étudiée ainsi que des erreurs de mesure qui peuvent exister en particulier pour les essais SBI (précision de mesure du front de charbon, calibration du fluxmètre). Les écarts sont, pour les trois temps d'essai étudiés, inférieurs à 2 mm entre le SBI et le cône. En revanche, pour des flux faibles (16,5 kW.m⁻²), les positions du front de charbon sont plus élevées pour les essais SBI. Cette différence peut provenir de la propagation latérale de la flamme observée pendant les essais SBI, augmentant ainsi le flux à la paroi.

Une campagne additionnelle avec un SBI à l'échelle 1/3 (mini SBI, voir description sec-

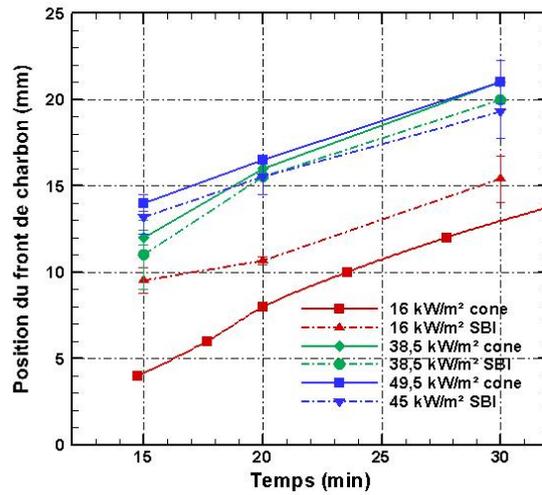


FIGURE 6.9 – Comparaison de la position du front de charbon en fonction du dispositif expérimental.

tion 2.8) a également été menée. Ces essais sont détaillés dans l'annexe C. Les mesures effectuées n'ont pas atteint le résultat escompté. Elle a cependant permis de valider à nouveau la mesure de la température par thermocouples noyés.

6.3 Résumé

Les différentes campagnes expérimentales présentées dans ce chapitre avaient pour objectif d'étudier l'effet du changement d'échelle sur la dégradation des matériaux. Au total, 53 essais ont été effectués sur trois dispositifs différents (panneaux radiants, mini-SBI et SBI).

Les essais réalisés avec des panneaux radiants ont montré que pour un même flux imposé (par rapport au cône), le temps d'inflammation était toujours inférieur à moyenne échelle. Le flux critique d'auto-inflammation est lui aussi plus faible d'une dizaine de kW.m⁻². Au niveau de la localisation de l'auto-inflammation, les phénomènes restent très proches de ceux observés à petite échelle. La plupart des auto-inflammations sont issues d'une quantité importante de gaz chauds qui s'échappent de la surface, montent, se mélangent à l'oxygène et s'enflamment dès que les conditions de mélange et de température sont atteints. En revanche, les essais aux panneaux radiants n'ont montré aucune inflammation pilotée par le dispositif (contrairement au cône où l'inflammation pouvait être pilotée par les spires chaudes du cône). Ce phénomène d'inflammation pilotée par les spires chaudes semble donc être spécifique au cône. À des temps longs, l'inflammation se situe au voisinage de la surface tout comme pour les essais au cône lorsque le flux est faible. Les températures de surface au moment de l'inflammation sont dans la même gamme que pour les essais à petite échelle, entre 432 et 738 °C. Au niveau de la dégradation des échantillons, les résultats ont montré que pour des flux faibles, les mesures de MLRPUA, de température de surface et en profondeur étaient relativement proches. L'apparition de

la combustion solide est bien perceptible à $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$. La comparaison des mesures à bas flux montre le très bon accord entre les deux échelles. En revanche, pour les hauts flux, le MLRPUA et la température de surface sont plus élevés lorsque l'échelle d'étude augmente. Ces différences semblent causées à la fois par la présence de la flamme, qui apporte un flux radiatif et convectif supplémentaire (expliquant la sur-évaluation de la température de surface), et également par la dégradation plus importante au niveau des faces latérales de l'échantillon (pouvant expliquer la sur-évaluation du MLRPUA). Cependant, les comparaisons entre les thermogrammes et les positions du front de charbon mettent en évidence que la dégradation en profondeur est très proche entre les deux échelles étudiées. Des mesures de flux générés par la flamme au niveau de la paroi ont été effectuées à l'aide de capteur de flux, mais les résultats n'ont pas pu être interprétés de façon satisfaisante. Enfin, les mesures du front de charbon pour les essais panneaux radiants et SBI et pour un flux suffisamment élevé (à partir de $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$) sont similaires quelle que soit l'échelle étudiée. Les trois dispositifs expérimentaux ont également permis une validation de la mesure par thermocouples noyés.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse avaient pour but d’approfondir et d’améliorer les connaissances sur le comportement au feu du bois de construction tels que l’épicéa et le hêtre. Plus précisément, il s’agissait de définir et/ou de préciser des critères pertinents régissant les phénomènes d’auto-inflammation, de dégradation et d’auto-extinction du bois. Dans un premier temps, un état de l’art relatif à ces trois phénomènes a été réalisé. Concernant l’auto-inflammation et l’auto-extinction du bois, il apparaît que ces phénomènes ont été très peu adressés dans la littérature. On retrouve certes un certain nombre de références relatives à l’inflammation pilotée du bois, mais cela sortait du cadre de ce travail. Concernant la dégradation, les études sont plus nombreuses et assez diverses du fait des nombreux paramètres mis en jeu et des différents modes opératoires utilisés. Au cours de cette thèse, les essais ont été majoritairement menés au cône calorimètre en orientation verticale et des tests ont également été réalisés à plus grande échelle, à la recherche de similitudes.

L’approche a été essentiellement empirique, en déployant notamment une métrologie spécifique garantissant une grande fiabilité et précision des mesures. Au total, 540 essais ont été réalisés à petite échelle (cône calorimètre) afin de déterminer des critères pertinents sur les différents phénomènes observés et 53 à des échelles supérieures (panneaux radiants, mini-SBI et SBI), soit un total de 593 tests. Les principaux résultats sont présentés ci-après.

En premier lieu, l’auto-inflammation des échantillons de bois en orientation verticale a été étudiée à l’échelle du cône calorimètre au travers de trois paramètres que sont le flux critique d’auto-inflammation, le temps d’auto-inflammation et la température de surface à l’inflammation. Les essais réalisés ont montré que le flux critique d’auto-inflammation se situait autour de $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, en bon accord avec les travaux existant. Concernant le temps d’auto-inflammation, les tests ont montré que ce dernier pouvait passer de quelques secondes à plusieurs centaines de minute pour un flux donné. L’étude spécifique sur la localisation de l’inflammation (avec des caméras rapides visible et infrarouge) a permis de mettre en évidence trois types d’inflammation : distante de la surface exposée, pilotée par les spires chaudes du cône et proche de la surface exposée. La détermination de ces mécanismes d’inflammation a permis également d’interpréter les différences observées sur

les temps d'inflammation. Pour des temps d'inflammation courts, une grande partie des apparitions de la flamme se produit à la libération au niveau de la surface d'une "bouffée" plus émissive (plus chaude ou plus concentrée) de gaz de pyrolyse. Ces gaz chauds montent par flottabilité en se diluant et dès que les conditions de mélange (oxygène et gaz) et de température sont réunies, l'inflammation a lieu. Pour des temps longs, l'apparition de la flamme se situe au niveau de la surface chaude exposée au flux. Celle-ci joue le rôle de pilote et vient enflammer les gaz de pyrolyse qui s'échappent des fissures créées au cours de la dégradation du bois. Enfin, concernant la température de surface à l'inflammation, souvent qualifiée de température d'inflammation, il est apparu que la pertinence de ce critère n'était pas des plus évidente. En effet, pour les hauts flux, l'auto-inflammation s'initiait principalement dans les gaz de pyrolyse (ou au niveau des spires) à distance de la surface. Dans ce cas bien précis, la température de surface n'est pas directement responsable de l'inflammation. Ce critère aurait toutefois plus de sens aux temps longs où justement l'inflammation se produit au niveau de la surface de l'échantillon.

La dégradation des échantillons a tout d'abord été étudiée à petite échelle en faisant varier les flux de chaleur. Les essais ont montré que le bois pouvait fortement se dégrader, sans forcément s'enflammer, du fait de la combustion du charbon. Lorsque le flux imposé est suffisamment faible, il est possible de discerner la transition vers cette combustion solide par une augmentation des MLRPUA et des températures (de surface et dans le bois). La combustion solide est activée dès lorsque la température de surface et la quantité d'oxygène sont en proportion adéquate. Les essais engendrant l'inflammation des échantillons ont montré que le flux généré par la flamme à cette échelle était très faible par rapport au flux imposé en particulier en orientation verticale. Une attention particulière a été portée sur la mesure de la température dans les échantillons. Le mode d'implantation d'un thermocouple dans le bois peut sous estimer la température de plusieurs centaines de degrés. C'est pourquoi une nouvelle technique d'implantation précise de thermocouples à l'intérieur des échantillons a été développée. Elle nécessite un usinage spécifique des échantillons pour y placer des fils très fins de thermocouples. Les résultats ont pu être validés par comparaison avec la mesure réelle de la position du front de charbon. Enfin les paramètres expérimentaux telles que l'humidité ou l'essence de bois ont également été étudiés. Ils peuvent exercer une influence plus ou moins importante sur la dégradation. La progression du front de charbon, pour un flux imposé, n'est pas linéaire puisqu'elle décroît en début d'expérience jusqu'à atteindre une valeur quasi constante. En revanche, la vitesse de carbonisation augmente linéairement avec le flux, passant de $0,73 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour un flux de $16,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ à $1,4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ pour un flux de $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'auto-extinction du bois est un phénomène peu adressé dans la littérature mais qui intéresse de plus en plus la communauté incendie. Un dispositif expérimental dédié associant deux cônes placés sur un système coulissant a été spécialement développé. Il permet de remonter à des critères de flux et de MLRPUA critiques conduisant à l'extinction de la flamme. L'étude statistique a permis d'établir pour l'épicéa une valeur de MLRPUA

critique de $3,95 \text{ g.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ et ce indépendamment des conditions expérimentales fixées (flux et temps d'exposition). Le flux critique d'auto-extinction a pu être déterminé précisément entre 45 et 52 kW.m^{-2} selon le premier flux imposé (entre 60 et $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$). Pour l'épicéa, ce flux critique est indépendant du temps d'exposition en raison d'une épaisseur de couche de charbon quasi constante en régime permanent. Des résultats différents ont été obtenus avec du hêtre. Le flux critique et le MLRPUA dépendent des temps d'exposition ainsi que du premier flux imposé. Ces essais mettent en évidence la sensibilité de l'essence de bois considérée sur l'auto-extinction.

Les partenariats avec différents laboratoires ont permis de réaliser des essais à des échelles supérieures à celle du cône, avec des agressions thermiques variées. De manière générale, les essais aux panneaux radiants ont permis d'identifier certaines similitudes avec les essais à petite échelle. Même si le flux critique d'auto-inflammation était inférieur à celui déduit au cône calorimètre, les phénomènes d'apparition de la flamme ainsi que les températures de surface étaient similaires à l'échelle du matériau. Par ailleurs, il a été montré que les positions du front de charbon entre le SBI et le cône pour un même flux mesuré étaient identiques. Enfin, ces campagnes d'essai à différentes échelles ont également permis de valider la mesure de la température dans le matériau par l'implantation spécifique des thermocouples fins.

En résumé, le comportement au feu du matériau bois (auto-inflammation, dégradation, auto-extinction) a été étudié expérimentalement à travers 593 essais en orientation verticale. Une attention particulière a été portée sur la métrologie de façon à garantir la précision et la fiabilité des mesures. De nombreuses conditions expérimentales ont été variées permettant une étude approfondie des trois phénomènes étudiés. Le changement d'échelle a montré quelques résultats similaires à la petite échelle en particulier sur l'évolution de la position du front de charbon et les températures internes.

Perspectives

Les conclusions présentées ci-dessus fournissent un aperçu de l'ensemble des résultats obtenus à la suite des nombreux essais effectués. Cependant, de nombreuses questions ont également été soulevées laissant entrevoir un certain nombre de perspectives à ce travail, nécessitant des essais complémentaires et/ou le développement de la métrologie ainsi que des dispositifs expérimentaux.

Concernant l'auto-inflammation La mesure de température de surface par caméra infrarouge pourrait être améliorée avec une meilleure prise en compte de l'émissivité des échantillons. Une solution consisterait à effectuer les mesures simultanément à différentes longueur d'onde (mode multispectral de la caméra infrarouge). Cela permettrait de remonter précisément à la température de surface tout en s'affranchissant de connaissance de l'émissivité. Les premières expériences menées avec la caméra en mode multispectral

pendant la thèse ont montré que les filtres devraient être à des longueurs d'ondes assez proches pour palier au changement brutal de l'émissivité du bois.

Concernant la dégradation du bois La mesure de la température dans le bois peut être sous estimée selon la méthode d'implantation du thermocouple. Les essais effectués en ingénierie sont beaucoup plus imposants et la fréquence d'essai est relativement élevée. L'usinage effectué pendant la thèse semble difficile à instaurer pour ce type de test. Il conviendrait alors d'adapter une méthode d'implantation de thermocouple spécifique aux essais normés de la sécurité incendie.

Le dispositif de la chambre permettant de contrôler l'apport d'oxygène peut être utilisé de façon à estimer plus précisément le flux généré par la combustion solide. Cette donnée peut potentiellement être utilisée dans les codes de calcul comme donnée d'entrée. Une campagne expérimentale peut donc être menée de façon à déterminer finement le flux supplémentaire de la combustion en fonction du flux imposé.

L'étude peut être élargie à un panel varié d'essence de bois afin d'évaluer le comportement général du bois face à un flux de chaleur et constituer une base de données solide.

Enfin, toutes les données enregistrées peuvent être confrontées aux différents modèles existants. Celles-ci peuvent également faire l'objet d'un travail de modélisation poussée mériterait d'être mené sur la base des évolutions de température interne fournies par les thermocouples noyés, afin d'estimer la variation des propriétés thermophysiques du bois au cours de la dégradation.

Concernant l'auto-extinction Des études très récentes se sont focalisées expérimentalement sur l'extinction de la flamme en orientation horizontale à l'échelle du cône en fonction de la quantité d'oxygène [141]. Le couplage de la chambre à atmosphère contrôlée avec le système de cône coulissant permettrait une détermination du flux et du MLRPUA critiques en fonction de la teneur en oxygène.

Annexe A

Modélisation de l'influence d'un thermocouple sur la mesure de la température dans le bois

Sommaire

A.1	Description générale	153
A.2	Données d'entrées dans COMSOL®	153
A.3	Résultats de l'étude paramétrique	156
A.4	Résumé	158

A.1 Description générale

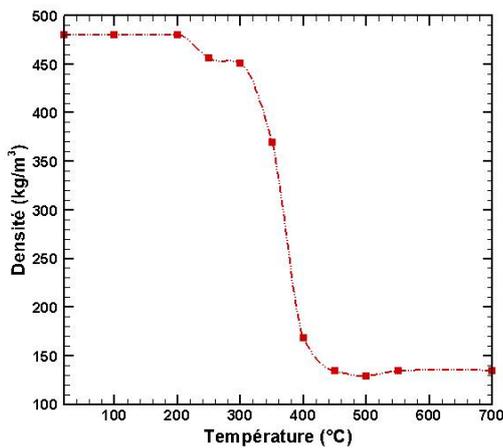
Les essais expérimentaux ont montré une forte sous-estimation de la température en fonction de l'implantation d'un thermocouple. Des simulations COMSOL multiphysics® ont été réalisées afin de quantifier l'influence des paramètres mis en jeu tels que le contact entre le bois et le thermocouple, son orientation et son diamètre. COMSOL est un logiciel de simulation numérique permettant de modéliser des phénomènes multi-physiques. Le processus de modélisation se divise en plusieurs étapes : la définition de la géométrie, des propriétés des matériaux, du maillage et la définition de la physique à résoudre. L'objectif de cette étude est de modéliser la perturbation causée par l'implantation d'un thermocouple dans le bois.

A.2 Données d'entrées dans COMSOL®

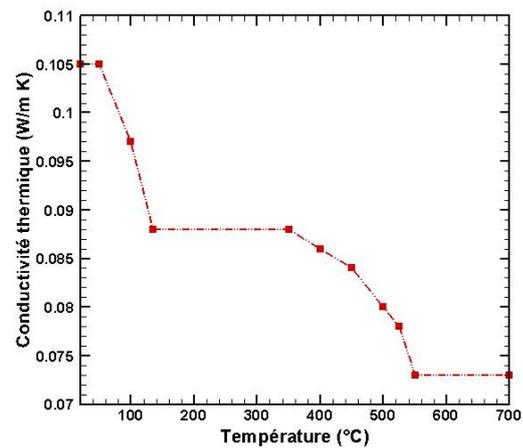
La mise en place d'un modèle de dégradation du bois est une activité de recherche qui existe depuis maintenant plusieurs années. La prédiction de la température en profondeur ou encore la vitesse de perte en masse sont d'autant plus précises si la complexité du modèle et le couplage entre la physique et la chimie sont réalisés. L'objectif de cette étude

n'était pas de prédire de façon exacte la température mesurée en expérience mais de montrer l'écart obtenu selon l'implémentation du thermocouple. Pour cela, des conditions simples de thermique, physique et chimique sont imposées.

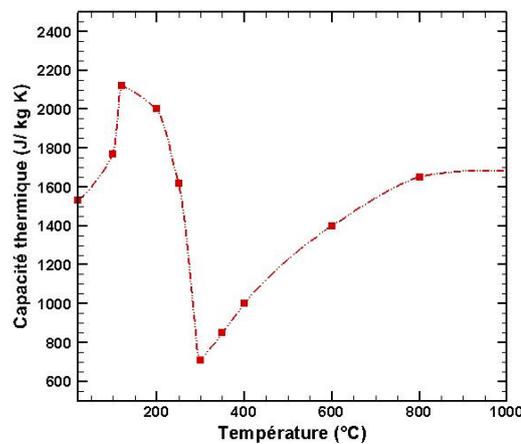
L'échantillon considéré est un morceau d'épicéa aux dimensions de l'échantillon utilisé dans les essais menés avec le cône calorimètre, soit 10×10 cm et 5 cm d'épaisseur et est exposé à un flux de chaleur égal à $93,5 \text{ kW.m}^{-2}$. L'émissivité, égale à 0,9 est considérée constante tout au long de l'exposition au flux de chaleur. Une condition de flux convectif est imposée sur toutes les faces de l'échantillon ainsi que sur la partie du thermocouple ne se trouvant pas dans le matériau. Le coefficient d'échange convectif est fixé à $10 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ sur toutes les surfaces non exposée et $15 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ sur la surface exposée au flux. Dans ce cas d'étude aucune condition en humidité n'est imposée. La figure A.1 permet de visualiser les évolutions de la densité, chaleur spécifique et conductivité en fonction de la température.



(a) Densité.



(b) Conductivité thermique.

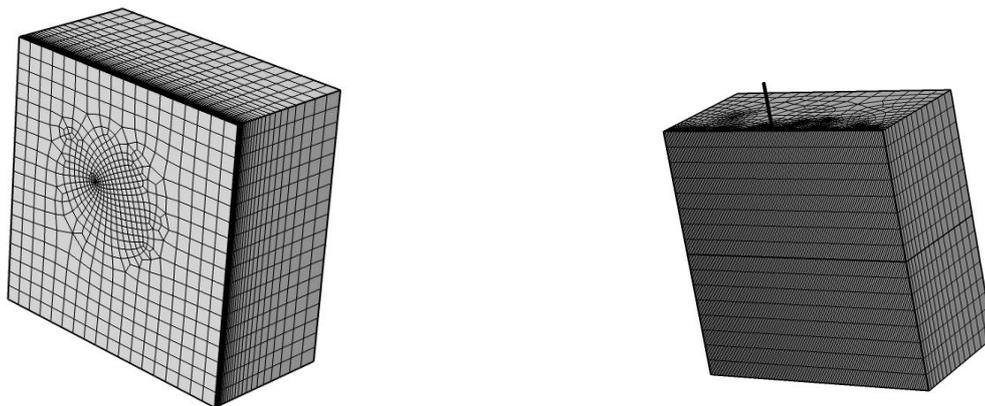


(c) Capacité thermique.

FIGURE A.1 – Propriétés de l'échantillon d'épicéa utilisées dans COMSOL en fonction de la température.

Un thermocouple est ensuite modélisé dans le bois, à 2 mm de la surface exposée au flux de chaleur. Des données expérimentales réalisées au cône avec des thermocouples à des positions identiques ont été enregistrées avec deux orientations différentes : la première est perpendiculaire au flux de chaleur et la deuxième parallèle à celui-ci. En plus d'étudier l'effet de l'orientation, la mise en œuvre de l'instrumentation ainsi que le diamètre du thermocouple feront l'objet d'une étude paramétrique afin de mettre en évidence l'élément qui perturbe le plus les données en température. Ce diamètre varie selon deux valeurs qui sont celles utilisées dans les expériences : 0,1 et 1 mm. La mise en œuvre du thermocouple est quant à elle modélisée par l'ajout d'une résistance de contact. Généralement la disposition de thermocouple dans le bois est réalisée par un perçage avec un foret ayant un diamètre plus important que celui du thermocouple. En conséquence, il existe une lame d'air présente entre le thermocouple et le matériau. De plus l'orientation du thermocouple peut accentuer l'effet de puits thermique.

Lors de la mise en place des thermocouples gainés de 1 mm de diamètre, un foret de 1,2 mm de diamètre a été utilisé pour les essais cône afin d'y placer les thermocouples et un foret de 1,5 mm de diamètre pour les essais mini-SBI et SBI (présentés dans l'annexe C). La lame d'air séparant le thermocouple du bois est estimée à 0,25 mm et 0,1 mm pour un perçage de 1,5 et 1,2 mm respectivement. La conductivité de l'air est estimée égale à $0,025 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-2}$. La modélisation est donc réalisée avec des conductances de contact de 0,01 et $0,004 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-2}$. En ce qui concerne la mise en place des thermocouples noyés, les rainures étaient faites avec une lame de scie circulaire de 0,2 mm de d'épaisseur. La résistance de contact est donc estimée à $0,002 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-2}$ pour un rayon de thermocouple de 0,05 mm. Les simulations sont lancées pour modéliser 10 minutes d'essai. La figure A.2 présente les deux échantillons étudiés avec le thermocouple disposé parallèlement et perpendiculairement par rapport au flux de chaleur.



(a) Thermocouple parallèle au flux.

(b) Thermocouple perpendiculaire au flux.

FIGURE A.2 – Modélisation de l'échantillon ainsi que du thermocouple disposé à 2 mm par rapport à la surface exposée au flux de chaleur.

A.3 Résultats de l'étude paramétrique

La modélisation de la température dans le bois à 2 mm de profondeur est étudiée selon trois paramètres : l'orientation du thermocouple par rapport au flux, le diamètre du thermocouple et le contact entre le bois et le thermocouple. La figure A.3 montre l'effet de l'orientation d'un thermocouple sur l'évolution de la température. Deux diamètres de thermocouples ont été considérés (0,1 et 1 mm).

