

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Revêtements ignifuges pour des panneaux à lamelles orientées (OSB)

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ


COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

ALI MATOUK

Août 2012



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements s'adressent d'abord à mon directeur de recherche Monsieur Ahmed Koubaa, pour le soutien apporté le long de ma formation, sa disponibilité, sa générosité et pour son appui afin de réaliser ce projet.

Je tiens à remercier les professeurs de l'université de Québec en Abitibi-Témiscamingue pour la qualité de la formation et leurs disponibilités, et tous les professeurs qui ont contribué à ma formation académique.

Mes remerciements s'adressent aussi à mon co-directeur et superviseur en milieu pratique monsieur Xiang-Ming Wang pour l'accueil qui m'as réservé lors du mon séjour à Québec et ses directives très appréciées. Je remercie madame Francine Côté, technicienne de laboratoire à FPInnovations pour sa patience et pour le temps qu'elle m'a accordé lors de la réalisation des tests au laboratoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. Gilles Villeneuve, technicien de laboratoire pour sa présence et son aide et tout son savoir-faire qui m'a transmis lors de mon passage dans les différents laboratoires.

Je remercie les organismes et institutions qui ont financé le projet à savoir, Le Fonds Québécois de la recherche sur la nature et technologie, la chaire de recherche du Canada en valorisation, caractérisation, transformation du bois, le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et FPInnovations-Division des produits forestiers.

Mes remerciements à tous mes amis qui m'ont soutenu dans mon projet et aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail. En fin, je tiens à remercier ma famille et tous mes proches pour leur soutien moral très précieux.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
RÉSUMÉ	xiii
INTRODUCTION	1
Contexte	1
Objectifs	2
CHAPITRE I.....	3
ÉTAT DES CONNAISSANCE	3
1. Propriétés thermiques du bois	3
1.1 Pyrolyse et combustion.....	3
1.2 Méthodes d'ignifugation.....	6
1.2.1 Traitement avec de produits chimiques qui favorisent la formation de charbon à des températures moins élevées que le bois non traité	6
1.2.2 Produits chimiques agissant comme des radicaux libres pour piéger les flammes.....	7
1.2.3 Produits chimiques employés pour former un revêtement à la surface du bois	8
1.2.4 Traitement pour l'augmentation de la conductivité thermique du bois	8

1.2.5	Traitements pour diluer les gaz combustibles provenant du bois avec des gaz non-combustibles	8
1.2.6	Traitements pour réduire l'énergie contenue dans les gaz combustibles.....	9
1.3	Revêtements ignifuges intumescents	9
1.3.1	Composition et mécanisme d'intumescence	10
1.3.2	Facteurs intervenants dans le concept intumescent et nouvelles tendances	13
1.4	Caractérisation des propriétés thermiques	17
1.4.1	Test de propagation de la flamme	17
1.4.2	Test de brûlage vertical	18
1.4.3	Analyse thermogravimétrique (TGA).....	19
1.4.4	Analyse thermique différentielle (DTA).....	20
1.4.5	Calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	21
1.4.6	Indice critique d'oxygène.....	22
1.4.7	Calorimètre à cône.....	23
CHAPITRE II		28
MATÉRIELS ET MÉTHODES.....		28
2.1	Test au feu	28
2.1.1	Matériel	28
2.1.2	Préparation des échantillons.....	28
2.1.3	Test de propagation de la flamme	30
2.1.4	Procédure pour le test de tunnel à deux pieds.....	31