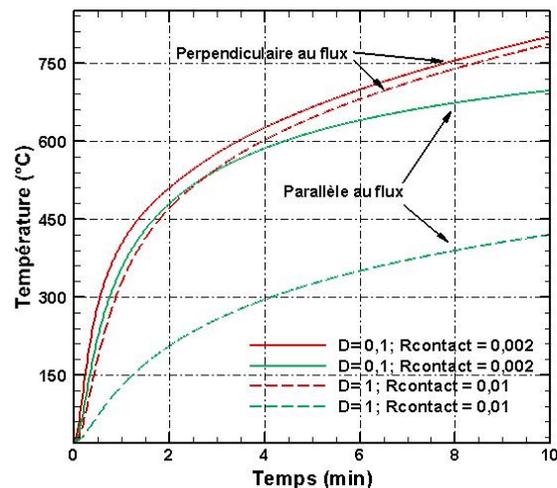


FIGURE A.3 – Comparaison des évolutions des températures en fonction de l'orientation des thermocouples.

Cette figure met en évidence l'effet de l'orientation des thermocouples sur la mesure de la température dans les échantillons de bois. Les deux thermocouples orientés perpendiculairement par rapport au flux de chaleur (figure A.2b) mesurent une température qui croît rapidement jusqu'à 800 °C après 10 minutes de modélisation. La température calculée varie de 420 à 690 °C pour les thermocouples orientés parallèlement au flux de chaleur (figure A.2a). À 2 minutes, la différence de température pendant la croissance rapide est de 305 °C, soit une différence proche de celle mesurée pendant les essais au cône calorimètre. Ces courbes montrent également que le diamètre du thermocouple peut influencer la température mesurée en plus de l'orientation. La figure A.4 présente les températures obtenues en fonction du diamètre du thermocouple et de la résistance de contact entre le thermocouple et le bois.

La croissance des courbes pour des thermocouples de 0,1 mm est plus rapide que pour des thermocouples de 1 mm. Pour figure A.4a, la température à la fin de la modélisation est de 690 °C pour les thermocouples de 0,1 mm contre 420 et 455 °C pour les thermocouples de 1 mm selon la résistance de contact. La résistance de contact influence d'environ 35 °C l'évolution de la température pour un diamètre de 1 mm. Pour différents diamètres de thermocouple, une résistance de contact plus faible (traduisant un meilleur contact entre le bois et le thermocouple) améliore l'estimation de la température. En revanche, l'évolution de la température peut être sous-estimée tout particulièrement à cause du diamètre du

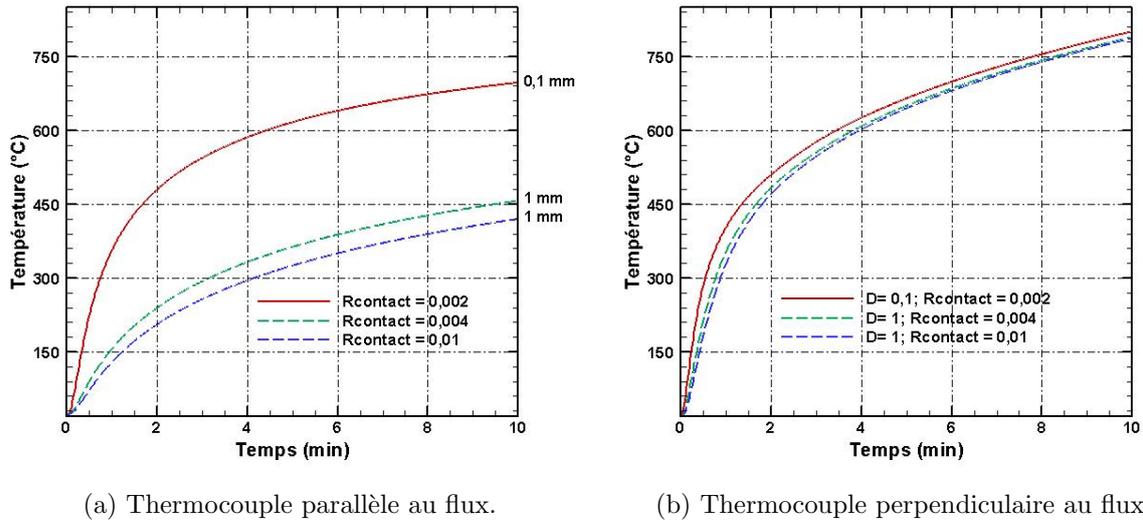


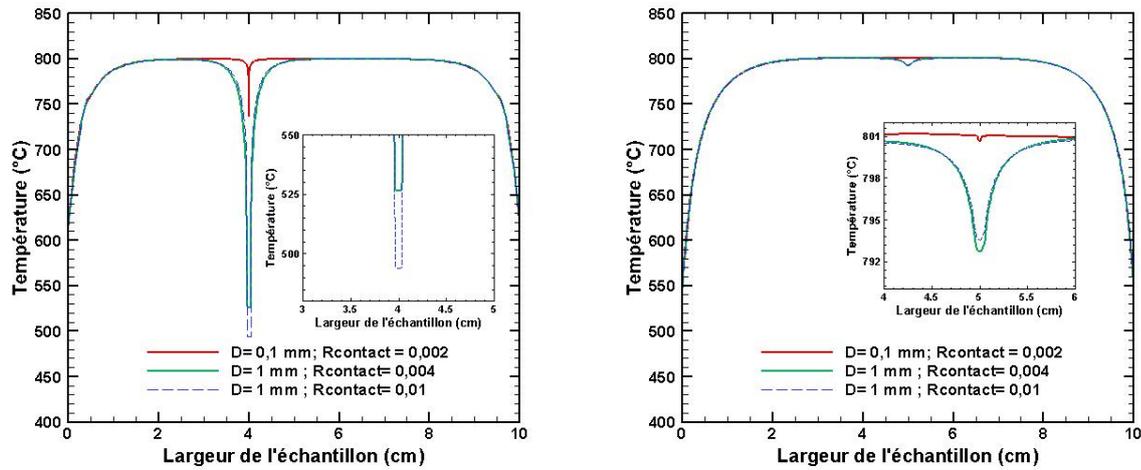
FIGURE A.4 – Évolution de la température en fonction de l'orientation, du diamètre du thermocouple ainsi que de la résistance de contact.

thermocouple.

Concernant la figure A.4b, la température à la fin de la modélisation est de 800 °C pour les thermocouples de 0,1 mm contre 787 °C pour les thermocouples de 1 mm. Pour une même implémentation l'évolution de la température peut être légèrement sous-estimée en particulier à cause du diamètre du thermocouple mais cette erreur est inférieure à 15 °C et reste acceptable.

L'effet de puits thermique créé par le thermocouple, en particulier lorsque celui-ci est disposé parallèlement par rapport au flux, a déjà été discuté en section 4.3.2 du chapitre 4. Les simulations permettent de modéliser cette perte de chaleur en traçant la température sur la largeur de l'échantillon, à 2 mm de profondeur (figure A.5).

A une même profondeur, une forte baisse peut être observée entre la température à l'emplacement du thermocouple et la température éloignée du thermocouple. Cette baisse peut atteindre 305 °C selon la résistance de contact entre le bois et le thermocouple, ce qui est du même ordre de grandeur que ce qui est observé expérimentalement. Cette grande différence est due à la perte de flux de chaleur le long de la gaine du thermocouple. De plus, la chute de température s'étend sur plusieurs millimètres à l'intérieur de l'échantillon lui-même, confirmant le refroidissement du bois environnant remarqué par Fahrni *et al.* [65] par exemple. Si nous considérons un thermocouple de 0,1 mm de diamètre parallèle au flux de chaleur, la sous-estimation de la température n'est plus que de 60 °C parce que le flux de chaleur conducteur le long du thermocouple est considérablement moindre en raison de sa section plus petite. Pour le thermocouple implémenté perpendiculairement au flux de chaleur, la sous-estimation est égale à 7 °C pour un thermocouple de 1 mm de diamètre et seulement 0,3 °C pour un thermocouple de 0,1 mm de diamètre.



(a) Thermocouple parallèle au flux.

(b) Thermocouple perpendiculaire au flux.

FIGURE A.5 – Température à 2 mm de profondeur en fonction de son l'implantation, son diamètre et sa résistance de contact.

A.4 Résumé

Bien que cette simulation ne soit pas censée être quantitative car de nombreux phénomènes n'ont pas été pris en compte (pyrolyse, évaporation de l'eau, modification réelle des propriétés thermiques des matériaux, régression de la surface par la combustion, fissures etc.), elle démontre que de très grandes différences de température peuvent être observées selon la taille du thermocouple et la façon dont il est implanté à l'intérieur de l'échantillon. Une différence de température presque négligeable est obtenue en utilisant un thermocouple très mince orienté perpendiculairement au flux de chaleur. L'ajout d'une résistance thermique entre l'échantillon et le thermocouple entraîne une sous-estimation encore plus élevée de la température.

Annexe B

Mesure de la température de surface pendant sa dégradation

Sommaire

B.1 Dégradation sans inflammation	159
B.2 Dégradation avec inflammation	160

B.1 Dégradation sans inflammation

La figure B.1 présente les évolutions de la température de surface pour un flux de 22 kW.m^{-2} obtenues à partir de la caméra infrarouge en variant l'émissivité (0,88, 0,9 et 0,95) et à l'aide d'un thermocouple de type K (1 mm de diamètre) placé au centre de la surface de l'échantillon.

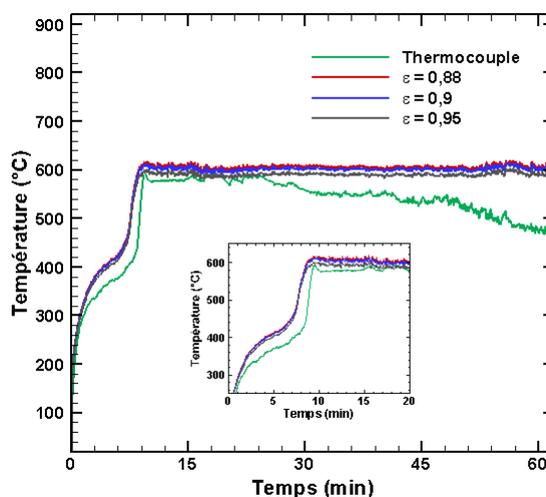


FIGURE B.1 – Comparaison des températures de surface à 22 kW.m^{-2} en fonction de la valeur de l'émissivité et de la technique de mesure (thermocouple ou caméra infrarouge).

Jusqu'à 20 minutes, la température donnée par le thermocouple et la caméra infrarouge sont en assez bon accord, même si le thermocouple sous-estime la température de surface de quelques dizaines de degrés, principalement lorsque la variation de température est rapide, en raison de l'inertie thermique du thermocouple. L'écart entre les deux types de mesures augmente aux temps longs. Étant donné que la surface de l'échantillon se dégrade, le contact entre le thermocouple et la surface ne peut plus être assuré, ce qui entraîne une diminution de la température mesurée. Bien que largement utilisé, nous montrons ici que la température de surface mesurée par un thermocouple peut conduire à une grande incertitude. Pour des raisons de précision, la mesure de la température de surface par caméra infrarouge est préférable. Cela signifie, bien sûr, que les propriétés radiatives doivent être connues, en particulier l'émissivité de l'échantillon, qui peut varier au cours du processus de dégradation. Trois valeurs d'émissivité (0,88, 0,90 et 0,95) ont été choisies dans la plage typique de variation de l'émissivité du bois au cours de sa dégradation thermique au temps long. Pour le test effectué à 22 kW.m^{-2} , la variation de température due à l'incertitude d'émissivité est inférieure à 20 °C dans le cas le plus défavorable, ce qui est très raisonnable. Pour Chaos [71], une erreur d'estimation de l'émissivité dans la gamme 0.8-1 peut conduire à une erreur de 8 % de la température de surface estimée, ce qui est représentatif des mesures présentées ici. Cette variation d'émissivité est importante en début d'expérience, lorsque le bois se transforme mais l'incertitude diminue ensuite une fois qu'il s'est intégralement transformé en charbon.

B.2 Dégradation avec inflammation

Tout comme pour la figure B.1, la figure B.2 présente les différences de température de surface obtenues soit par thermocouple soit par caméra infrarouge pour un flux de 60 kW.m^{-2} .

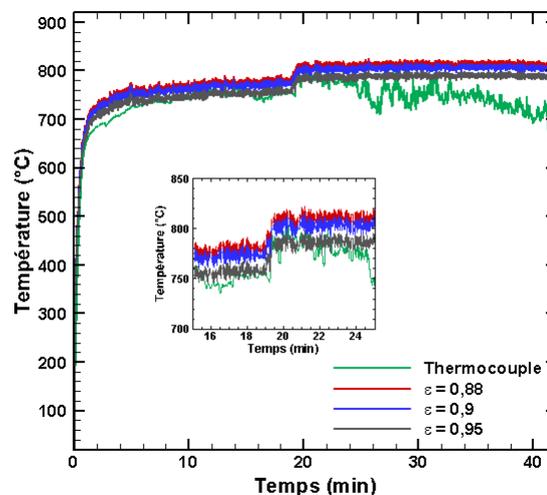


FIGURE B.2 – Comparaison des température de surface à 60 kW.m^{-2} en fonction de la valeur de l'émissivité et de la technique de mesure (thermocouple ou caméra infrarouge).

Les observations sont les mêmes que celles de la section 4.1. À partir de 20 minutes, le contact entre le thermocouple et l'échantillon ne permet plus d'assurer une bonne mesure de la température de surface. Par conséquent, lorsque l'inflammation se produit après une longue période, le thermocouple ne mesure pas correctement la température de surface à l'allumage. De plus, la réponse du thermocouple devient de plus en plus "bruitée" puisqu'il est soumis à des variations de température de l'environnement, provoquées par la turbulence des gaz chauds dans la flamme. La valeur de l'émissivité (0,88, 0,9 ou 0,95) engendre une différence de la température de surface de 25 °C.

Annexe C

Changement d'échelle : le mini-SBI et le SBI

Sommaire

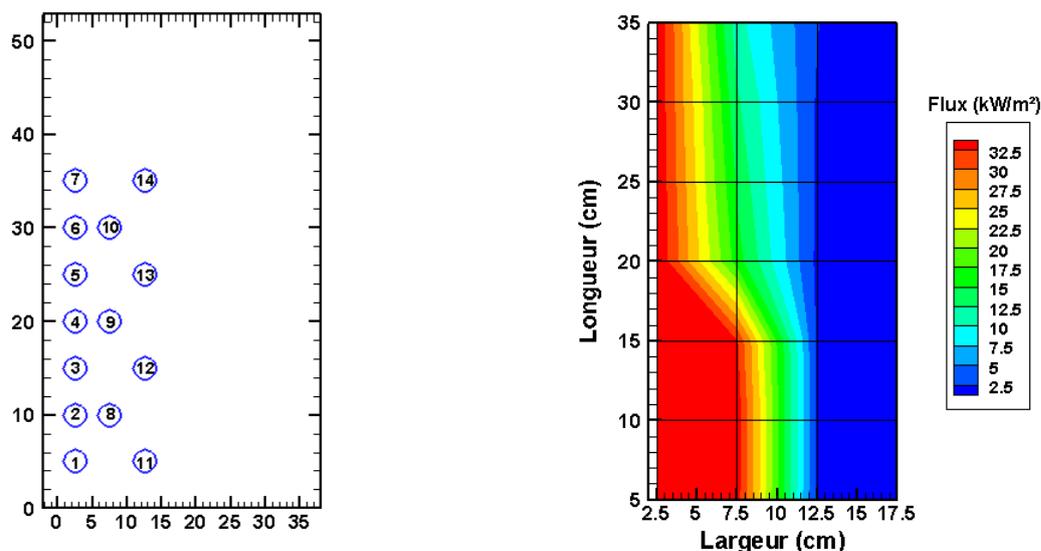
C.1 Le mini-SBI	163
C.1.1 Mesure du flux sur une paroi incombustible	163
C.1.2 Validation de la mesure de température dans le matériau et comparaison avec le front de charbon	164
C.2 Le SBI	168
C.2.1 Mesure des flux reçus à la paroi sur la plaque non combustible	168
C.2.2 Comportement au feu des éprouvettes en bois	170

C.1 Le mini-SBI

C.1.1 Mesure du flux sur une paroi incombustible

Le flux a été mesuré à différentes positions au niveau de la paroi pour une puissance de brûleur de 7,7 kW. Une plaque en silicate de calcium, considérée comme non combustible, a été percée à différentes positions afin d'y placer un fluxmètre refroidi (type Gardon) et de mesurer le flux total reçu à la paroi. Les trous ne contenant pas le capteur sont bouchés afin de ne pas perturber l'écoulement de la flamme et par conséquent fausser les mesures. La figure en annexe [C.1a](#) montre un schéma de la position des trous permettant de placer le fluxmètre afin de mesurer le flux reçu au niveau de la paroi exposée au brûleur. La figure [C.1b](#) présente une cartographie des flux moyens mesurés pendant 60 secondes.

Le flux mesuré sur la paroi incombustible proche du coin et sur les 35 cm de hauteur est homogène puisqu'il varie entre 33 et 35 kW.m⁻². À 12,5 cm par rapport au coin, le flux mesuré est en inférieure à 2,5 kW.m⁻² quelle que soit la hauteur. La sollicitation thermique sera la plus importante à l'endroit où la flamme du brûleur se situe. Les températures mesurées à 15 et 30 cm de hauteur seront étudiées à des flux équivalents de la part du brûleur situé dans le coin entre les deux éprouvettes.



(a) Schéma de la position fluxmètres.

(b) Cartographie.

FIGURE C.1 – Schéma de la position des fluxmètres et cartographie des flux mesurés au mini-SBI sur une paroi incombustible pour une puissance de 7,7 kW.

C.1.2 Validation de la mesure de température dans le matériau et comparaison avec le front de charbon

Une fois que les mesures des flux ont été enregistrées sur une paroi incombustible, les essais avec les éprouvettes d'épicéa ont été réalisés. L'agression thermique étant une flamme, il est difficile d'observer avec précision le temps d'inflammation du bois puisque les flammes de la source et de l'éprouvette sont confondues en particulier lorsque le combustible commence à s'enflammer. L'extinction du bois n'a pas été étudiée pendant cette campagne, même si il a été observé que le temps d'extinction du bois était inférieur à 40 secondes dès que la flamme du brûleur était retirée. La flamme provenant du combustible ne permet donc pas d'entretenir la combustion gazeuse.

Des thermocouples noyés ont été placés dans un côté de l'éprouvette. L'usage est identique à celui présenté en section 2.3.3 et les thermocouples sont disposés près du coin. Les capteurs de température ont été disposés à 3 cm du coin. Pour cette campagne expérimentale, deux rangées de douze thermocouples ont été placés à deux hauteurs : 15 cm (hauteur inférieure) et 30 cm (hauteur supérieure). Le schéma permettant de visualiser la disposition des thermocouples noyés est disponible en figure C.2.

Lors d'un essai, quatre thermocouples gainés d'un diamètre de 0,5 mm ont été placés à 20 et 30 mm de profondeur aux deux hauteurs afin de comparer les évolutions de température pour les deux types de mesure. Le perçage est réalisé avec un forêt de 1 mm de diamètre en face non exposée par rapport au brûleur.

Des échantillons ont également été exposés à la même puissance que les essais avec les thermocouples pendant différents temps de façon à mesurer la profondeur de carbonisa-

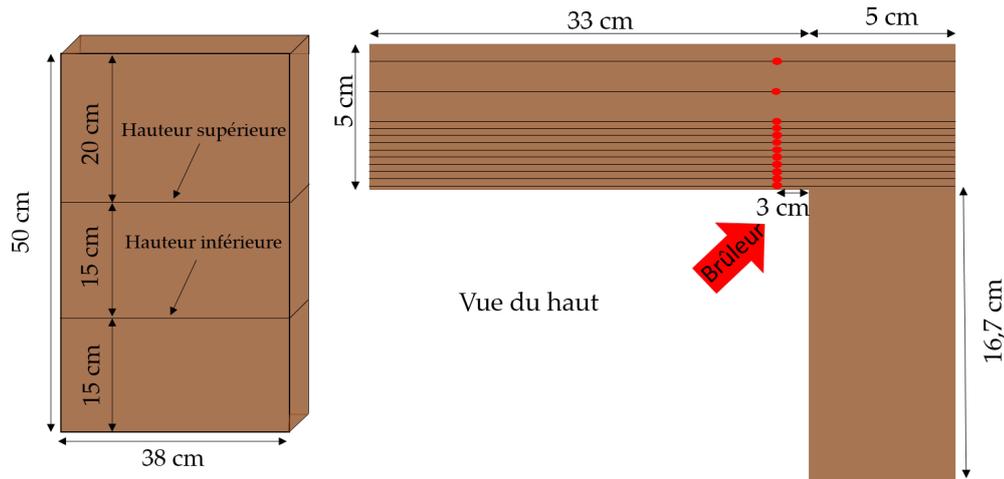
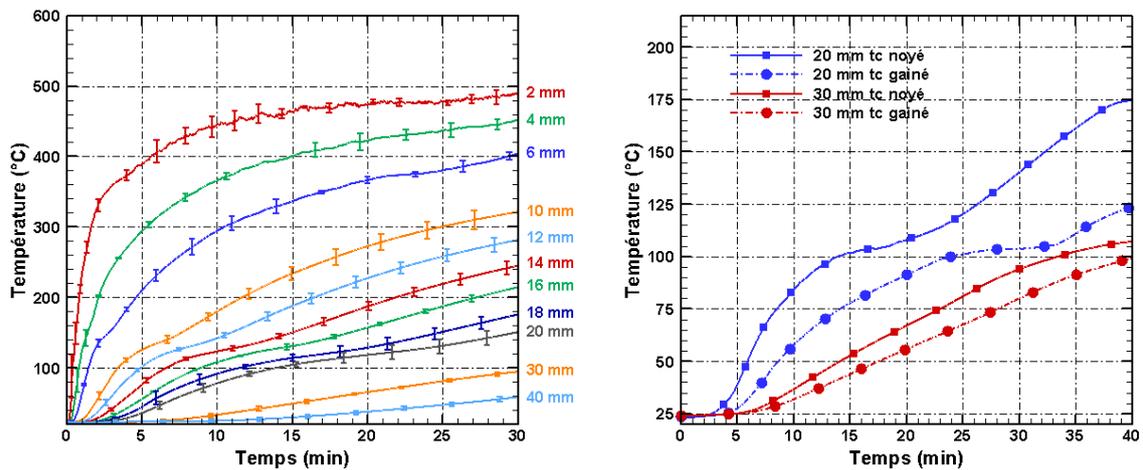


FIGURE C.2 – Schéma permettant de visualiser la position des thermocouples dans les échantillons. Les points rouges représentent les soudures des thermocouples, où les mesures seront enregistrées.

tion et valider la mesure par thermocouples noyés (avec l'isotherme à 300 °C). La figure C.3 montre les thermogrammes de la hauteur inférieure (15 cm) avec les écarts types à différentes profondeurs pour une puissance de brûleur équivalent à 7,7 kW. Les données sont moyennées sur trois essais dans la majeure partie des cas. La seconde figure montre l'évolution de la température à deux profondeurs, 20 et 30 mm, selon l'implantation des thermocouples : noyés sans gaine ou gainés et placés après perçage de la face arrière.



(a) Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs.

(b) Comparaison en fonction de l'implantation des thermocouples à 20 et 30 mm de profondeur.

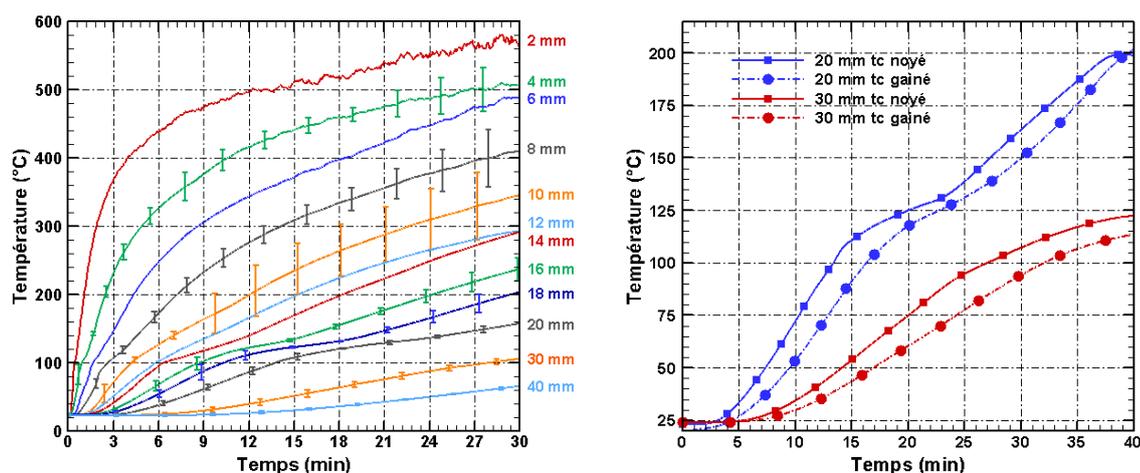
FIGURE C.3 – Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs et comparaison en fonction de l'implantation pour la hauteur inférieure des éprouvettes.

Les thermogrammes des thermocouples noyés montrent la très bonne répétabilité des essais. La température augmente plus rapidement pour les thermocouples proche de la surface exposée et la température maximale est atteinte autour de 475 °C. Le changement

de pente à 130 °C, déjà observé dans les essais précédents (cône calorimètre), est également présent à partir de 6 mm de profondeur.

La comparaison des évolutions de la température en fonction du type d'implantation de thermocouple montre que les évolutions de la température peuvent différer selon le thermocouple utilisé ainsi que sa mise en place dans l'échantillon. Les températures enregistrées par les thermocouples gainés sont sous-estimées par rapport à celles des thermocouples noyés. La différence peut aller jusqu'à 50 °C pour des mesures qui sont pourtant éloignées de la surface exposée. Des écarts encore plus accentués ont déjà été observés sur les essais réalisés avec le cône calorimètre puisque les thermocouples étaient proches de la surface exposée. La position exacte du thermocouple gainé, le contact entre le thermocouple et le matériau ou encore la différence de conductivité entre les deux matériaux peuvent être la cause de ces sous-estimations de la température. Ces observations confirment, une fois de plus, l'importance de la mise en place de la métrologie pour l'étude de la température en dans le matériau bois.

Les thermogrammes des thermocouples noyés ainsi que la comparaison de l'implantation des thermocouples pour la hauteur supérieure (30 cm) est disponible en figure C.4.



(a) Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs.

(b) Comparaison en fonction de l'implantation des thermocouples à 20 et 30 mm de profondeur.

FIGURE C.4 – Thermogrammes des thermocouples noyés à différentes profondeurs et comparaison en fonction de l'implantation pour la hauteur supérieure des éprouvettes.

Là encore, l'implantation des thermocouples a une importance sur les données enregistrées même si la différence entre les thermocouples noyés et gainés est moins importante que pour la figure C.3. Les thermogrammes des douze thermocouples noyés sont similaires à ceux présentés précédemment, avec un plateau à une température à 575 °C, soit 100 °C supérieur à celui des températures de la hauteur inférieure (15 cm). Les écarts-types sont quant à eux plus importants que sur la figure C.3. Cette différence peut être dû à l'influence de la flamme générée par le combustible à la hauteur supérieure. Cette flamme semble donc générer un flux supplémentaire qui va accentuer la montée en température dans le bois. La figure C.5 compare les profils de température selon les deux hauteurs

étudiées (15 et 30 cm).

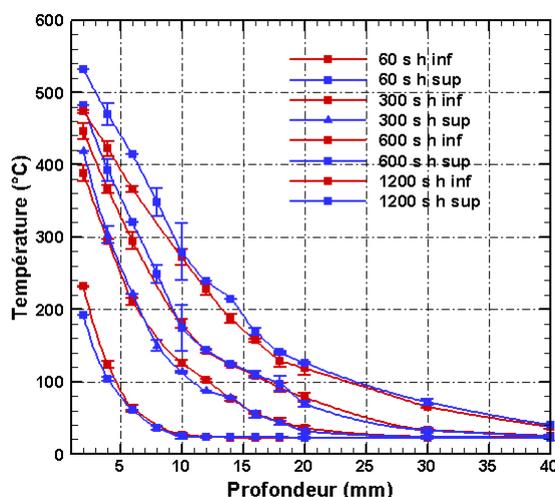


FIGURE C.5 – Comparaison des profils de température selon la hauteur des thermocouples dans les éprouvettes (h inf : hauteur inférieure à 15 cm et h sup : hauteur supérieure à 30 cm).

Les profils de température sont proches selon les deux hauteurs. En début d'expérience, la température à 2 mm de la surface exposée est 40 °C supérieur pour la hauteur inférieure par rapport à la hauteur supérieure. Lorsque le temps d'exposition au brûleur augmente, la température de la hauteur supérieure augmente plus rapidement que pour la hauteur inférieure. Après 20 minutes d'exposition, la température est plus élevée sur toute la profondeur de la hauteur supérieure et atteint 532 °C à 2 mm de profondeur pour la hauteur supérieure contre 473 °C pour la hauteur inférieure. Le flux mesuré sur une paroi non combustible a montré que le flux était le même (entre 33 et 35 kW.m⁻²) sur toute la hauteur, à 2,5 cm du coin. Les thermocouples sont disposés à 3 cm du coin, le flux à 2,5 et 3 cm du coin peuvent être considérés comme étant quasiment identiques et homogène sur toute la hauteur. En conséquence, l'augmentation de la température plus rapide en hauteur supérieure est dû au flux supplémentaire généré par la flamme du bois.

Les données de température permettent également de déduire l'avancement de la couche de charbon durant la dégradation du bois à partir de l'isotherme 300 °C comme déjà présenté dans le mémoire. Des essais complémentaires ont été réalisés, toujours avec une puissance de brûleur de 7,7 kW, pendant différents temps d'exposition (10, 15, 20 minutes) de façon à couper les échantillons et mesurer la position du front de charbon dans l'échantillon. Les échantillons ont été refroidis avec de l'eau de façon à limiter au maximum la pyrolyse dans le bois à la fin de l'essai. La figure C.6 compare l'évolution de la position du front de charbon après déduction de l'isotherme à 300 °C avec les mesures direct de l'épaisseur de charbon.

Les deux courbes sont très proches, signifiant que la mesure par thermocouples noyés peut à nouveau être validée avec ce dispositif expérimental qui génère cette fois-ci une agression thermique avec une flamme et non uniquement un flux radiatif. Le front de charbon atteint 4 mm de profondeur au bout de 5 min et 12 mm après 30 min d'essai.

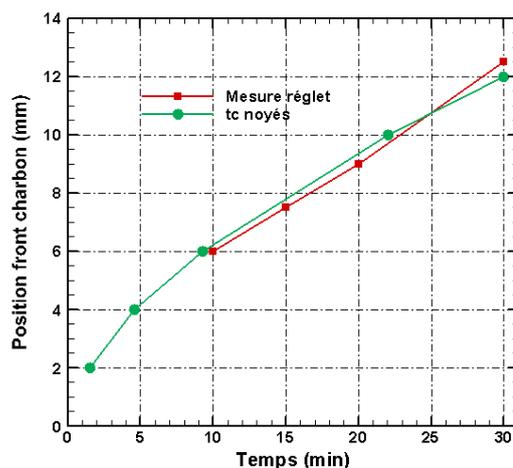


FIGURE C.6 – Comparaison du front de charbon déduit avec les thermocouples noyés et mesuré directement après les essais pour la hauteur inférieure.

C.2 Le SBI

Une quantité importante de données ont été enregistrées aussi bien pour les flux mesurés (22 points de mesure pour chaque puissance) que pour le comportement au feu de l'épicéa (22 essais SBI). Les résultats sont présentés dans les sous parties ci-dessous.

C.2.1 Mesure des flux reçus à la paroi sur la plaque non combustible

La taille de la flamme générée par le brûleur, et donc l'agression thermique sur l'éprouvette en bois sont accentuées lorsque le débit de gaz augmente. Il apparaît donc intéressant de cartographier cette agression thermique pour chaque débit de gaz imposé. Pour cela, le flux reçu à la paroi sera tout d'abord mesuré sur une plaque en silicate de calcium, considérée comme non combustible, à différentes positions. Cette plaque est percée à différentes positions afin d'y placer un fluxmètre refroidi (type Gardon) et de mesurer le flux reçu à la paroi. Les trous d'un diamètre égal au fluxmètre (3 cm) ne contenant pas le capteur sont bouchés afin de ne pas perturber l'écoulement de la flamme et par conséquent fausser les mesures. La figure C.7 présente une photo de la plaque de silicate de calcium disposée sur le SBI ainsi qu'un schéma de la position des trous permettant de placer le fluxmètre afin de mesurer le flux reçu au niveau de la paroi exposée au brûleur.

Le flux n'est mesuré que sur la petite aile avec, au total, 22 points de mesure allant de 15 à 105 cm selon la hauteur et de 0 à 40 cm selon la largeur. Une seconde plaque de silicate de calcium est placée sur la grande aile. Pour chaque puissance et points de mesure, le flux est enregistré pendant 2 minutes. Lors de l'allumage du brûleur, il faut attendre environ 30 secondes avant d'atteindre une valeur constante de la puissance souhaitée. En conséquence, la moyenne de la valeur du flux et son écart type ne sont calculés que pour les 90 s restantes. La fréquence d'acquisition étant de 5 Hz, la moyenne est réalisée

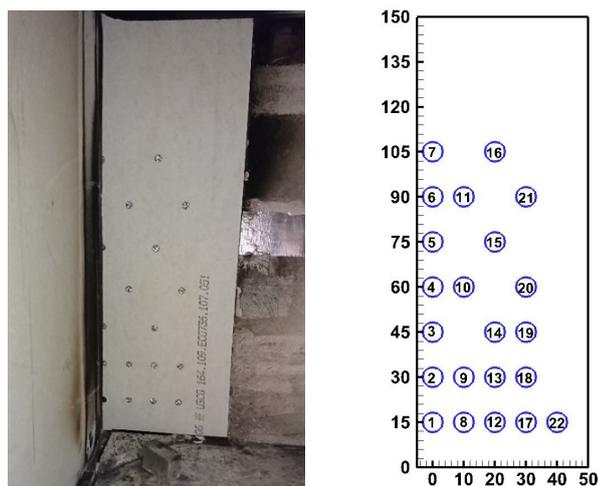


FIGURE C.7 – Photo de la plaque de silicate de calcium percée (à gauche) et schéma de la position des mesures de flux (à droite).

sur environ 365 mesures. La figure C.8 présente une cartographie des flux mesurés pour chaque puissance de brûleur.

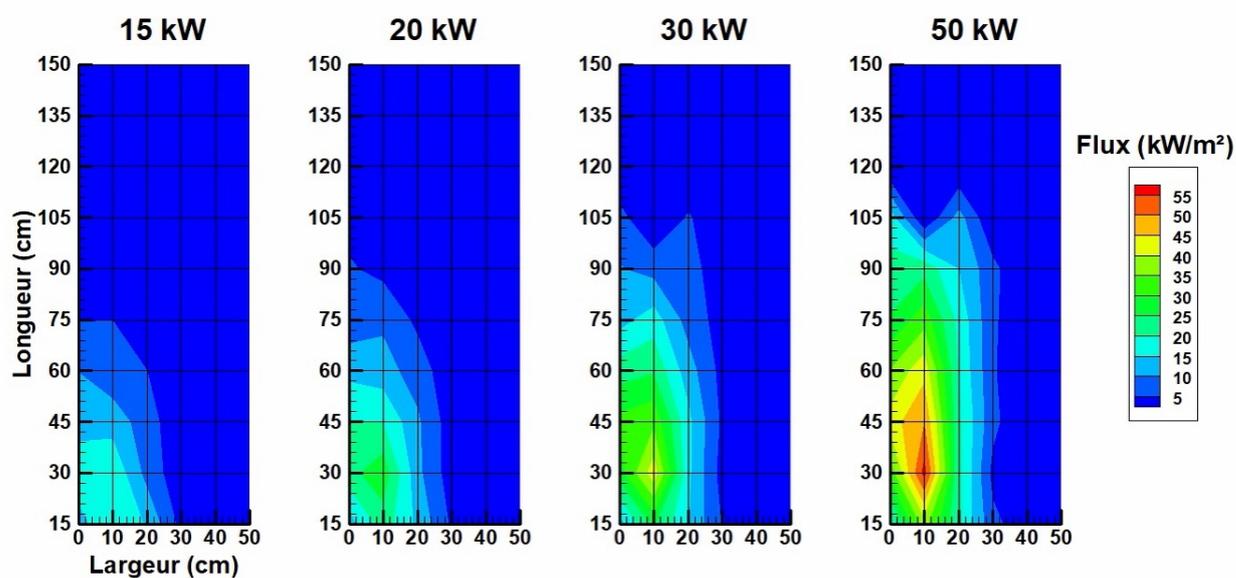


FIGURE C.8 – Cartographie des flux mesurés pour des puissances de brûleur allant de 15 à 50 kW sur une plaque incombustible.

Ces cartographies montrent que le flux reçu à la paroi augmente localement avec la puissance du brûleur. En effet, pour une puissance de 50 kW, le flux mesuré est au moins de $30 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ sur une zone s'étalant de 20 cm selon la largeur et 75 cm selon la hauteur. Ce flux n'est par exemple jamais mesuré pour une puissance de 15 kW. Au delà de 105 cm de hauteur et 30 cm de largeur, le flux mesuré ne dépasse pas les $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ quelle que soit la puissance imposée.

C.2.2 Comportement au feu des éprouvettes en bois

Dans la campagne d'essai au SBI, 22 tests ont été réalisés à différentes puissances (15, 20, 30 et 50 kW) pendant trois temps d'exposition (15, 20 et 30 minutes). Le flux généré par la flamme du bois, la surface dégradée, la température de surface, la température dans le matériau ou encore l'épaisseur de charbon seront présentés dans les parties ci-dessous.

Temps d'inflammation et d'extinction

Contrairement aux essais au cône calorimètre ou avec le panneau radiant, il est difficile de proposer un temps d'inflammation précis puisque la flamme émanant du brûleur est en contact direct avec le bois. L'apparition des flammes provenant du combustible se situe entre 30 et 60 s pour des puissances de 50 et 30 kW. Ce temps d'inflammation se situe à des temps tendant vers 2 minutes pour des puissances de 20 et 15 kW. Les hétérogénéités du bois présentes sur les ailes exposées au brûleur impactent sur le temps d'inflammation puisque les flammes "s'accrochent" à celles-ci. Par exemple, le temps d'inflammation pour des essais à 20 kW est aux alentours de 2 minutes. Un essai à cette puissance avec une plaque contenant de nombreuses imperfections (la surface n'est pas lisse et contient des fragments de bois qui sortent de celle-ci) conduit à un temps d'inflammation de 45 secondes, soit un temps 2,7 fois inférieur aux essais sans imperfection. L'état de surface a donc un impact sur le temps d'inflammation tout particulièrement si l'agression thermique est une flamme qui vient en contact avec les échantillons.

Tout comme les essais au cône, lorsque le brûleur est éteint, l'extinction des échantillons est rapide. Le temps d'extinction varie entre 8 secondes pour la plupart des essais et 60 secondes lorsque des flammèches persistent. Ces flammèches sont entretenues généralement au niveau des zones qui sont en cours de dégradation et qui dépendent donc de la propagation latérale des flammes sur les échantillons. La durée d'exposition ne fait pas varier le temps d'extinction.

Flux généré par l'éprouvette

Lors de quatre tests, le même fluxmètre refroidi utilisé section C.2.1 a été placé à une position (position 9 en annexe C.7, soit à une hauteur de 30 cm et une largeur de 10 cm par rapport au coin) afin de mesurer le flux sur une paroi combustible pour quatre tests à quatre puissances différentes (15, 20, 30 et 50 kW). Le flux étant mesuré préalablement à cette position sur une plaque non combustible, il est possible de comparer le flux reçu par l'échantillon en présence de la flamme produite par la combustion du bois et sans celle-ci. Le tableau C.1 présente les valeurs des flux générés par la flamme en fonction de la puissance imposée. La moyenne des flux est réalisée sur 15 minutes d'essai.

TABLEAU C.1 – Valeurs moyennes et écarts-types des flux enregistrés en fonction de la puissance du brûleur. Le terme “flux brûleur” désigne le flux mesuré avec la paroi non combustible tandis que le terme “flux bois” représente le flux mesuré avec la plaque en bois.

Puissance (kW)	15	20	30	50
Flux brûleur (kW.m ²)	19 ± 1,8	28,3 ± 2,1	43 ± 3,3	56,8 ± 3
Flux bois (kW.m ²)	35,3 ± 4	42.5 ± 2	50.4 ± 2,7	58.6 ± 1,7
Différence entre les flux (kW.m ²)	16,3	14,2	7,4	1,8

Le tableau montre que le flux total mesuré à une même position augmente avec la puissance de brûleur imposée. En revanche, le flux supplémentaire mesuré avec la présence de bois diminue avec la puissance imposée. En effet, la combustion de bois lorsqu'une puissance de 15 kW est imposée conduit à une augmentation du flux de 85 % en paroi tandis que que cette augmentation n'est que de 3 % pour une puissance de 50 kW. À cette position, le flux généré par la flamme de la paroi en bois pour une puissance de 50 kW semble être négligeable devant le flux produit par la puissance du brûleur. La faible contribution de la flamme provenant du combustible lorsque la puissance imposée par le brûleur est de 50 kW peut être due à l'épaisseur optique importante de la flamme provenant du brûleur. L'émission de celle-ci tend vers celle d'un corps noir. Le flux total local est donc par conséquent déjà quasiment maximal même en l'absence du combustible (ajouter une flamme à une température T devant un corps noir à une température T n'augmente pas le flux reçu).

Surface de bois dégradée

L'aspect des éprouvettes après essai montre que la puissance imposée joue un rôle important sur la dégradation du bois. La figure C.9 montre quatre éprouvettes exposées à 15, 20, 30 et 50 kW, après une durée d'exposition de 15 minutes. Pour un même temps d'exposition, la quantité de bois restée vierge diminue avec la puissance imposée.



FIGURE C.9 – Photos d'éprouvettes après 15 minutes d'essai exposées à différentes puissances de brûleur.

En observant de plus près les échantillons, il est possible d'établir trois zones de dégradation : une zone proche de l'angle droit formé par les ailes, très dégradée comportant de large fissures (zone A), une zone peu dégradée, la plus éloignée du brûleur, sans fissure (zone C) et une zone se trouvant entre les deux avec de petites fissures montrant un début de dégradation (zone B). Ces trois zones sont mesurées pour chaque aile tous les 20 cm (selon la hauteur) et peuvent être représentées pour chaque éprouvette. La figure C.10 met en évidence les zones A, B et C sur une éprouvette ainsi que la représentation de ces zones après les avoir mesurées tout le long des plaques.

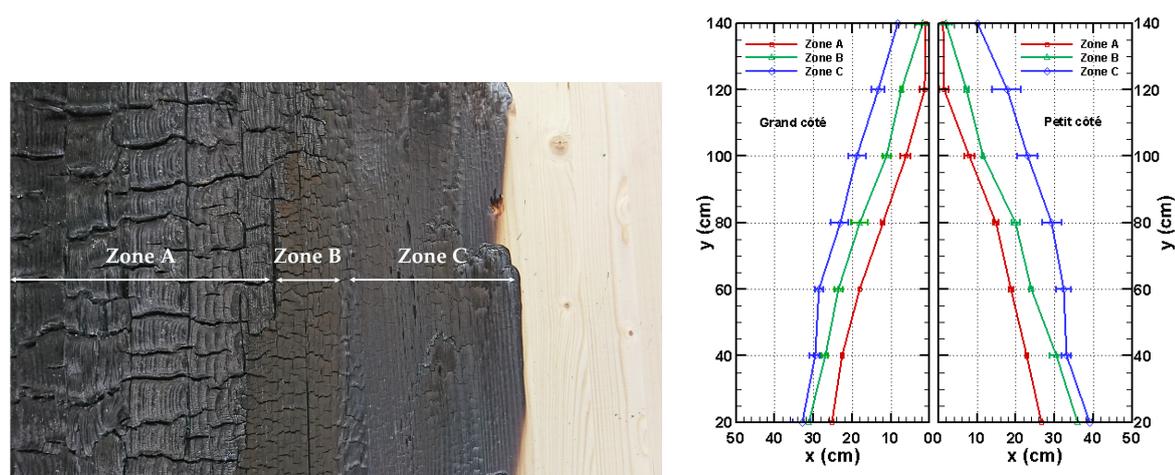


FIGURE C.10 – Détermination des zones de dégradation des échantillons de bois après essai.

L'exemple des zones de dégradation illustrées figure C.10 est une moyenne de trois essais à 20 kW pendant 30 minutes. Les mesures effectuées afin de déterminer les trois zones de dégradation ont montré que la disparité était importante en particulier pour les zones B et C. En revanche, la zone A, la plus dégradée contient des disparités faibles et donc répétables. Les données présentées qui suivront seront celles de la zone A. La figure C.11 présente deux représentations de l'évolution de la zone A pour les deux temps d'exposition fixés.