2.1.5	Test de brûlage vertical	33
2.2	Analyse thermogravimétrique	35
CHAPITRE III		38
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		38
3.1	Test au feu	38
3.1.1	Test de propagation de la flamme	38
3.1.1.1	Consommation du panneau	38
3.1.1.2	Propagation de la flamme.....	43
3.1.1.3	Valeur d'isolation thermique.....	47
3.1.1.4	Indice de carbonisation.....	50
3.1.2	Test de brûlage vertical	53
3.1.3	Relations entre les propriétés de résistance au feu.....	57
3.2	Analyse thermogravimétrique	61
3.2.1	Analyses thermogravimétriques des revêtements intumescents	61
3.2.2	Analyses thermogravimétriques des mélanges revêtements-lamelles ..	65
3.2.3	Relation entre la TGA et test du tunnel à deux pieds.....	70
CONCLUSIONS.....		73
Bibliographies		79
ANNEXES		86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Produits de la pyrolyse du bois.	5
Tableau 1.2 : Composition des systèmes intumescents (Bourbigot et Duquesne 2010).	12
Tableau 1.3 : Classification des matériaux issus du test du brûlage vertical (ASTM D3801-10).....	19
Tableau 2.1: Grammages des différents revêtements appliqués sur les panneaux OSB destinés pour le test de propagation de la flamme.	29
Tableau 2.2: Grammages des différents revêtements obtenus sur les échantillons destinés pour le test de brûlage vertical.	30
Tableau 3.1 : Masse des échantillons avant et après le test.	39
Tableau 3.2 : Modèle de prédiction de la perte de masse après le test de propagation de la flamme des panneaux OSB.	41
Tableau 3.3 : Modèles de prédiction de la consommation des panneaux OSB après le test.....	42
Tableau 3.4 : Propagation de la flamme des différents panneaux.....	44
Tableau 3.5 : Modèles de prédiction de la propagation nette de la flamme en fonction du taux de recouvrement.	47
Tableau 3.6 : Différence de température des panneaux OSB testés.	48
Tableau 3.7 : Modèles de prédiction de la valeur d'isolation thermique des panneaux OSB traités par les différents revêtements en fonction du taux de recouvrement	50
Tableau 3.8 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les différents panneaux.	51
Tableau 3.9 : Indice de carbonisation des échantillons OSB.	53

Tableau 3.10 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement A.....	54
Tableau 3.11 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement B.....	55
Tableau 3.12 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement C.....	56
Tableau 3.13 : Paramètres mesurés à partir des courbes TGA des revêtements.....	63
Tableau 3.14 : Paramètres mesurés à partir de courbes TGA des différents mélanges bois-peintures.....	69
Tableau X.1 : Masse des panneaux OSB témoins (sans revêtement), avant et après le test.....	86
Tableau X.2 : Masse des échantillons traités par le revêtement A, avant et après le test.	87
Tableau X.3 : Masse des échantillons traités par le revêtement B, avant et après le test.	88
Tableau X.4 : Masse des échantillons traités par le revêtement C, avant et après le test	89
Tableau X.5 : Propagation de la flamme des panneaux témoins.....	90
Tableau X.6 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement A...	91
Tableau X.7 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement B..	92
Tableau X.8 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement C...	93
Tableau X.9: Différence de température des panneaux OSB témoins.....	94
Tableau X.10 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent A.....	95
Tableau X.11 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent B.....	96

Tableau X.12 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent C.	97
Tableau X.13 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB témoins.	98
Tableau X.14 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement A.	99
Tableau X.15 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement B.	100
Tableau X.16 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement C.	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Dispositif pour le test de brûlage vertical (Laoutid et al. 2009).	18
Figure 1.2 : Courbes TGA du polyphosphate d'ammonium, pentaérythritol, mélamine et le revêtement (Gu et al. 2007).	20
Figure 1.3 : Courbe DSC schématique illustrant les transitions communes (Neag 1995).	21
Figure 1.4 : Installation expérimentale d'indice critique d'oxygène (Laoutid et al. 2009).	23
Figure 1.5 : Représentation schématique du calorimètre à cône (Janssens 2010).	24
Figure 2.1 : a) Tunnel à 2 pieds; b) Plaque de thermocouples (Laboratoire FPInnovations).	31
Figure 2.2 : Appareil de test de brûlage vertical (Laboratoire FPInnovations).	35
Figure 2.3 : Courbe TGA du revêtement C avec les différents paramètres mesurés. .	36
Figure 3.1 : Perte de masse des panneaux OSB après le test en fonction du taux de recouvrement des peintures.	40
Figure 3.2 : Consommation des panneaux OSB en fonction de taux de recouvrement des peintures.	42
Figure 3.3 : Apparence des échantillons après le test du tunnel à deux pieds, a) Échantillons de référence, b) Échantillons traités par le revêtement A (à droite) et par le revêtement B (à gauche).	43
Figure 3.4 : Propagation nette de la flamme en fonction du grammage des trois peintures appliquées sur les panneaux OSB.	45
Figure 3.5 : Valeur d'isolation thermique ($\Delta T1$) des panneaux OSB revêtus en fonction du taux de recouvrement.	49