Pour un temps fixé, la taille de la zone très dégradée augmente avec la puissance du brûleur. Cette figure révèle également que la dégradation est différente entre la petite et la grande aile. Cette observation était déjà visible au vue des photos des éprouvettes. L'étude de la profondeur de carbonisation permettra de confirmer cette observation qui de manière générale montre que la petite aile est plus sollicitée par la flamme du brûleur que la grande. Il est également possible de déterminer la surface très dégradée de chaque éprouvette en calculant l'aire sous les courbes de la figure C.11. La figure C.12 permet d'observer l'évolution de la zone A en fonction de la puissance imposée. Pour un temps d'exposition fixé, la surface très dégradée augmente quasi-linéairement avec la puissance du brûleur. La dégradation est quasiment doublée lorsque la puissance est multipliée par deux. Pour une puissance de 30 kW, la surface de la zone A passe en moyenne de 2559 cm² à 3045 cm², soit un accroissement d'environ 20 % lorsque le temps est doublé. Le pourcentage de surface dégradée passe de 15 % à 30 % lorsque le temps est doublé pour des

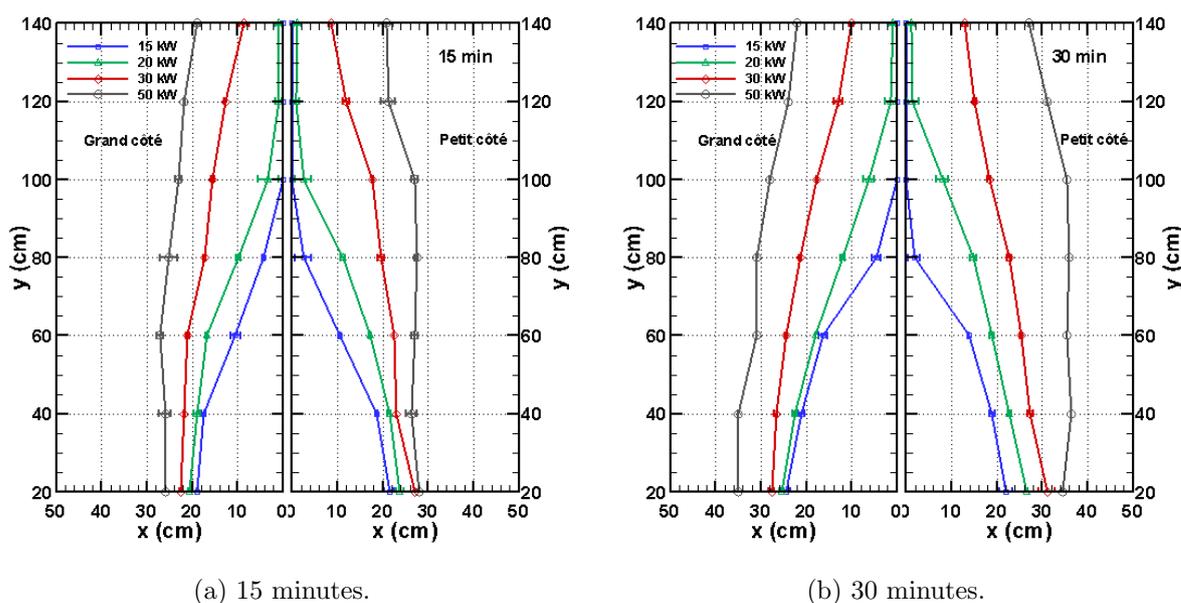


FIGURE C.11 – Évolution de la zone très dégradée pour différentes puissances de brûleur à deux temps d'exposition.

puissances de 15 kW à 50 kW respectivement. Ce qui signifie que la propagation latérale de la surface très dégradée n'augmente pas linéairement avec le temps d'exposition et dépend de la puissance du brûleur.

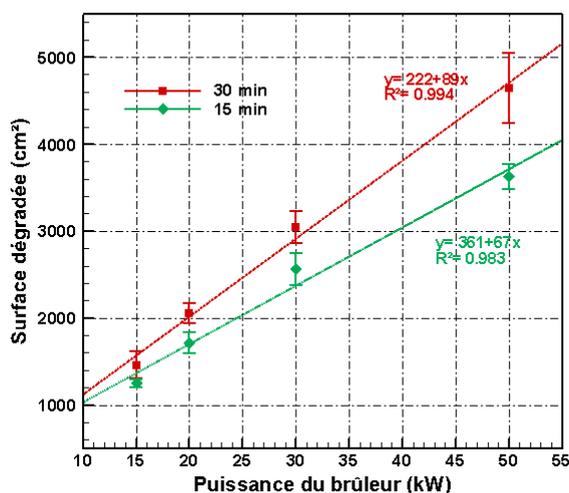


FIGURE C.12 – Évolution de la zone très dégradée en fonction de la puissance du brûleur.

Température dans le matériau

Un des objectifs de l'étude à cette échelle consiste mesurer l'évolution de la température à l'intérieur du bois pendant les essais. Une série de trois tests a été réalisée avec des éprouvettes équipées de 12 thermocouples noyés. L'usinage du bois est identique à celui

présenté lors des tests au cône calorimètre (section 2.3.3) à savoir : découpe des échantillons, rabotage des faces qui contiendront les thermocouples, rainurage le long des faces, disposition et soudure des thermocouples de 0,1 mm de diamètre puis collage. Cet usinage étant d'environ quatre heures par éprouvette, la température n'est étudiée seulement pour la petite aile à une hauteur fixée à 45 cm. Les soudures des thermocouples sont disposées à 9 cm du coin, à une localisation qui devrait être très sollicitée par la flamme du brûleur. La figure C.13 est un schéma qui permet de visualiser la position des thermocouples dans le bois.

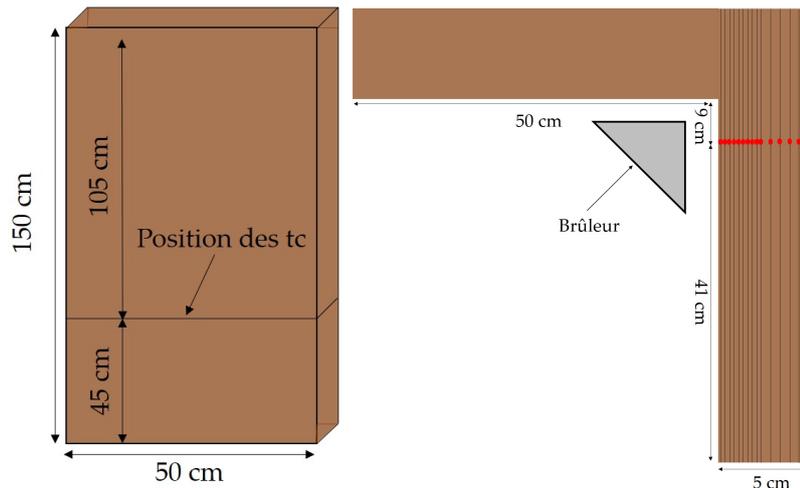
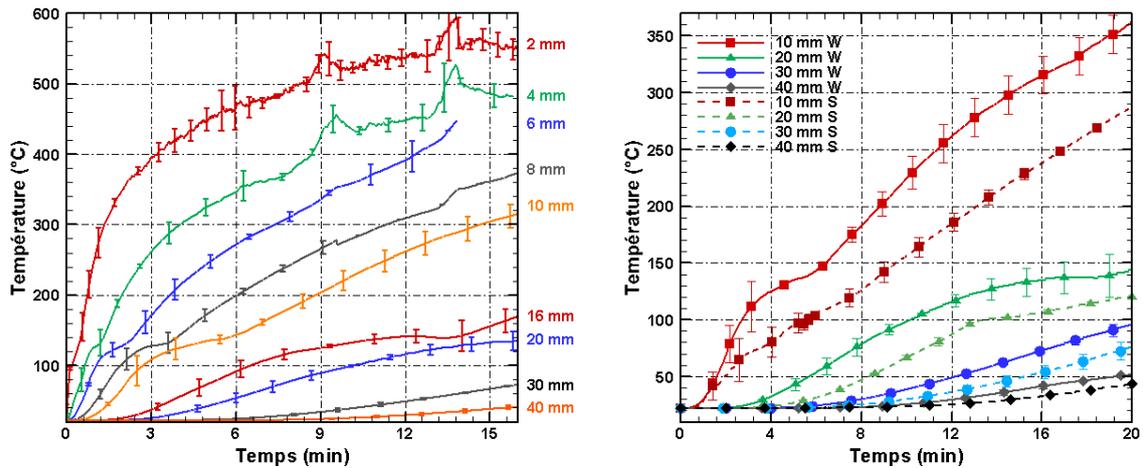


FIGURE C.13 – Schémas de la position des thermocouples dans l'éprouvette : selon la hauteur (à gauche) et dans le matériau (à droite).

Les points rouges du schéma (à droite) correspondent à la position des soudures des thermocouples où les mesures de températures sont réalisées. Dix thermocouples sont placés tous les deux millimètres de 2 à 20 mm de profondeur par rapport à la surface exposée, suivi de deux thermocouples implantés à 30 et 40 mm de profondeur. Afin de comparer les évolutions de température dans le bois, des thermocouples gainés de 1 mm de diamètre ont été placés à des profondeurs de 10, 20, 30 et 40 mm. Les capteurs sont placés après perçage (foret de 1,5 mm de diamètre) de la face non exposée des éprouvettes. Les essais ont été effectués pour une puissance de 30 kW sur trois petites ailes. Cependant, les résultats présentés ci-dessous ne regroupent que deux essais suite à un incident technique sur le troisième test. En effet, le mauvais collage suite à l'usinage de la petite aile a créé une fissure importante entraînant une erreur importante dans les mesures. La figure C.14a met en évidence l'évolution de la température à différentes profondeurs.

La température proche de la surface exposée au brûleur augmente rapidement avant d'atteindre une deuxième phase croissance moins rapide. La température maximale s'élève à 600 °C. Deux pics sont présents à 2 et 4 mm à 9 et 14 minutes probablement dû à l'apparition de zone incandescente proche du capteur de mesure. Il est possible d'observer une inflexion aux alentours des 120 °C, également présente sur les essais à d'autres échelles. Cette inflexion est dû à l'évaporation de l'eau. La température à 40 mm atteint 40 °C après seize minutes d'essai. La figure C.14b présente les thermogrammes en fonction de l'im-



(a) Thermogrammes obtenus avec des thermocouples noyés.

(b) Comparaison de l'implantation des thermocouples.

FIGURE C.14 – Évolution de la température dans le bois à différentes profondeurs pour une puissance de 30 kW. Dans la légende, le “S” (pour “Sheathed”) représente les thermocouples gainés (traits pointillés) et “W” (pour “Wire”) les thermocouples non gainés (traits pleins)

plantation des thermocouples. Les représentations des courbes de température montrent des différences de mesure en fonction de l'implantation des capteurs à des profondeurs pourtant éloignées de la surface exposée. La température finale à 10 mm de profondeur est de 360 °C pour les thermocouples noyés contre 285 °C pour les thermocouples gainés, soit une différence de 75 °C. Les 300 °C sont atteints à 10 mm de profondeur au bout de 14 minutes d'essai pour les thermocouples noyés et ne sont pas atteints après 20 minutes d'essai pour les thermocouples gainés. Les différences sont moins présentes à 20, 30 et 40 mm de profondeur. Ces essais montrent encore une fois que l'implantation des thermocouples est importante concernant la mesure de température dans le bois.

Comparaison entre l'isotherme à 300 °C et le front de carbonisation pour les essais SBI

Les éprouvettes sont découpées tous les 5 cm dans la longueur de façon à mesurer la couche de charbon et à cartographier la proportion de bois dégradé sur toute une plaque de bois selon la puissance et le temps d'exposition au brûleur. La figure C.15 compare le front de carbonisation ainsi que la vitesse de carbonisation mesuré par réglet après découpage du bois et déduit avec l'isotherme à 300 °C des thermocouples noyés. La mesure directe, par réglet, est effectuée à l'endroit où se situaient les thermocouples (figure C.13).

La superposition des courbes à partir de 15 minutes d'exposition montre que la mesure de température par thermocouples noyés peut à nouveau être validé. En effet, l'isotherme à 300 °C prédit précisément le front de charbon mesuré après essai à une même position. Le front de charbon atteint 10,5 et 18 mm après 15 et 30 minutes respectivement. Cela

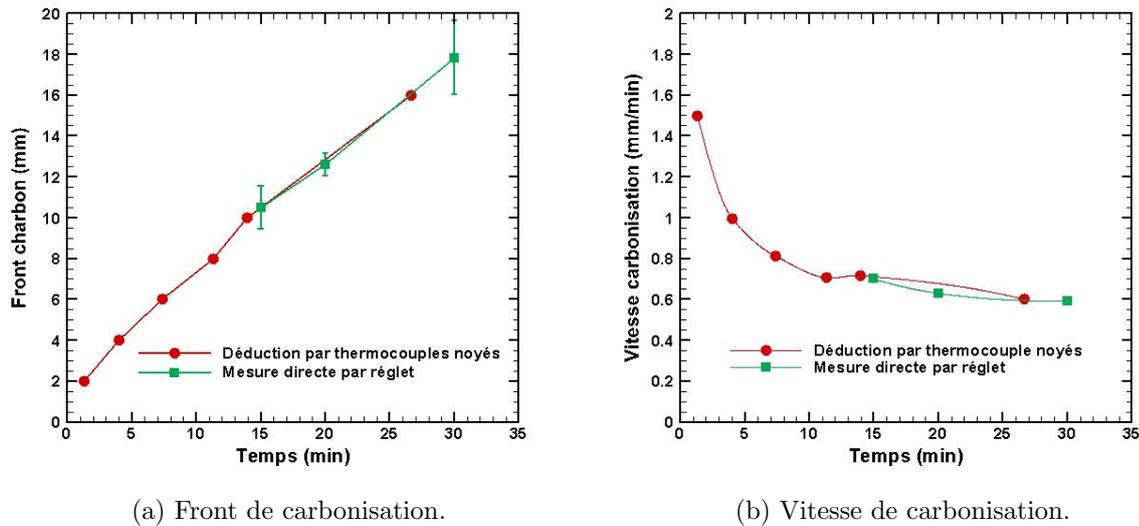


FIGURE C.15 – Front de carbonisation et vitesse de carbonisation déduit de l'isotherme à 300 °C et mesuré par réglet à la position des thermocouples noyés pour une puissance de 30 kW.

montre que l'avancée du front de charbon n'est pas constante et a tendance à diminuer dans le temps.

La vitesse de carbonisation permet de confirmer que l'implantation des thermocouples prédit correctement la vitesse de carbonisation. Tout comme pour les essais cône, l'allure de la courbe montre que cette vitesse n'est pas constante tout au long de l'exposition au brûleur. Elle débute à $1,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ et décroît rapidement jusqu'à $0,7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ au bout de 10 minutes d'exposition. La vitesse est ensuite quasi constante entre $0,6$ et $0,7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Mesure du front de charbon

Avant de comparer les profondeurs de charbon en fonction des paramètres fixés tels que la puissance, le temps d'exposition ou la localisation sur la plaque, il est intéressant d'observer les différences possibles qu'il peut exister entre la petite et la grande aile sur la quantité de bois dégradée. La figure C.16 met en évidence la profondeur de charbon à une hauteur de 60 cm, pour une puissance de 30 kW.

Cette courbe confirme les observations de Zeinali *et al.* [132] concernant la différence d'agression entre la petite et la grande aile. En effet, la courbe de profondeur de charbon de la petite aile est supérieure à celle de la grande aile, confirmant ainsi une agression par la flamme du brûleur plus importante sur la petite aile. Cette observation est présente pour toutes les profondeurs de charbon.

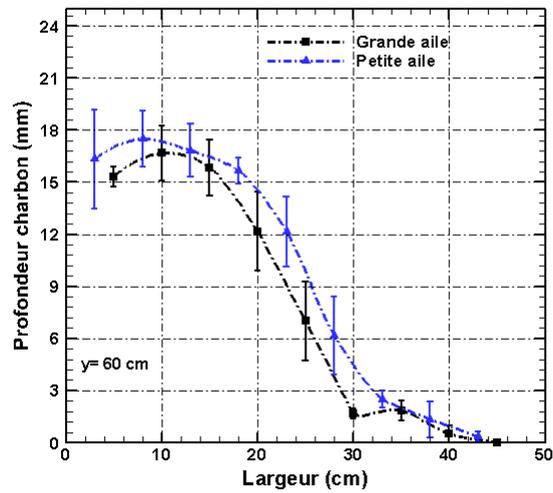


FIGURE C.16 – Comparaison de la couche de charbon entre la petite et la grande aile après une exposition de 30 minutes à une puissance de brûleur de 30 kW.

Bibliographie

- [1] M. H. Ramage, H. Burrige, M. Busse-Wicher, G. Fereday, T. Reynolds, D. U. Shah, G. Wu, L. Yu, P. Fleming, D. Densley-Tingley, *et al.*, “The wood from the trees : The use of timber in construction,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 333–359, 2017.
- [2] N. EN, “13823 : 2013 reaction to fire tests for building products—building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item,” *AFNOR, ICS*, vol. 13, p. 50, 2002.
- [3] D. Bauprodukte, E. K. I. D. Deutsche, and S. D. R. B. Allemande, “European fire classification of construction products, new test method “SBI”, and introduction of the european classification system into german building regulations,” *Otto-Graf-Journal*, vol. 16, p. 151, 2005.
- [4] A. Bartlett, F. Wiesner, R. Hadden, L. Bisby, B. Lane, A. Lawrence, P. Palma, and A. Frangi, “Needs for total fire engineering of mass timber buildings,” in *Proceedings of the 14th World Conference on Timber Engineering, TU Wien*, 2016.
- [5] B. A.-L. Östman and E. Mikkola, “European classes for the reaction to fire performance of wood-based panels,” *Fire and materials*, vol. 34, no. 6, pp. 315–330, 2010.
- [6] V. Babrauskas, “Ignition of wood : a review of the state of the art,” *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 163–189, 2002.
- [7] D. A. Tillman, *Wood Combustion : Principle, processes, and economics*. Elsevier, 2012.
- [8] X. Zhou, *Contribution à l’étude de l’incinération des déchets urbains : expérimentation en réacteur à lit fixe à contre courant, approche théorique du déplacement du front d’inflammation*. PhD thesis, Poitiers, 1994.
- [9] F. Mermoud, *Gazéification de charbon de bois à la vapeur d’eau : de la particule isolée au lit fixe continu*. PhD thesis, INPT, 2006.
- [10] B. Batiot, P. Boulet, A. Cablé, K. Chetehouna, A. Coppalle, A. Collin, J.-P. Garo, D. Morvan, F. Richard, T. Rogeaume, *et al.*, “Mécanismes, enjeux et verrous scien-

- tifiques intervenant dans les incendies de grande ampleur. le cas de la cathédrale notre-dame de paris.”
- [11] M. J. Spearpoint, *Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model*. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, Maryland, 1999.
- [12] A. M. Kanury and P. L. Blackshear Jr, “Some considerations pertaining to the problem of wood-burning,” *Combustion Science and Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 339–356, 1970.
- [13] A. Roberts, “The heat of reaction during the pyrolysis of wood,” *Combustion and Flame*, vol. 17, no. 1, pp. 79–86, 1971.
- [14] X. Deglise and A. Donnot, “Bois énergie,” *Techniques de l’ingénieur. Génie énergétique*, no. BE8535, 2004.
- [15] J. Repola, “Models for vertical wood density of scots pine, norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density,” 2006.
- [16] A. Roberts, “Problems associated with the theoretical analysis of the burning of wood,” in *Symposium (international) on combustion*, vol. 13, pp. 893–903, Elsevier, 1971.
- [17] B. Suleiman, J. Larfeldt, B. Leckner, and M. Gustavsson, “Thermal conductivity and diffusivity of wood,” *Wood science and technology*, vol. 33, no. 6, pp. 465–473, 1999.
- [18] M. Gupta, J. Yang, and C. Roy, “Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles,” *Fuel*, vol. 82, no. 8, pp. 919–927, 2003.
- [19] J. Froidevaux and P. Navi, “Aging law of spruce wood,” *Wood Material Science & Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 46–52, 2013.
- [20] K. Kránitz, W. Sonderegger, C.-T. Bues, and P. Niemz, “Effects of aging on wood : a literature review,” *Wood science and technology*, vol. 50, no. 1, pp. 7–22, 2016.
- [21] B. Günther, K. Gebauer, R. Barkowski, M. Rosenthal, and C.-T. Bues, “Calorific value of selected wood species and wood products,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 5, pp. 755–757, 2012.
- [22] T. Hosoya, H. Kawamoto, and S. Saka, “Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 2, pp. 328–336, 2007.
- [23] A. H. Buchanan and A. K. Abu, *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons, 2017.

-
- [24] K. L. Friquin, "Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber," *Fire and materials*, vol. 35, no. 5, pp. 303–327, 2011.
- [25] I. S. Wichman and A. Atreya, "A simplified model for the pyrolysis of charring materials," *Combustion and Flame*, vol. 68, no. 3, pp. 231–247, 1987.
- [26] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons, 2011.
- [27] R. H. White and M. Dietenberger, "Wood products : thermal degradation and fire," *Encyclopedia of materials : science and technology. [SI] : Elsevier Science Ltd, c2001 : Pages 9712-9716*, 2001.
- [28] L. Yang, X. Chen, X. Zhou, and W. Fan, "The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux," *Combustion and Flame*, vol. 133, no. 4, pp. 407–413, 2003.
- [29] F. L. Browne *et al.*, "Theories of the combustion of wood and its control," 1958.
- [30] D. Shen, M. Fang, Z. Luo, and K. Cen, "Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux," *Fire Safety Journal*, vol. 42, no. 3, pp. 210–217, 2007.
- [31] D. Shen and S. Gu, "The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products," *Bioresource technology*, vol. 100, no. 24, pp. 6496–6504, 2009.
- [32] T. Ohlemiller, T. Kashiwagi, and K. Werner, "Wood gasification at fire level heat fluxes," *Combustion and Flame*, vol. 69, no. 2, pp. 155–170, 1987.
- [33] A. Bartlett, R. Hadden, L. Bisby, and A. Law, "Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to non-standard heating conditions," *Fire and Materials*, 2015.
- [34] H. Thomson, D. Drysdale, and C. L. Beyler, "An experimental evaluation of critical surface temperature as a criterion for piloted ignition of solid fuels," *Fire Safety Journal*, vol. 13, no. 2-3, pp. 185–196, 1988.
- [35] K.-C. Tsai, "Orientation effect on cone calorimeter test results to assess fire hazard of materials," *Journal of hazardous materials*, vol. 172, no. 2-3, pp. 763–772, 2009.
- [36] G. T. Linteris, L. Gewuerz, K. B. McGrattan, and G. P. Forney, "Modeling solid sample burning," *Fire Safety Science*, vol. 8, pp. 625–636, 2005.
- [37] V. Babrauskas and W. J. Parker, "Ignitability measurements with the cone calorimeter," *Fire and materials*, vol. 11, no. 1, pp. 31–43, 1987.
- [38] D. Shen, M. Fang, and W. Chow, "Ignition of wood-based materials by thermal radiation," *Int. J. Eng. Perform.-Based Fire Codes*, vol. 8, pp. 69–83, 2006.

-
- [39] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, and L. A. Bisby, “A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction,” *Fire Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 1–49, 2019.
- [40] S. Roblin, *Etude numérique de l’auto-inflammation des solides par simulation numérique directe : application au polyméthacrylate de méthyle*. PhD thesis, 2016.
- [41] N. Boonmee and J. Quintiere, “Glowing ignition of wood : the onset of surface combustion,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 2, pp. 2303–2310, 2005.
- [42] L. Shi and M. Y. L. Chew, “Experimental study of woods under external heat flux by autoignition,” *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 111, no. 2, pp. 1399–1407, 2013.
- [43] Y. Lizhong, Z. Yupeng, W. Yafei, and G. Zaifu, “Predicting charring rate of woods exposed to time-increasing and constant heat fluxes,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 81, no. 1, pp. 1–6, 2008.
- [44] M. J. DiDomizio, P. Mulherin, and E. J. Weckman, “Ignition of wood under time-varying radiant exposures,” *Fire Safety Journal*, vol. 82, pp. 131–144, 2016.
- [45] I. Vermesi, M. J. DiDomizio, F. Richter, E. J. Weckman, and G. Rein, “Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation : Experiments and a-priori predictions,” *Fire safety journal*, vol. 91, pp. 218–225, 2017.
- [46] C. Zhai, J. Gong, X. Zhou, F. Peng, and L. Yang, “Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under time-dependent heat flux,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 125, pp. 100–108, 2017.
- [47] J. Torero, “Flaming ignition of solid fuels,” in *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 633–661, Springer, 2016.
- [48] P. Cremona, *Caractérisation expérimentale et numérique des scénarii de feu impliquant un conduit de fumée d’appareils de combustion bois*. PhD thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique-Poitiers, 2017.
- [49] T. Kashiwagi, T. Ohlemiller, and K. Werner, “Effects of external radiant flux and ambient oxygen concentration on nonflaming gasification rates and evolved products of white pine,” *Combustion and Flame*, vol. 69, no. 3, pp. 331–345, 1987.
- [50] I. 5660-1, “Reaction-to-fire tests-heat release, smoke production and mass loss rate-part 1 : heat release rate (cone calorimeter method),” 2002.
- [51] H. Hottel and G. Wilkes, “Wood flammability under various conditions of irradiation,” *OSRD Publication*, no. 432, 1942.

-
- [52] T. Shields, G. Silcock, and J. Murray, “The effects of geometry and ignition mode on ignition times obtained using a cone calorimeter and ISO ignitability apparatus,” *Fire and materials*, vol. 17, no. 1, pp. 25–32, 1993.
- [53] N. Boonmee and J. Quintiere, “Glowing and flaming autoignition of wood,” *Proceedings of the combustion institute*, vol. 29, no. 1, pp. 289–296, 2002.
- [54] J. G. Quintiere, “Fundamentals of fire phenomena,” 2006.
- [55] J. G. Quintiere, *Principles of fire behavior*. CRC Press, 2016.
- [56] R. Bilbao, J. F. Mastral, J. A. Lana, J. Ceamanos, M. E. Aldea, and M. Betrán, “A model for the prediction of the thermal degradation and ignition of wood under constant and variable heat flux,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 62, no. 1, pp. 63–82, 2002.
- [57] M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, “Flammability properties for charring materials,” *Fire Safety Journal*, vol. 38, no. 3, pp. 219–228, 2003.
- [58] P. Reszka and J. Torero, “In-depth temperature measurements in wood exposed to intense radiant energy,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, no. 7, pp. 1405–1411, 2008.
- [59] M. Spearpoint and J. Quintiere, “Predicting the burning of wood using an integral model,” *Combustion and Flame*, vol. 123, no. 3, pp. 308–325, 2000.
- [60] J. G. Quintiere, “A semi-quantitative model for the burning rate of solid materials,” *Fire Safety Science*, vol. 1, pp. 3–25, 1992.
- [61] A. Atreya and M. Abu-Zaid, “Effect of environmental variables on piloted ignition,” *Fire Safety Science*, vol. 3, pp. 177–186, 1991.
- [62] T. Harada, “Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test,” *Fire and materials*, vol. 25, no. 4, pp. 161–167, 2001.
- [63] J. Mehaffey, “Fire dynamics i : ignition and burning of solids, lecture notes,” *Ottawa : Carleton University*, 2002.
- [64] H. C. Tran and R. H. White, “Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter,” *Fire and materials*, vol. 16, no. 4, pp. 197–206, 1992.
- [65] R. Fahrni, J. Schmid, M. Klippel, and A. Frangi, “Correct temperature measurements in fire exposed wood,” in *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2018)*, pp. MAT–O9, ETH Zurich, Institute of Structural Engineering (IBK), 2018.
- [66] J. Fangrat, Y. Hasemi, M. Yoshida, and T. Hirata, “Surface temperature at ignition of wooden based slabs,” *Fire Safety Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 249–259, 1996.

-
- [67] J. Urbas and W. J. Parker, "Surface temperature measurements on burning wood specimens in the cone calorimeter and the effect of grain orientation," *Fire and materials*, vol. 17, no. 5, pp. 205–208, 1993.
- [68] P. Boulet, D. Brissinger, A. Collin, Z. Acem, and G. Parent, "On the influence of the sample absorptivity when studying the thermal degradation of materials," *Materials*, vol. 8, no. 8, pp. 5398–5413, 2015.
- [69] M. Försth and A. Roos, "Absorptivity and its dependence on heat source temperature and degree of thermal breakdown," *Fire and Materials*, vol. 35, no. 5, pp. 285–301, 2011.
- [70] B. Monod, A. Collin, G. Parent, and P. Boulet, "Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires," *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 88–95, 2009.
- [71] M. Chaos, "Spectral aspects of bench-scale flammability testing : application to hardwood pyrolysis," *Fire Safety Science*, vol. 11, pp. 165–178, 2014.
- [72] T. Fateh, *Etude expérimentale et numérique de la cinétique de décomposition thermique de contreplaqués en bois*. PhD thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique-Poitiers, 2011.
- [73] G. Gerandi, V. Tihay-Felicelli, P.-A. Santoni, V. Leroy-Cancellieri, and D. Cancellieri, "Multi-scale modelling of wood degradation using thermally thin wood plates," in *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 1107, 2018.
- [74] V. Papadogianni, A. Romeos, A. Giannadakis, K. Perrakis, and T. Panidis, "Cone calorimeter and thermogravimetric analysis of glass phenolic composites used in aircraft applications," *Fire Technology*, pp. 1–33, 2019.
- [75] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis," *Fuel*, vol. 86, no. 12-13, pp. 1781–1788, 2007.
- [76] K. Li, D. S. Pau, J. Wang, and J. Ji, "Modelling pyrolysis of charring materials : determining flame heat flux using bench-scale experiments of medium density fibreboard (MDF)," *Chemical engineering science*, vol. 123, pp. 39–48, 2015.
- [77] B. Chorlton and J. Gales, "Fire performance of cultural heritage and contemporary timbers," *Engineering Structures*, vol. 201, p. 109739, 2019.
- [78] P. C. R. Collier, *Charring rates of timber*. Building Research Association of New Zealand, 1992.
- [79] T. Lie, "Structural fire protection," American Society of Civil Engineers, 1992.

-
- [80] Q. Xu, L. Chen, K. A. Harries, F. Zhang, Q. Liu, and J. Feng, “Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests,” *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 416–427, 2015.
- [81] R. H. White and M. A. Dietenberger, “Fire safety,” *Wood handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113 : Pages 17.1-17.16*, vol. 113, 1999.
- [82] R. Maciulaitis, D. Lipinskas, and K. Lukosius, “Singularity and importance of determination of wood charring rate in fire investigation,” *Materials Science*, vol. 12, no. 1, pp. 42–47, 2006.
- [83] J. M. Njankouo, J.-C. Dotreppe, and J.-M. Franssen, “Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods,” *Fire and materials*, vol. 28, no. 1, pp. 15–24, 2004.
- [84] C. Butler, “Notes on charring rates in wood,” *Fire Safety Science*, vol. 896, pp. 1–1, 1971.
- [85] E. Mikkola, “Charring of wood based materials,” *Fire Safety Science*, vol. 3, pp. 547–556, 1991.
- [86] E. L. Schaffer, “Charring rate of selected woods—transverse to grain.,” tech. rep., Forest Products Lab Madison Wis, 1967.
- [87] Y. Lizhong, G. Zaifu, Z. Yupeng, and F. Weicheng, “The influence of different external heating ways on pyrolysis and spontaneous ignition of some woods,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 1, pp. 40–45, 2007.
- [88] A. Frangi and M. Fontana, “Charring rates and temperature profiles of wood sections,” *Fire and Materials*, vol. 27, no. 2, pp. 91–102, 2003.
- [89] R. H. White and H. C. Tran, “Charring rate of wood exposed to a constant heat flux,” in *Wood and fire safety : 3rd International Scientific Conference : proceedings, May 6-9, 1996, The High Tatras, Slovak Republic.[Zvolen, Slovak Republic] : Technical University of Zvolen, Faculty of Wood Technology, 1996. : p. 175-183.*, 1996.
- [90] J. Urbas, W. J. Parker, and G. E. Luebbers, “Surface temperature measurements on burning materials using an infrared pyrometer : accounting for emissivity and reflection of external radiation,” *Fire and materials*, vol. 28, no. 1, pp. 33–53, 2004.
- [91] G. Parent, G. Erez, A. Collin, M. Suzanne, A. Thiry-Muller, M. Weber, E. Faure, and P. Boulet, “Spectral radiation emitted by kerosene pool fires,” *Fire Safety Journal*, vol. 108, p. 102847, 2019.

-
- [92] G. Parent, Z. Acem, S. Lechêne, and P. Boulet, "Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, no. 3, pp. 555–562, 2010.
- [93] Z. Acem, D. Brissinger, A. Collin, G. Parent, P. Boulet, T. H. Y. Quach, B. Batiot, F. Richard, and T. Rogaume, "Surface temperature of carbon composite samples during thermal degradation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 112, pp. 427–438, 2017.
- [94] C. Bedon and M. Fragiaco, "Fire resistance of thermally insulated log-house timber walls," *Fire Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 307–341, 2019.
- [95] R. Fahrni, J. Schmid, M. Klippel, and A. Frangi, "Investigation of different temperature measurement designs and installations in timber members as low conductive material," in *10th International Conference on Structures in Fire (SiF 2018)*, pp. 257–264, Belfast, United Kingdom, 2018.
- [96] I. ISO, "834 : Fire resistance tests-elements of building construction," *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, 1999.
- [97] J. V. Beck, "Thermocouple temperature disturbances in low conductivity materials," 1962.
- [98] W. D. Brewer, "Effect of thermocouple wire size and configuration on internal temperature measurements in a charring ablator," *NASA TN D-3812, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Langley Station, Hampton, Virginia*, 1967.
- [99] E. Hugi, M. Wuersch, W. Risi, and K. G. Wakili, "Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species," *Journal of wood science*, vol. 53, no. 1, pp. 71–75, 2007.
- [100] E. C. Peck *et al.*, "Moisture content of wood in dwellings," 1932.
- [101] B. Moghtaderi, V. Novozhilov, D. Fletcher, and J. Kent, "A new correlation for bench-scale piloted ignition data of wood," *Fire safety journal*, vol. 29, no. 1, pp. 41–59, 1997.
- [102] M. Janssens, "Piloted ignition of wood : a review," *Fire and Materials*, vol. 15, no. 4, pp. 151–167, 1991.
- [103] M. L. Janssens and R. H. White, "Temperature profiles in wood members exposed to fire," *Fire and Materials*, vol. 18, no. 4, pp. 263–265, 1994.
- [104] C. Di Blasi, E. G. Hernandez, and A. Santoro, "Radiative pyrolysis of single moist wood particles," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 39, no. 4, pp. 873–882, 2000.

-
- [105] R. Bilbao, J. Mastral, M. Aldea, J. Ceamanos, M. Betran, and J. Lana, “Experimental and theoretical study of the ignition and smoldering of wood including convective effects,” *Combustion and flame*, vol. 126, no. 1-2, pp. 1363–1372, 2001.
- [106] M. Cedering, “Effect on the charring rate of wood in fire due to oxygen content, moisture content and wood density,” in *4th International Workshop on Structures in Fire. Averio, Portugal. 2006*, Universidade de Averio, 2006.
- [107] T. Ohlemiller, “Smoldering combustion propagation on solid wood,” *Fire Safety Science*, vol. 3, pp. 565–574, 1991.
- [108] M. A. Delichatsios, “Piloted ignition times, critical heat fluxes and mass loss rates at reduced oxygen atmospheres,” *Fire Safety Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 197–212, 2005.
- [109] J. Zicherman and R. Williamson, “Microstructure of wood char,” *Wood Science and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 237–249, 1981.
- [110] K. Li, M. Mousavi, and S. Hostikka, “Char cracking of medium density fibreboard due to thermal shock effect induced pyrolysis shrinkage,” *Fire safety journal*, vol. 91, pp. 165–173, 2017.
- [111] J. Quintiere and A. Rangwala, “A theory for flame extinction based on flame temperature,” *Fire and materials*, vol. 28, no. 5, pp. 387–402, 2004.
- [112] J. L. Torero, T. Vietoris, G. Legros, and P. Joulain, “Estimation of a total mass transfer number from the standoff distance of a spreading flame,” *Combustion science and technology*, vol. 174, no. 11-12, pp. 187–203, 2002.
- [113] R. Emberley, T. Do, J. Yim, and J. L. Torero, “Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 252–258, 2017.
- [114] A. Tewarson and R. Pion, “Flammability of plastics—i. burning intensity,” *Combustion and Flame*, vol. 26, pp. 85–103, 1976.
- [115] A. I. Bartlett, “Auto-extinction of engineered timber,” 2018.
- [116] R. Emberley, C. G. Putynska, A. Bolanos, A. Lucherini, A. Solarte, D. Soriguer, M. G. Gonzalez, K. Humphreys, J. P. Hidalgo, C. Maluk, *et al.*, “Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 327–335, 2017.
- [117] C. McGregor, *Contribution of cross laminated timber panels to room fires*. PhD thesis, Carleton University, 2013.

-
- [118] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, J. P. Hidalgo, S. Santamaria, F. Wiesner, L. A. Bisby, S. Deeny, and B. Lane, “Auto-extinction of engineered timber : Application to compartment fires with exposed timber surfaces,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 407–413, 2017.
- [119] C. J. Bateman, A. I. Bartlett, R. L. Rutkauskas, and R. M. Hadden, “Effects of fuel load and exposed clt surface configuration in reduced-scale experiments,” in *World Conference on Timber Engineering, Seoul, Republic of Korea*, 2018.
- [120] R. Crielaard, J.-W. van de Kuilen, K. Terwel, G. Ravenshorst, and P. Steenbakkers, “Self-extinguishment of cross-laminated timber,” *Fire Safety Journal*, 2019.
- [121] R. Emberley, A. Inghelbrecht, Z. Yu, and J. L. Torero, “Self-extinction of timber,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 2, pp. 3055–3062, 2017.
- [122] N. Boonmee, *Theoretical and experimental study of autoignition of wood*. PhD thesis, University of Maryland, College Park, 2004.
- [123] J. Swann, J. Hartman, and C. Beyler, “Study of radiant smoldering ignition of plywood subjected to prolonged heating using the cone calorimeter, TGA, and DSC,” *Fire Safety Science*, vol. 9, pp. 155–166, 2008.
- [124] I. Pope, J. P. Hidalgo, A. Osorio, C. Maluk, and J. L. Torero, “Thermal behaviour of laminated bamboo structures under fire conditions,” *Fire and Materials*, 2019.
- [125] G. Erez, *Modélisation du terme source d’incendie : montée en échelle à partir d’essais de comportement au feu vers l’échelle réelle : approche “modèle”, “numérique” et “expérimentale”*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2019.
- [126] A. Camillo, *Etude multi-échelle du comportement au feu d’un siège et d’une paroi types issus d’un système de transport ferroviaire européen*. PhD thesis, Chasseneuil-du-Poitou, Ecole nationale supérieure de mécanique et d . . . , 2013.
- [127] C. Vincent, *Caractérisation du comportement au feu des matériaux de l’habitat : Influence de l’effet d’échelle*. PhD thesis, 2016.
- [128] J. Martinka, V. Mózer, E. Hroncová, and J. Ladomerský, “Influence of spruce wood form on ignition activation energy,” *Wood Res.-Slovakia*, vol. 60, no. 5, pp. 815–822, 2015.
- [129] K. L. Friquin, M. Grimsbu, and P. J. Hovde, “Charring rates for cross-laminated timber panels exposed to standard and parametric fires,” in *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, 2010.
- [130] L. Tsantaridis, *Reaction to fire performance of wood and other building products*. PhD thesis, Bygghvetenskap, 2003.

-
- [131] D. Zeinali, *Flame Spread and Fire Behavior in a Corner Configuration*. PhD thesis, Ghent University, 2019.
- [132] D. Zeinali, S. Verstockt, T. Beji, G. Maragkos, J. Degroote, and B. Merci, “Experimental study of corner fires—part i : Inert panel tests,” *Combustion and Flame*, vol. 189, pp. 472–490, 2018.
- [133] D. Zeinali, S. Verstockt, T. Beji, G. Maragkos, J. Degroote, and B. Merci, “Experimental study of corner fires—part ii : Flame spread over mdf panels,” *Combustion and Flame*, vol. 189, pp. 491–505, 2018.
- [134] J. Zhang, M. Delichatsios, and M. Colobert, “Assessment of fire dynamics simulator for heat flux and flame heights predictions from fires in SBI tests,” *Fire Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 291–306, 2010.
- [135] D. Lipinskas and R. Mačiulaitis, “Further opportunities for development of the method for fire origin prognosis,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 11, no. 4, pp. 299–307, 2005.
- [136] P. Boulet, G. Parent, Z. Acem, T. Rogaume, T. Fateh, J. Zaida, and F. Richard, “Characterization of the radiative exchanges when using a cone calorimeter for the study of the plywood pyrolysis,” *Fire safety journal*, vol. 51, pp. 53–60, 2012.
- [137] P. Cremona, Y. Billaud, T. Rogaume, F. Richard, and B. Batiot, “Influence of a misalignment of the cone or the sample holder on the view factor with a monte carlo approach,” in *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 1107, p. 032020, IOP Publishing, 2018.
- [138] M. Law, “Fire safety of external building elements,” *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Second Quarter*, 1978.
- [139] S. Wasan, P. Van Hees, and B. Merci, “Study of pyrolysis and upward flame spread on charring materials part 1 : Experimental study,” *Fire and Materials*, vol. 35, no. 4, pp. 209–229, 2011.
- [140] L. Terrei, “Study of ignition and extinction of spruce glulam exposed to a radiative flux,” 2019.
- [141] J. Cuevas, J. L. Torero, and C. Maluk, “Flame extinction and burning behaviour of timber under varied oxygen concentrations,” *Fire Safety Journal*, p. 103087, 2020.
- [142] A. Atreya and M. Abu-Zaid, “Effect of environmental variables on piloted ignition,” *Fire Safety Science*, vol. 3, pp. 177–186, 1991.
- [143] E. Mikkola and I. S. Wichman, “On the thermal ignition of combustible materials,” *Fire and Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 87–96, 1989.

Annexe D

Livret des figures

D.1 État de l'art

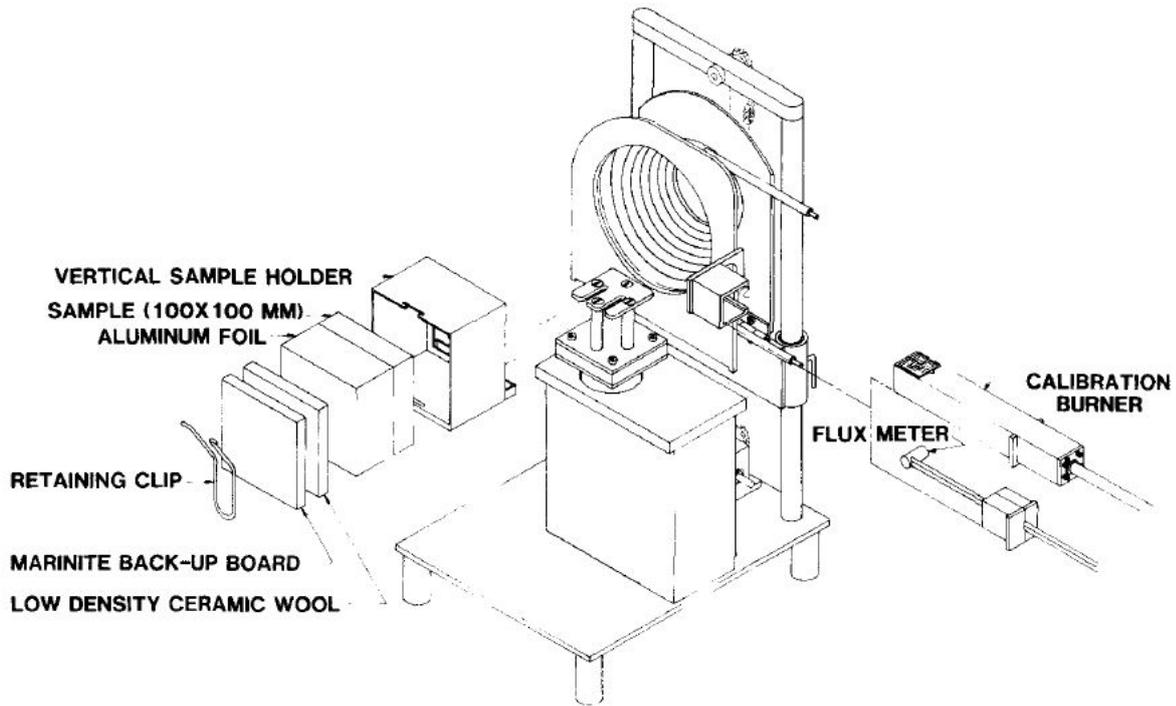


FIGURE D.1 – Schéma détaillé du cône calorimètre orienté verticalement [37].

TABLEAU D.1 – Modèles de prédiction du temps d'inflammation piloté.

Modèle	Équation
Atreya et Abu-Zaid [142]	$t_{Atre} = \frac{\pi}{4} \lambda \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_0}{\dot{q}_{inc}''} \right)^2$
Mikkola et Wichman [143]	$t_{Mikk} = \rho C_p \sqrt{\lambda L} \left(\frac{T_{ig} - T_0}{\dot{q}_{inc}''} \right)^{3/2}$
Quintiere [60]	$t_{Quin} = \frac{2}{3} \lambda \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_0}{\dot{q}_{inc}''} \right)^2$

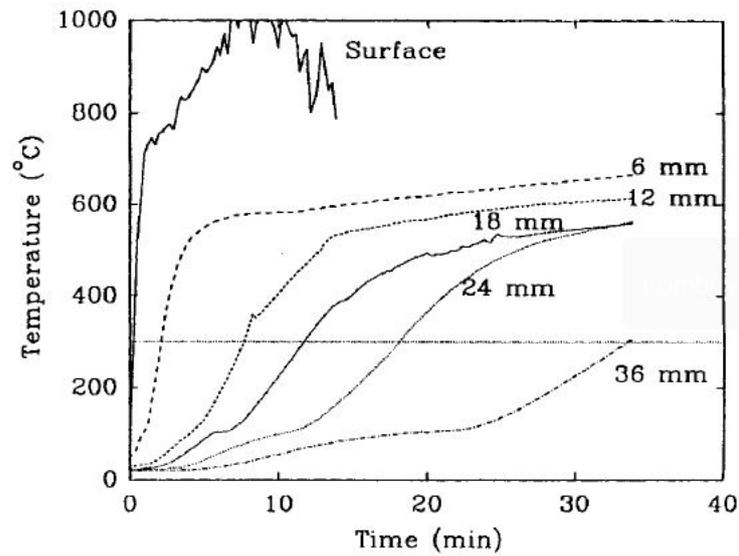


FIGURE D.2 – Évolution de la température de surface et en profondeur mesurée par des thermocouples pour un flux de 38 kW.m^{-2} [64]. La température de surface est très vite perturbée à cause du mauvais contact entre l'échantillon et le thermocouple ainsi que de la présence de la flamme.