Figure 3.6 : Coupe pour le calcul d'indice de carbonisation. a) Échantillon de référence, b) Échantillon traité par le revêtement C.....	51
Figure 3.7 : Indice de carbonisation en fonction de grammage des différents revêtements.....	52
Figure 3.8 : Temps de brûlage total des différents revêtements à chaque niveau de grammage.	57
Figure 3.9 : Relation entre la propagation de la flamme et la consommation du panneau.	58
Figure 3.10 : Relation entre propagation de la flamme et la valeur d'isolation.	59
Figure 3.11 : Relation entre la propagation de la flamme et l'indice de carbonisation.	60
Figure 3.12: Relation entre le temps de brûlage total et la propagation de la flamme.	61
Figure 3.13 : Courbes TGA des revêtements ignifuges.....	62
Figure 3.14 : Développement du processus d'intumescence (Duquesne et al. 2004).	64
Figure 3.15 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement A à différents rapports massiques.....	66
Figure 3.16 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement B à différents rapports massiques.....	67
Figure 3.17 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement C à différents rapports massiques.....	67
Figure 3.18 : Aspect des résidus formés lors des analyses thermogravimétriques des mélanges bois-peinture à 70% de concentration des trois peintures (A, B et C).....	68
Figure 3.19 : Courbes TGA théoriques du bois dans les mélanges à 50 %.	70

Figure 3.20 : Relations entre la masse résiduelle à 700 °C obtenue par TGA et la perte de masse lors du test de tunnel à deux pieds.	72
Figure X.1 : Courbe TGA du revêtement A.....	102
Figure X.2 : Courbe TGA du revêtement B.....	102
Figure X.3 : Courbe TGA du revêtement C.....	103
Figure X.4 : Courbe TGA des lamelles non traités.	103
Figure X.5 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement A.	104
Figure X.6 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 40% de revêtement A.	104
Figure X.7 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement A.	105
Figure X.8 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 70% de revêtement A.	105
Figure X.9 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement B.	106
Figure X.10 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement B.	106
Figure X.11 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 70% de revêtement B.	107
Figure X.12 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 75% de revêtement B.	107
Figure X.13 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement C.	108
Figure X.14 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 40% de revêtement C.	108
Figure X.15 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement C.	109
Figure X.16 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 68% de revêtement C.	109