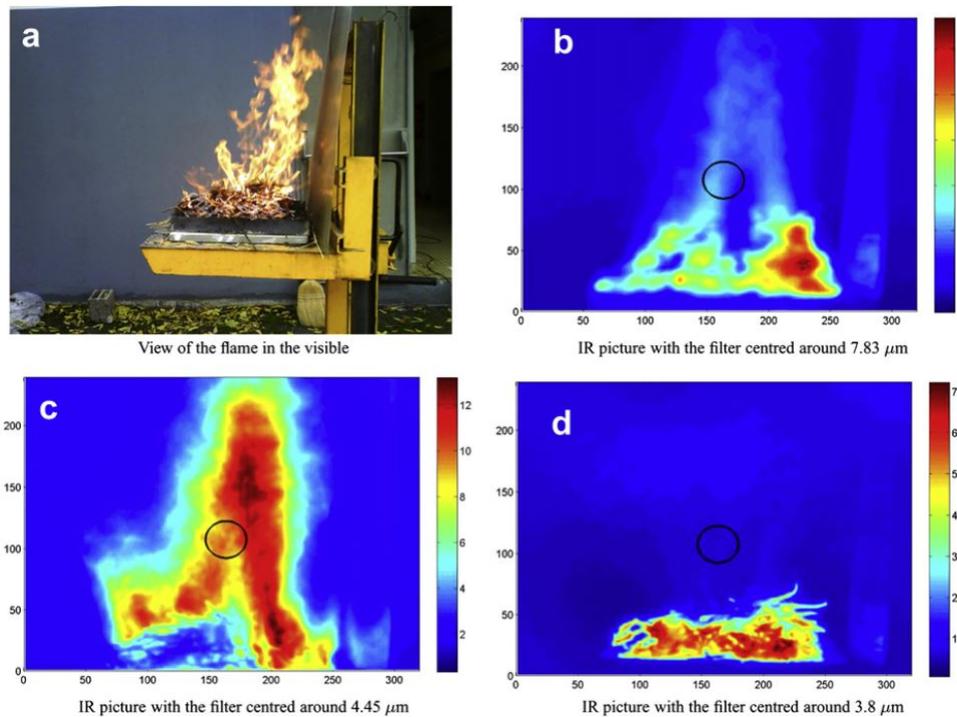


FIGURE D.3 – Images de la flamme dans le visible et dans l'infrarouge autour de $3,8 \mu\text{m}$ (émission suies), $4,45 \mu\text{m}$ (émission du CO_2) et $7,83 \mu\text{m}$ (émission du H_2O) [92]. La flamme émet principalement dans le CO_2 et est quasi transparente dans les suies.

D.2 Matériel et Méthode

Cette section présente un histogramme de la variation de la masse volumique des échantillons d'épicéa, des courbes d'augmentation de l'humidité dans le bois, la relation linéaire entre le signal mesuré (DL) et la luminance de la caméra infrarouge pour une longueur d'onde de $3,9 \mu\text{m}$ ainsi qu'une photo d'un échantillon usiné pour y disposer des thermocouples noyés.

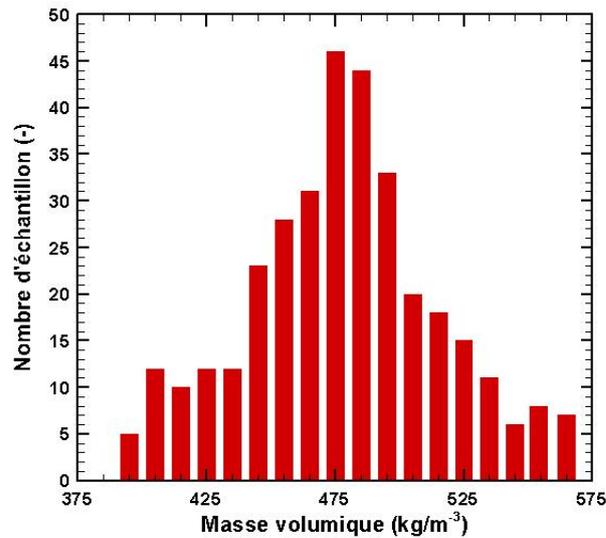
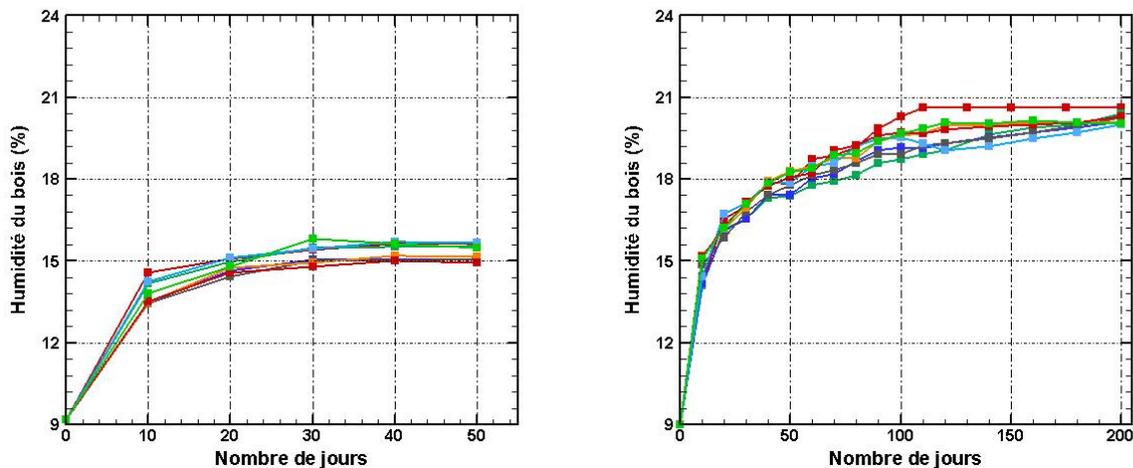


FIGURE D.4 – Histogramme de la masse volumique des échantillons d'épicéa.



(a) Environnement composé d'eau et de Chlorure de Sodium (NaCl). (b) Environnement composé d'eau et de Chlorure de Potassium (KCl).

FIGURE D.5 – Évolution du pourcentage d'humidité des échantillons de bois en fonction de l'environnement salin.

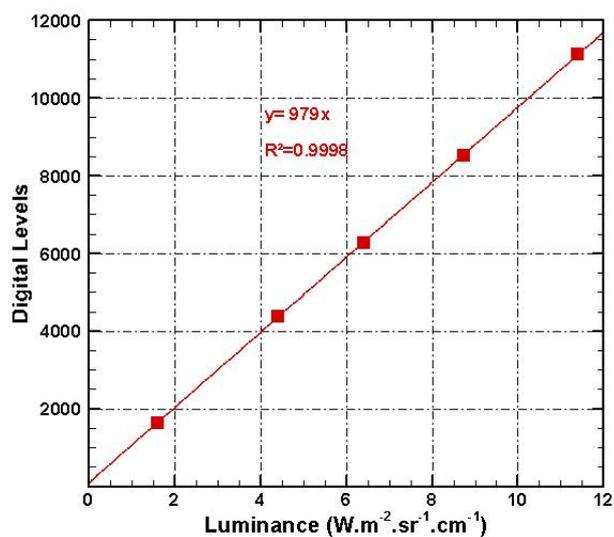


FIGURE D.6 – Évolution des Digital Levels en fonction de la luminance calculée avec la température du corps noir pour un nombre d'onde de 2564 cm^{-1} ($3,9 \text{ }\mu\text{m}$).

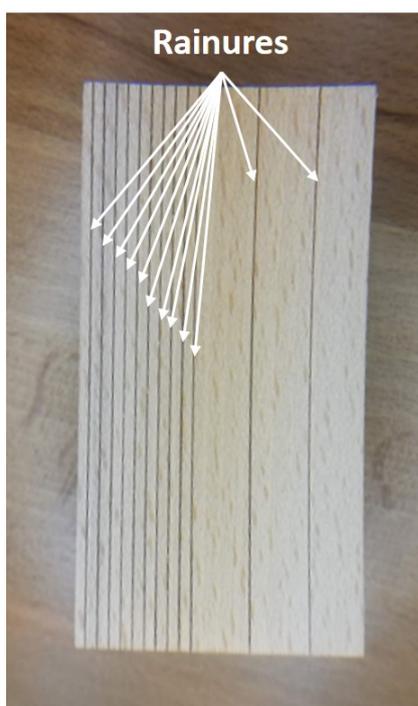


FIGURE D.7 – Photo d'un échantillon rainuré avant l'insertion de thermocouples noyés non gainés.

D.3 Étude de l'auto-inflammation

Les résultats supplémentaires présentés ici regroupent principalement les incertitudes de mesure de la température de surface à l'inflammation selon le temps d'inflammation ou encore selon la valeur de l'émissivité. De nombreuses images de caméra rapide (infrarouge et visible) sont ajoutées afin de mettre en évidence les différents types d'inflammation.

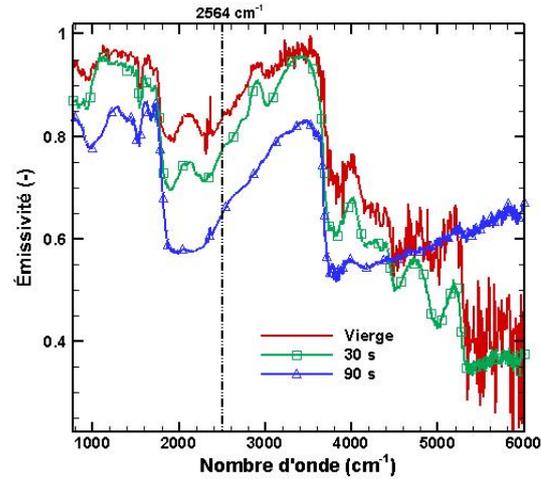


FIGURE D.8 – Variation de l'émissivité des échantillons d'épicéa pour trois temps d'exposition à $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sur tout le spectre infrarouge.

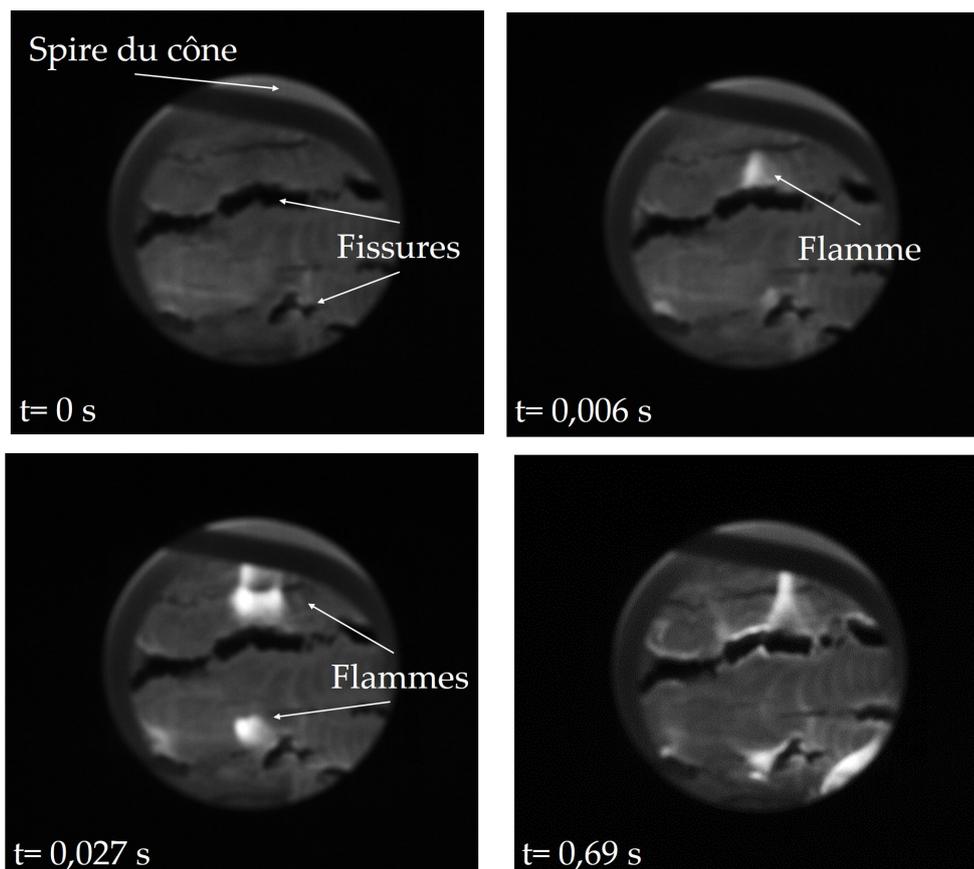
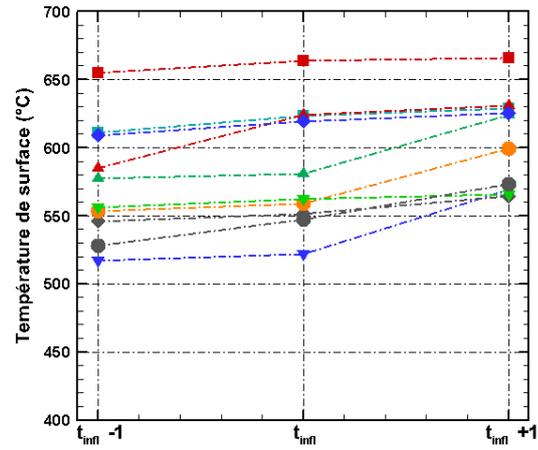
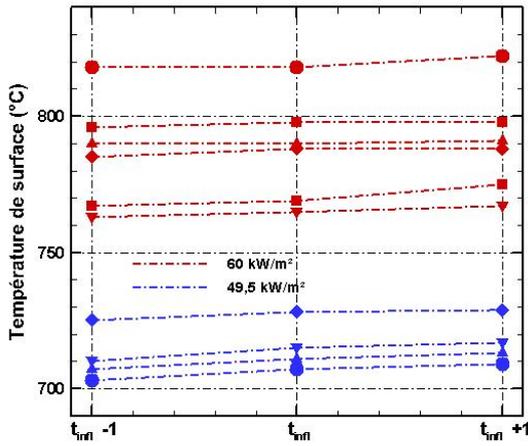
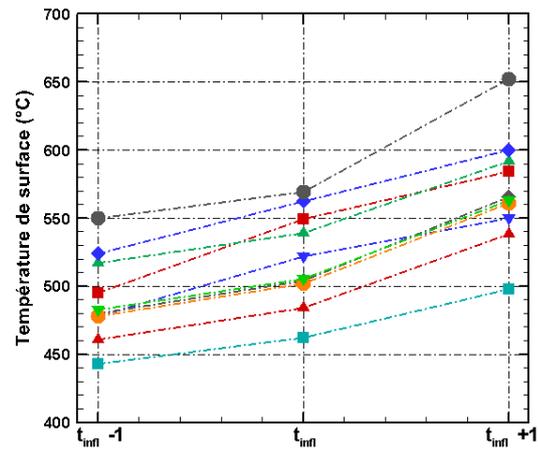
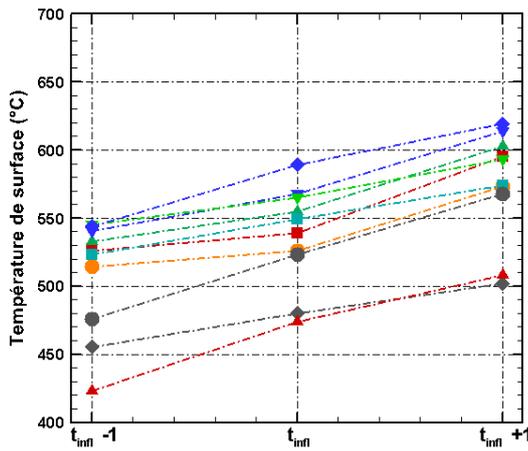


FIGURE D.9 – Images de la face exposée au cône d'un échantillon d'épicéa enregistrées par la caméra rapide visible d'une inflammation proche de la surface exposée. Cette disposition de la caméra rapide a été utilisée pour un essai à $49,5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour lequel l'auto-inflammation s'est produite au bout de 3000 secondes.



(a) 4 essais à $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et 6 essais $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les inflammations à des temps longs. (b) 10 essais à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour t_{infi} inférieur à 1 minutes.



(c) 10 essais à $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

(d) 10 essais à $93,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

FIGURE D.10 – Valeurs des températures de surface en fonction t_{infi} normalisé à ± 1 seconde.

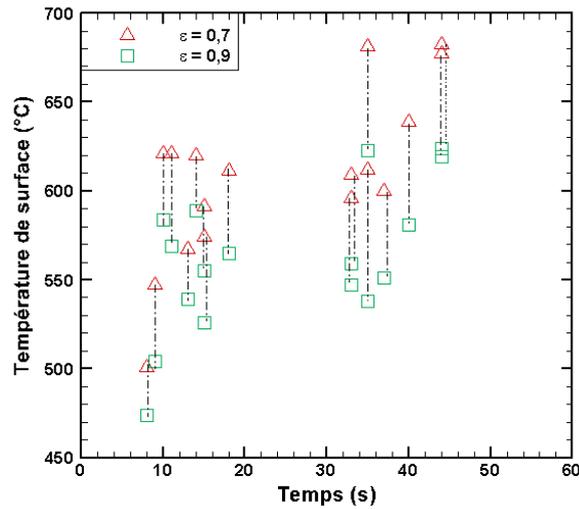
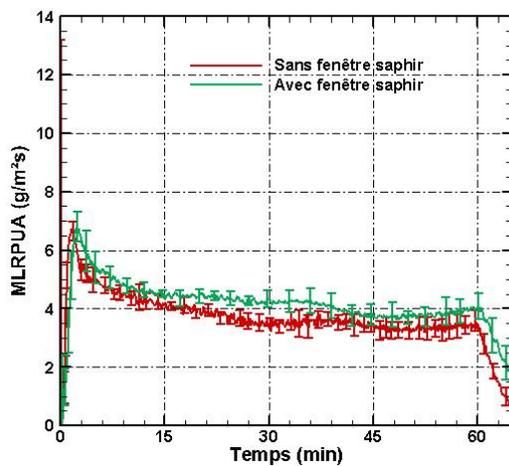


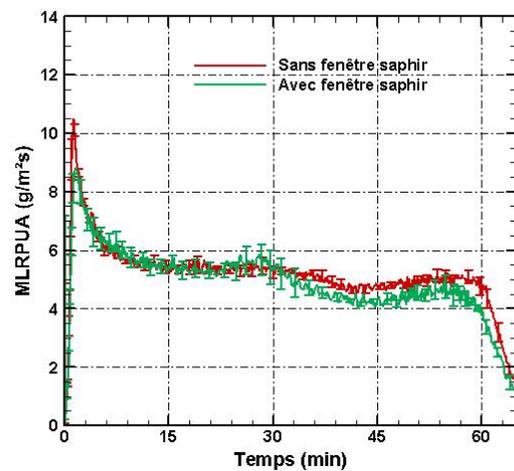
FIGURE D.11 – Valeur de la température de surface à l'inflammation en fonction de l'émissivité imposée.

TABLEAU D.2 – Nombre d'essai réalisé en fonction des flux appliqués et de la variation de l'humidité dans les échantillons d'épicéa.

Flux \ Humidité	16,5 kW.m ⁻²	22 kW.m ⁻²	49,5 kW.m ⁻²	60 kW.m ⁻²	82,5 kW.m ⁻²	93,5 kW.m ⁻²
15 %	2	3	2	6	8	2
20 %	-	-	1	3	2	3
25 %	1	3	2	3	2	2
30 %	3	2	-	4	4	-



(a) MLRPUA à 49,5 kW.m⁻².



(b) MLRPUA à 60 kW.m⁻².

FIGURE D.12 – Comparaison du MLRPUA moyens pendant une exposition d'une heure à 49,5 (8 essais) et 60 kW.m⁻² (5 essais) avec et sans fenêtre saphir disposée entre l'échantillon et le cône calorimètre.

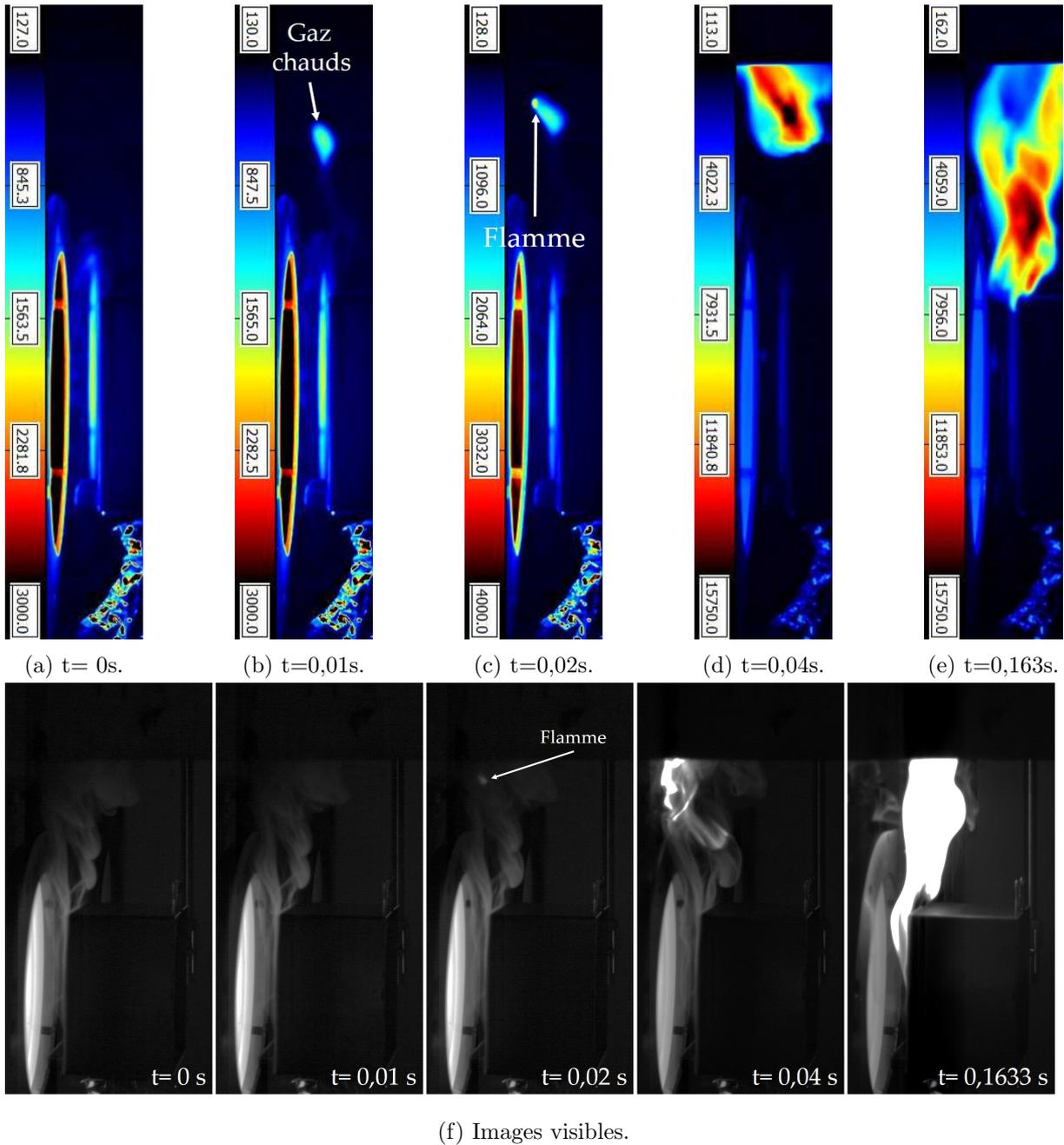


FIGURE D.13 – Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d’onde des suies d’une auto-inflammation par les gaz d’un échantillon de hêtre exposé à $82,5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

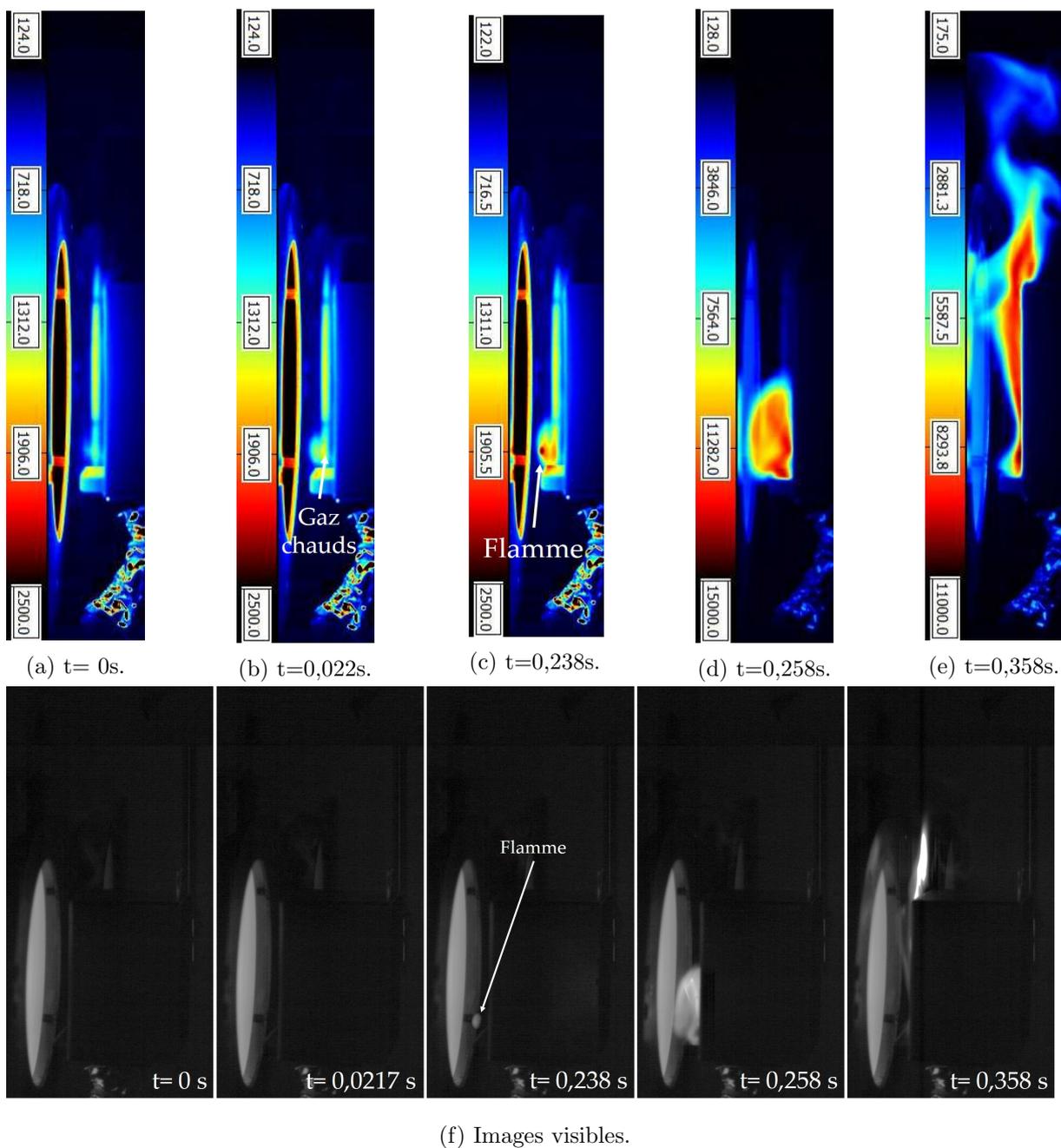
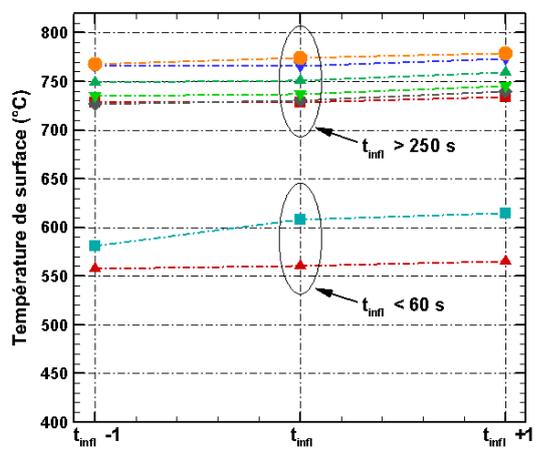
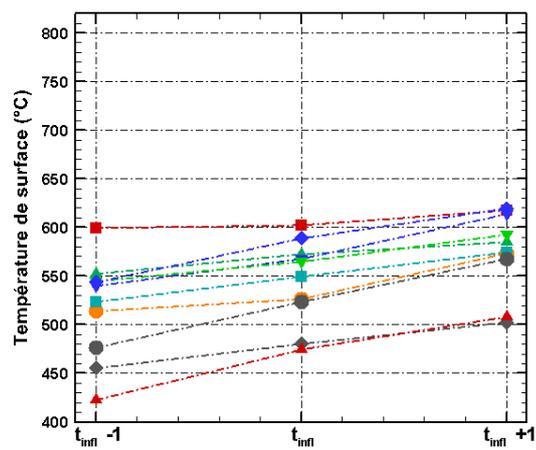


FIGURE D.14 – Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde du CO_2 d'une auto-inflammation proche de la surface exposée au cône d'un échantillon de hêtre à $60\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.



(a) 8 essais à 60 kW.

(b) 10 essais à 82,5 kW.m⁻².FIGURE D.15 – Valeurs des températures de surface en fonction t_{infl} normalisé à ± 1 seconde.

D.4 Étude de la dégradation

Le chapitre 4 regroupe une quantité importante de test avec des paramètres variés. Les figures permettent de visualiser les mesures de répétabilité ou à des conditions légèrement différentes de celles présentent dans le manuscrit. Les résultats montrent principalement la température de surface et dans le matériau ou le MLRPUA.

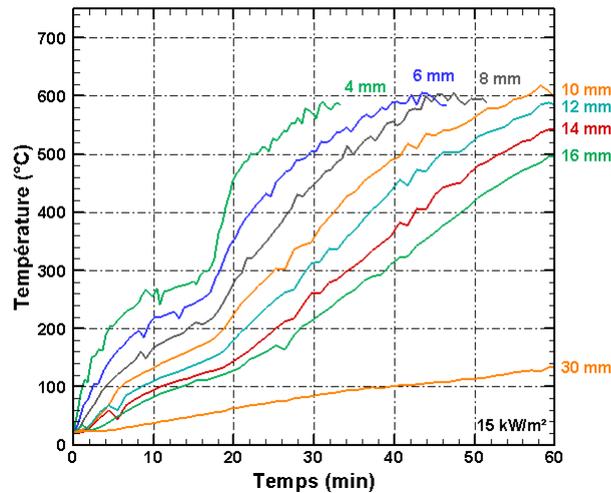
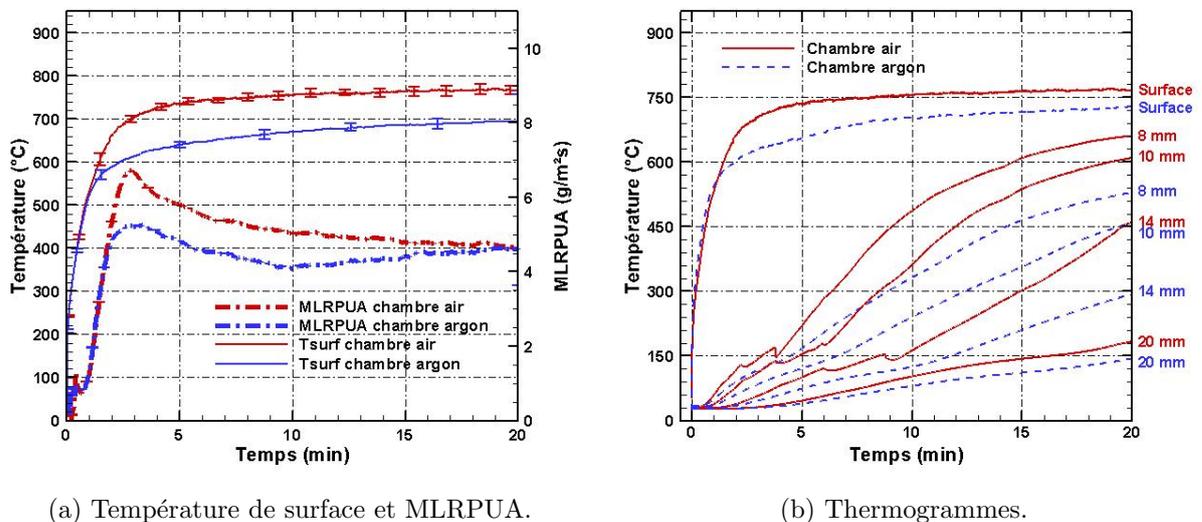


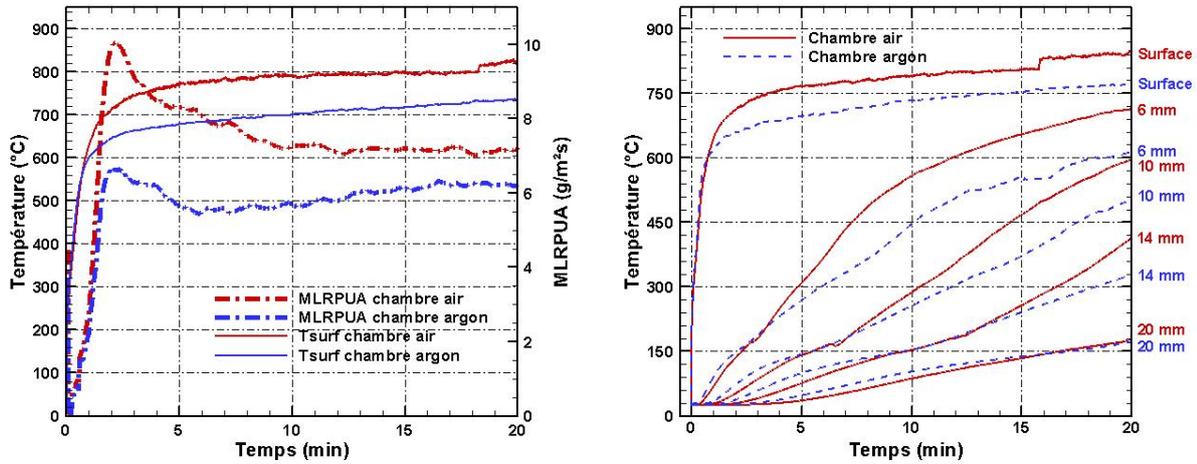
FIGURE D.16 – Thermogrammes des thermocouples noyés pour le test 2 à un flux de $16,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.



(a) Température de surface et MLRPUA.

(b) Thermogrammes.

FIGURE D.17 – Comparaison du MLRPUA ainsi que de la température de surface entre des essais sous air et sous argon pour un flux de $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ sous argon.



(a) Température de surface et MLRPUA.

(b) Thermogrammes.

FIGURE D.18 – Comparaison du MLRPUA ainsi que de la température de surface entre des essais sous air et sous argon pour un flux de 60 kW.m^{-2} sous argon.

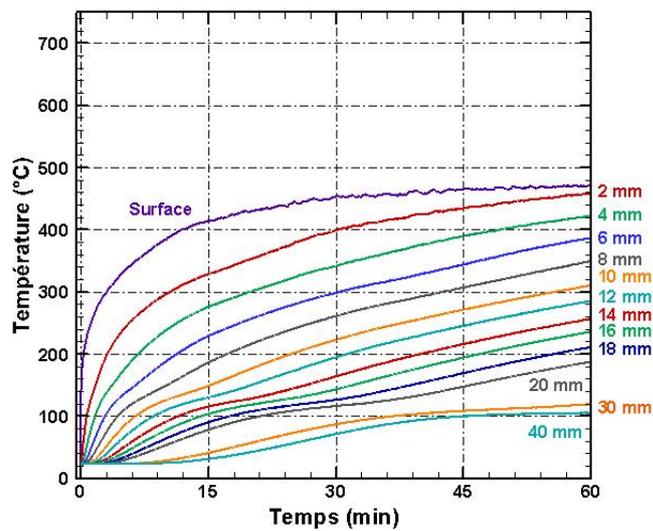
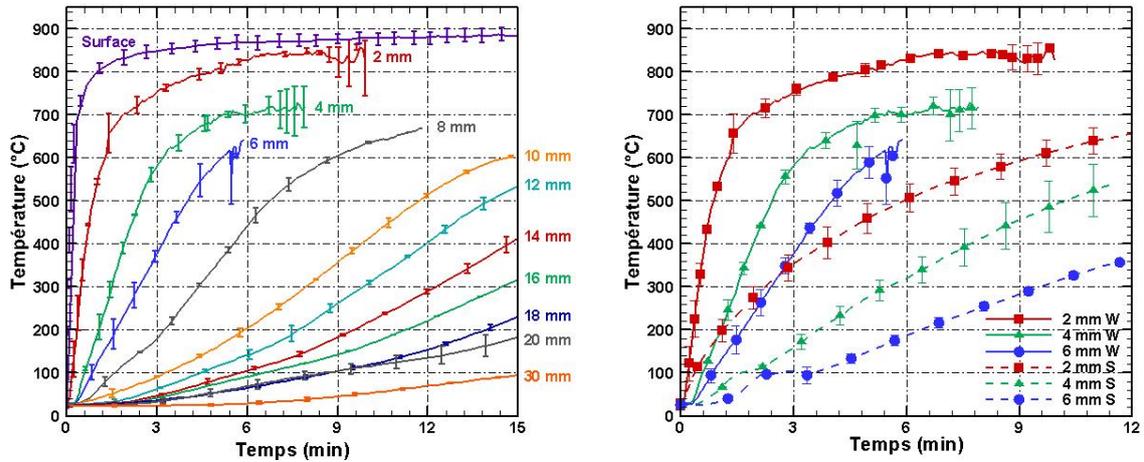
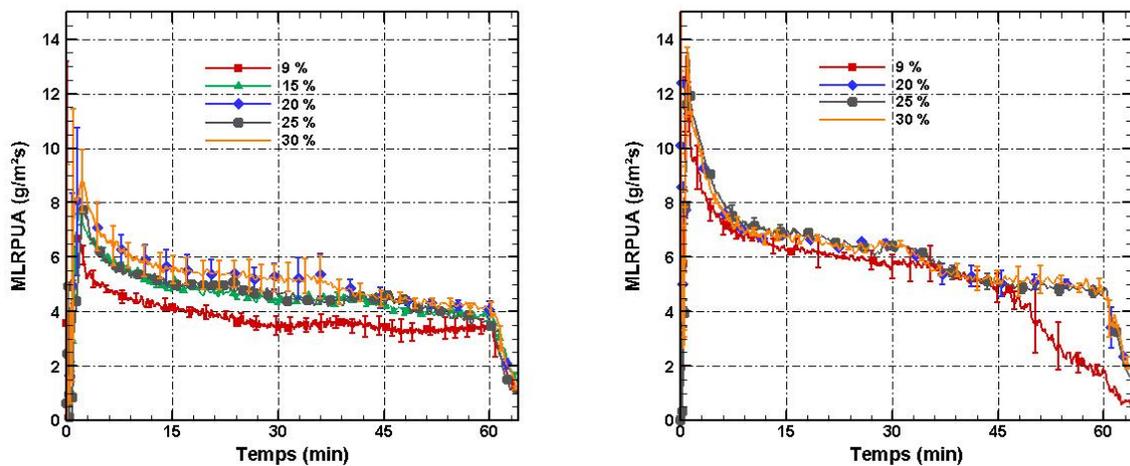


FIGURE D.19 – Thermogrammes des thermocouples noyés pour le test $16,5 \text{ kW.m}^{-2}$ sous argon.



(a) Thermogrammes des thermocouples noyés avec (b) Comparaison de l'implantation des thermocouples (W : tc noyés, S : tc gainés).

FIGURE D.20 – Évolution de la température mesurée dans l'épicéa pour une valeur de flux de $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.



(a) $49,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 30 minutes.

(b) $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 15 minutes.

FIGURE D.21 – Comparaison des MLRPUA en fonction des différentes humidités étudiées.

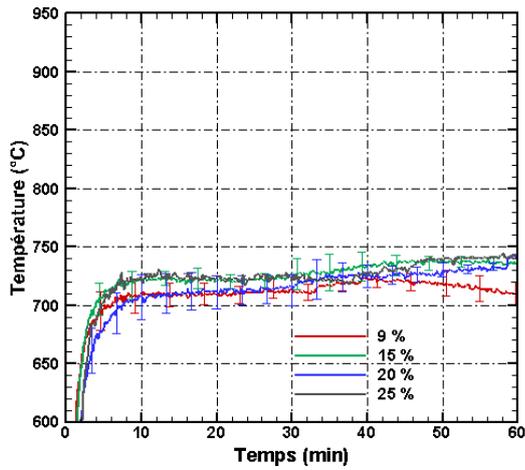
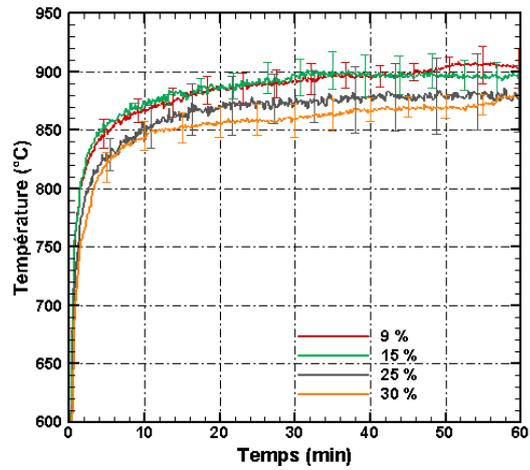
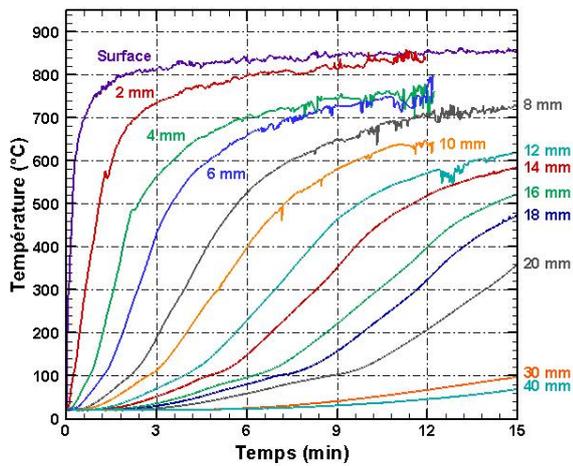
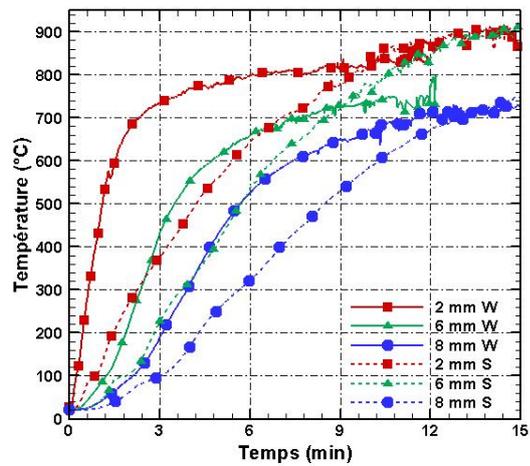
(a) $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$.(b) $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

FIGURE D.22 – Comparaison des températures de surface en fonction des différentes humidités étudiées.



(a) Thermogrammes des thermocouples noyés avec la température de surface.



(b) Comparaison de l'implantation des thermocouples (W : tc noyés, S : tc gainés).

FIGURE D.23 – Évolution de la température mesurée dans le hêtre pour une valeur de flux de $82,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

D.5 Étude de l'auto-extinction des échantillons

Les jeux de paramètres dans l'étude de l'auto-extinction du bois sont variés (flux imposés avec les deux cônes, temps d'exposition et essences de bois). Les tableaux ci-dessous regroupent les essais effectués en fonction des paramètres fixés. Les valeurs en % présentent la proportion d'auto-extinction des échantillons en fonction de la paire de flux imposés. Deux figures supplémentaires mettant en évidence la proportion d'extinction ainsi que le MLRPUA à l'extinction sont également dans cette section.

TABLEAU D.3 – Résultats des 36 tests effectués pour un temps d'exposition de 6 minutes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
60	-	-	-
55	-	-	-
52	-	√ √ √ √ : 0 %	√ √ √ † : 25 %
49,5	-	† † √ √ : 50 %	† † † √ : 75 %
47	√ √ √ √ : 0 %	† † † † : 100 %	† † † † : 100 %
44	† † † √ : 75 %	-	† † : 100 %
31	† † † † : 100 %	-	-
38,5	-	-	-

TABLEAU D.4 – Résultats des 37 tests effectués pour un temps d'exposition de 9 minutes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
60	-	-	-
55	-	-	-
52	-	√ √ √ √ † : 20 %	√ √ √ √ : 0 %
49,5	-	† † † √ √ : 60 %	† † † † : 100 %
47	√ √ √ √ : 0 %	√ √ † † : 50 %	† † † † : 100 %
44	† † † † : 100 %	† † † † : 100 %	-
41	-	-	-
38,5	-	-	-

TABLEAU D.5 – Résultats des 37 tests effectués pour un temps d'exposition de 18 minutes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) appliqué à l'échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$) appliqué à l'échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 1 \ Flux 2	60	82,5	93,5
60	-	-	-
55	-	-	√ √ √ √ : 0 %
52	-	√ √ √ √ : 0 %	√ √ † † : 50 %
49,5	-	† † √ √ : 50 %	† † † † : 100 %
47	† √ √ √ : 25 %	† † † † : 100 %	-
44	† † † √ : 75 %	-	-
41	† † † † † : 100 %	-	-
38,5	-	-	-

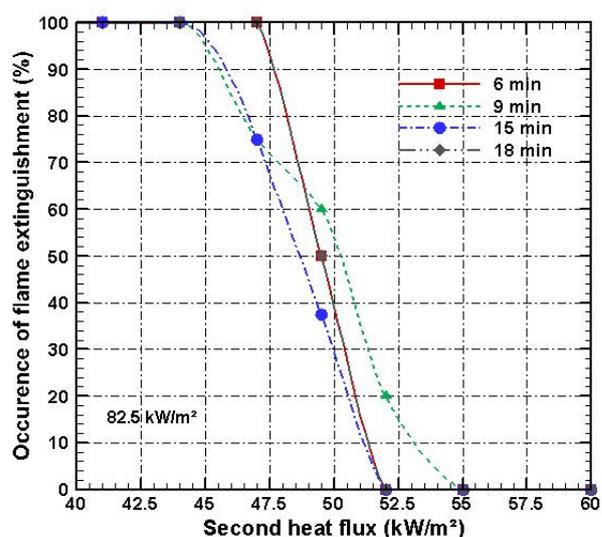


FIGURE D.24 – Pourcentage d'extinction de la flamme en fonction du temps d'exposition et du flux thermique appliqué à l'échantillon lors de la deuxième étape (le premier flux imposé est de $82,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$).

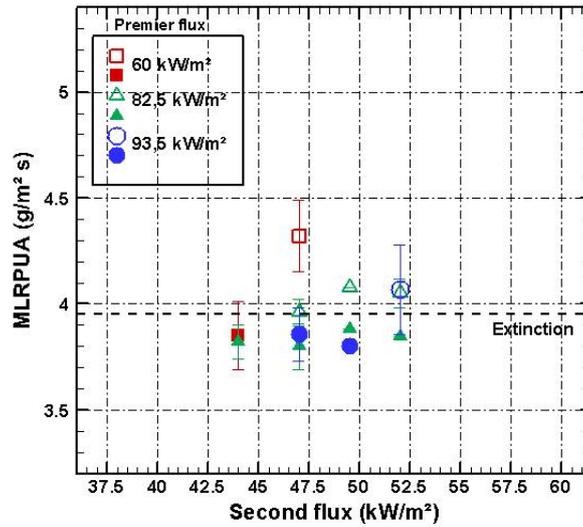


FIGURE D.25 – MLRPUA mesuré après le coulisement du cône (marques vides : pas d’extinction de flamme, marques pleines : extinction de flamme) pour un temps d’exposition de 9 minutes.

TABLEAU D.6 – Résultats des 10 tests effectués pour un temps d’exposition de 90 secondes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l’échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l’échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 2 \ Flux 1	60	82,5
49,5	-	√ √ : 0 %
47	-	√ √ : 0 %
44	-	√ √ : 0 %
31	-	√ : 0 %
38,5	-	√ : 0 %
36	-	√ √ : 0 %

TABLEAU D.7 – Résultats des 24 tests effectués pour un temps d’exposition de 9 minutes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l’échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l’échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 2 \ Flux 1	60	82,5
49,5	-	√ √ √ √ : 0%
47	-	√ √ √ √ : 0%
44	-	√ √ √ √ : 0%
41	-	√ √ √ √ : 0%
38,5	-	† † √ √ : 50 %
36	-	† † † † : 100 %

TABLEAU D.8 – Résultats des 24 tests effectués pour un temps d'exposition de 15 minutes au premier flux de chaleur. En colonnes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la première exposition. En lignes, le flux de chaleur (kW.m^{-2}) appliqué à l'échantillon lors de la deuxième exposition († : extinction de la flamme, √ : maintien de la flamme, - : pas de test).

Flux 2 \ Flux 1	60	82,5
49,5	-	√ √ √ √ : 0 %
47	-	† † √ √ : 50 %
44	-	† † † √ : 75 %
41	-	-
38,5	√ √ √ : 0 %	-
36	√ √ √ : 0 %	-
33	† † √ : 67 %	-

D.6 Le changement d'échelle

La métrologie utilisée à petite échelle a été déployée pour les essais aux panneaux radiants. Les figures présentent les images de caméra rapide de la localisation de l'inflammation, les MLRPUA dessinés ou encore les thermogrammes en fonction du type d'implantation des thermocouples.

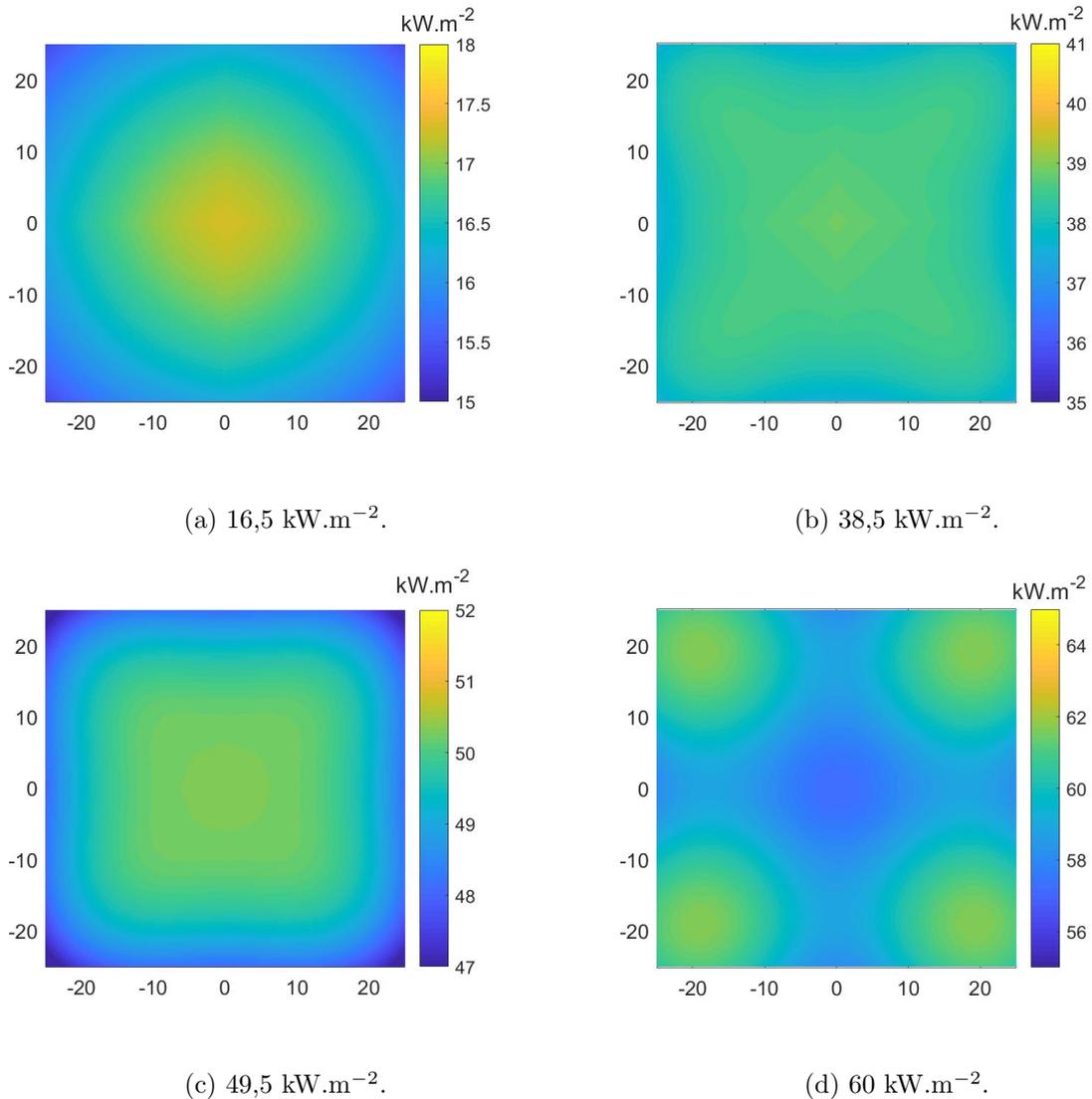


FIGURE D.26 – Détermination de la distance panneaux/échantillons et de la séparation entre les panneaux de façon à obtenir le flux souhaité sur le bois.

TABLEAU D.9 – Distance panneaux/échantillons et séparation entre les panneaux.

Flux (kW.m ⁻²)	Distance échantillon/panneaux (cm)	Séparation entre les panneaux (cm)
16,5	77	25
38,5	38	11
49,5	30,5	4
60	20	4

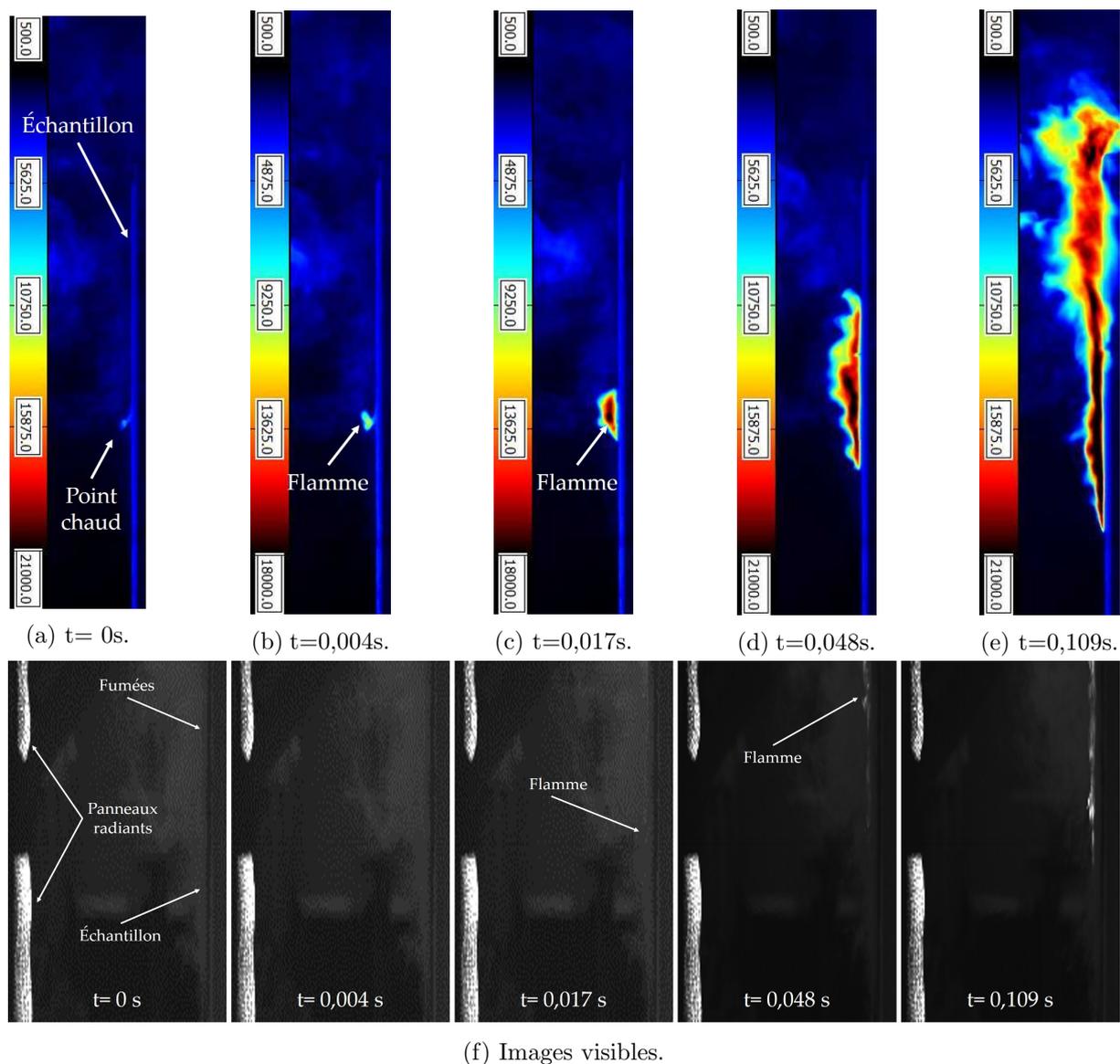


FIGURE D.27 – Images visibles et infrarouges avec un filtre dans la longueur d'onde du CO_2 d'une auto-inflammation proche de la surface exposée aux panneaux radiants à $38,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

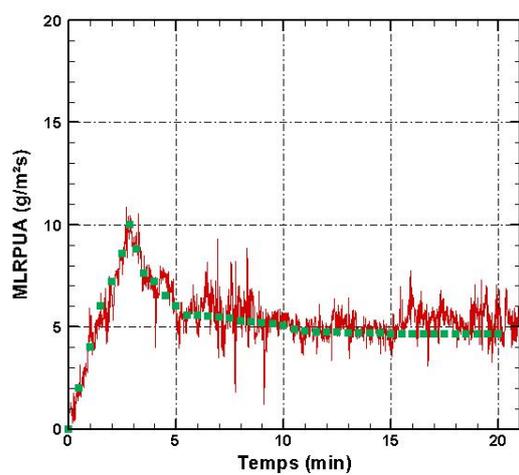
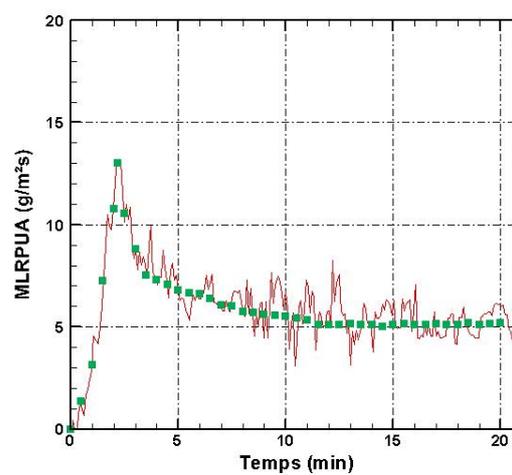
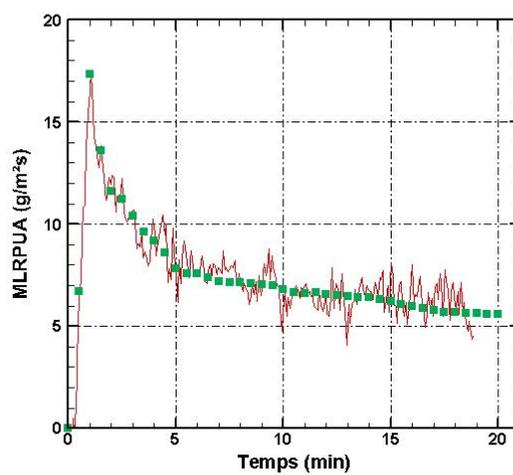
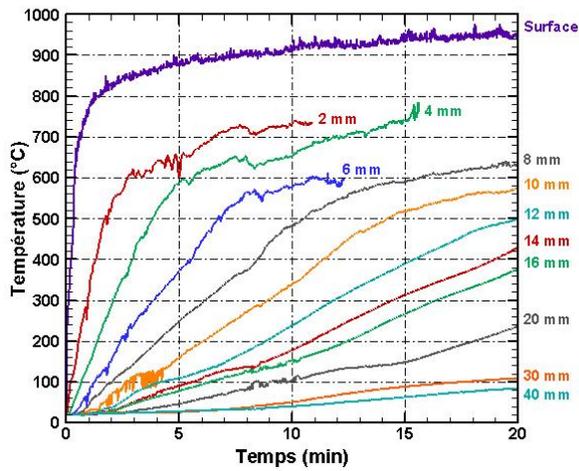
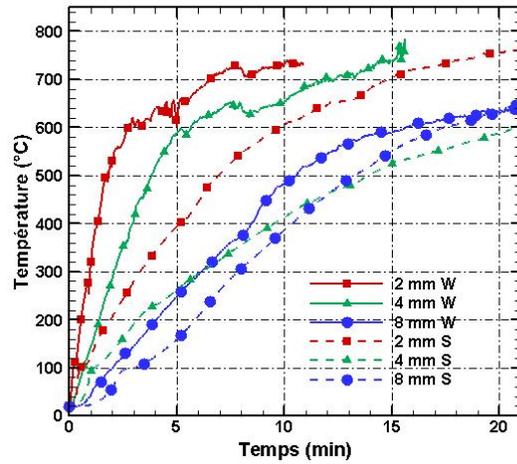
(a) $38,5 \text{ kW.m}^{-2}$.(b) $49,5 \text{ kW.m}^{-2}$.(c) 60 kW.m^{-2} .

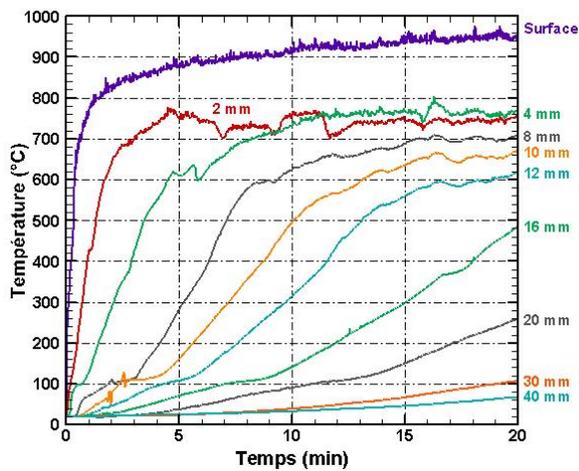
FIGURE D.28 – Représentation des MLRPUA enregistrées pendant les essais aux panneaux radiants.



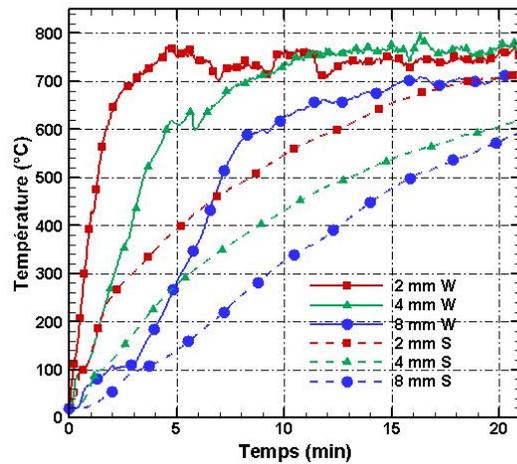
(a) Thermogrammes des thermocouples noyés.



(b) Thermogrammes selon l'implantation des thermocouples (W : noyés, S : gainés).

FIGURE D.29 – Thermogrammes pour un échantillon exposé à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ dont les thermocouples se situent en partie centrale de l'échantillon.

(a) Thermogrammes des thermocouples noyés.



(b) Thermogrammes selon l'implantation des thermocouples (W : noyés, S : gainés).

FIGURE D.30 – Thermogrammes pour un échantillon exposé à $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ dont les thermocouples se situent en partie haute de l'échantillon.

Résumé : Comportement au feu du matériau bois : auto-inflammation, dégradation et auto-extinction

La construction de bâtiments à énergie positive et à faible empreinte carbone constitue une véritable réponse aux enjeux et défis environnementaux de ces prochaines décennies. De plus en plus de projets de construction d'immeubles de grande hauteur composés en grande partie du matériau bois sont soit à l'étude ou se concrétisent. Un point clé pour la réalisation de tels bâtiments est le comportement au feu de ces ouvrages. En effet, lorsque le bois est soumis à une sollicitation thermique, celui va se dégrader et il peut s'auto-enflammer. À l'inverse, lorsque les conditions le permettent, il peut s'auto-éteindre. Cependant, l'état de l'art actuel met en évidence la disparité des résultats expérimentaux sur un même matériau soumis à un essai donné comme le cône calorimètre par exemple. Les résultats sur l'extinction du bois restent quant à eux limités au vu des recherches récentes effectuées sur ce phénomène.

L'objectif de la thèse présentée ici est d'appréhender expérimentalement l'auto-inflammation, la dégradation et l'auto-extinction du matériau bois utilisé dans les bâtiments. Pour cela, de nombreux essais à différentes échelles ont été effectués afin d'étudier la capacité du matériau bois à s'enflammer ou à s'éteindre de lui-même selon des conditions prescrites. Au total, 600 tests dont 500 à petite échelle ont été effectués en orientation verticale et permettent de conforter les résultats avec une approche statistique. Une métrologie dédiée a été mise en place et a été déployée sur chaque dispositif expérimental étudié : une caméra infrarouge permettant d'obtenir la température de surface des échantillons lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation thermique, deux caméras rapides (visible et infrarouge) afin de filmer la localisation et les mécanismes d'auto-inflammation et des thermocouples très fins encastrés dans le bois de façon à mesurer l'évolution de la température dans le matériau selon des conditions fixées. Les travaux menés ont montré que pour l'auto-inflammation (i.e. en l'absence d'un pilote forçant l'inflammation), la notion de température d'inflammation du matériau pouvait être discutable lorsque l'inflammation se produit à des temps courts. En effet, l'apparition de la flamme se situe alors, dans la majeure partie des expériences, à une distance éloignée de la surface exposée à la sollicitation thermique. Les mécanismes d'apparition de la flamme ne dépendent alors pas de la température de surface mais des conditions de mélange gaz/air ainsi que de la température de ce mélange. La température de surface à l'auto-inflammation n'a donc de sens que pour des temps d'auto-inflammation longs, pour lesquels l'inflammation se produit à proximité de la surface.

La dégradation des échantillons dépend de nombreux facteurs : orientation de l'échantillon, humidité de l'échantillon, essence de bois, teneur en oxygène dans l'atmosphère. L'effet de ces paramètres a été considéré dans ce travail. Une attention particulière a été portée sur la mise en place d'une métrologie visant à obtenir des mesures précises et fiables. Il a notamment été montré que la mesure de température par thermocouple pouvait conduire à des écarts de plusieurs centaines de degrés selon la façon dont ils sont utilisés. Des thermocouples très fins, noyés dans l'échantillon et orientés parallèlement aux isothermes permettent une meilleure estimation de la température et ont donc été utilisés. Enfin, un nouveau dispositif expérimental basé sur deux cônes calorimètres disposés sur un système de table coulissante a été mis en place et a permis de déterminer des critères simples d'auto-extinction du bois à petite échelle.

À plus grande échelle, les résultats ont montré que le phénomène d'auto-inflammation est similaire à celui de la petite échelle. Pour un flux identique, l'avancée du front de charbon est équivalente quelle que soit l'échelle étudiée. La mesure de la position du front de charbon pourrait donc se faire à petite échelle.

Mot clés : inflammation, dégradation, extinction, bois, cône calorimètre, changement d'échelle

Abstract : Fire behavior of wood material : auto-ignition, degradation and auto-extinction

The construction of positive energy and low carbon footprint buildings is a real response to the environmental issues and challenges of the coming decades. An increasing number of high-rise building construction projects made largely of wood are either under study or under construction. A key issue for the construction of such buildings is the fire behavior of these structures. Indeed, when the wood is subjected to a high heat flux, it will degrade and it can self-ignite. Conversely, in certain conditions, wood can self-extinguish. However, the bibliography shows the disparity concerning experimental results for a same material subjected to a given test such as the cone calorimeter. The results on the wood extinction remain limited in view of recent research carried out on this phenomenon.

The aim of the thesis is to experimentally study the self-ignition, degradation and self-extinction of the wood material used in buildings. For this, many tests at different scales have been performed to examine the ability of the wood material to self-ignite or self-extinct under prescribed conditions. A total of 600 tests, including 500 small scale tests, were performed in vertical orientation and allowed to consolidate results with a statistical approach.

A dedicated experimental setup has been deployed on each experimental device studied : an infrared camera providing to measure the surface temperature of the samples when they are subjected to a heat flux, two fast cameras (visible and infrared) in order to record the location and the auto-ignition mechanisms and very thin thermocouples embedded in the wood to measure the temperature evolution in the material according to fixed conditions.

Results showed that for the auto-ignition (i.e. without pilot for ignition), the notion of ignition temperature of the material could be questionable when the ignition occurs at short times. Indeed, the flame appearance is, in most of the experiments, at a distance far from the exposed surface to the heat flux. The ignition mechanisms do not depend on the surface temperature but on the gas / air mixing conditions as well as the mixture temperature. The auto-ignition surface temperature makes therefore sense only for long auto-ignition times, for which ignition occurs close to the surface. The samples degradation depends on many factors : sample orientation, sample humidity, wood species, oxygen concentration in the atmosphere. The effect of these parameters was considered in this work. A particular attention was focused on the establishment of a metrology aimed at obtaining precise and accurate measurements. In particular, it has been shown that temperature measurement by thermocouple can lead to deviations of several hundred degrees depending its implantation. Very thin thermocouples, embedded in the sample and oriented parallel to the isotherms allow a better estimation of the temperature and were therefore used. Finally, a new experimental device based on two cones calorimeter arranged on a sliding table system was set up and made it possible to determine simple criteria for wood self-extinguishment at small scale.

On a larger scale, results showed that the auto-ignition phenomenon is similar to the small scale. For a same imposed heat flux the position of the char front is comparable whatever the scale studied. The measurement of the char front position could thus be made at small scale. Finally, the specific implantation of thin wire thermocouples embedded in wood was validated for the four scales studied.

Keywords : ignition, degradation, extinction, wood, calorimeter cone, scaling