RÉSUMÉ

Par son aspect naturel, durable et écologique, le bois et ses dérivés restent parmi les matériaux de construction les plus utilisés. Pour conquérir de nouveaux marchés, le bois et ses dérivés doivent répondre aux exigences dictées par le code des bâtiments notamment ceux reliés à la résistance au feu. L'ignifugation est une technique qui a pour but de retarder ou de stopper la propagation des flammes. L'application de revêtements ignifuges représente un moyen très convoité pour améliorer la performance des produits du bois face au feu. Ils agissent comme des barrières physiques qui empêchent les produits inflammables de s'échapper et l'oxygène d'atteindre le substrat. Ainsi, l'objectif général de ce projet est d'évaluer la performance de revêtements ignifuges pour l'amélioration de la résistance au feu des panneaux OSB. Plus spécifiquement, le projet vise à évaluer les propriétés thermiques et de propagation de la flamme de divers revêtements commerciaux. Ainsi, trois peintures commerciales intumescents étaient appliquées sur les surfaces des panneaux OSB à trois niveaux de grammage. La performance de ces peintures vis-à-vis du feu a été évaluée par le test de propagation de la flamme (Méthode du tunnel à deux pieds) et par le test de brûlage vertical. Le test du tunnel à deux pieds a permis d'évaluer les principales propriétés améliorées par les traitements à savoir la propagation de la flamme, la consommation du panneau, la valeur d'isolation thermique et l'indice de carbonisation. Le temps de brûlage était la caractéristique mesurée durant le test de brûlage vertical. Les résultats des tests ont montré que tous les revêtements utilisés procurent aux panneaux des propriétés ignifuges, ces améliorations sont proportionnelles au grammage (taux de recouvrement) appliqué. Des corrélations mettant l'effet du grammage sur les propriétés mesurées sont obtenues, ainsi que des interrelations entre les caractéristiques évaluées. Les résultats ont permis aussi de comparer l'efficacité des différents revêtements étudiés. L'analyse thermogravimétrique des revêtements ainsi que les mélanges bois-peintures été réalisée afin de mieux comprendre le comportement des revêtements ignifuges à différents stades de dégradation thermique. Les revêtements ignifuges testés présentent un résidu stable dans une plage de température élevée. La stabilité thermique des mélanges bois-peintures (masse résiduelle) augmente avec la proportion du revêtement dans le mélange pour chaque peinture, mais la comparaison des performances ignifuges entre les différentes peintures n'était pas significative si on ne considère que cette stabilité. Le tracé des courbes thermogravimétriques théoriques du bois dans les différents mélanges à proportion égale a permis de mettre en évidence l'effet des revêtements sur le bois.

Mots clés : Peinture intumescents, revêtement du bois, revêtement ignifuge, propagation de la flamme, test du brûlage vertical, analyse thermogravimétrique.

INTRODUCTION

Contexte

Malgré l'existence de plusieurs matériaux de construction, le bois reste un matériau très convoité dans divers secteurs. Les avantages environnementaux, mécaniques, structuraux et écologiques font de lui le matériau par excellence. L'émergence de nouveaux produits d'ingénieries propulse les limites d'utilisations de ce matériau. Néanmoins, pour conquérir de nouveaux marchés notamment dans le secteur de construction non résidentiel, le bois doit obéir à plusieurs normes dictées par le code du bâtiment, parmi ces normes il y a celles reliés à la résistance au feu.

Par sa nature, le bois est un matériau inflammable. Pour surmonter cet inconvénient, il existe plusieurs traitements d'ignifugations conçus pour améliorer la résistance au feu du bois. Dans notre étude, l'application des revêtements ignifuges sur la surface des panneaux de lamelles orientées était le traitement choisi. À des températures élevées, les peintures intumescentes ont tendance à former une couche multicellulaire carbonisée sur la surface des substrats procurant ainsi une protection contre le feu au substrat. L'application de cette méthode offre plusieurs avantages dont la facilité d'application et de ne pas modifier les propriétés intrinsèques du matériau comme les propriétés mécaniques.

L'efficacité des revêtements ignifuges est mise à l'épreuve à l'aide des tests de feu à petite échelle à savoir le test du tunnel à deux pieds et le test du brûlage vertical. Le taux de recouvrement des peintures sur la surface des panneaux était le facteur mis en évidence. Des corrélations entre les propriétés mesurées et le taux de recouvrement sont déduites.

L'analyse thermogravimétrique des peintures ignifuges utilisées vient compléter la compréhension des mécanismes de retardement de feu par les revêtements

intumescents ainsi que des phénomènes intervenant lors du développement de la couche protectrice, les stades de dégradations, la stabilité thermique, la masse résiduelle à haute température qui sont les facteurs déterminant la qualité de la protection procurée par un revêtement ignifuge. L'analyse thermogravimétrique des mélanges bois-peinture est réalisée afin d'établir le lien entre la stabilité thermique des lamelles et le taux de revêtement dans le mélange. Ainsi, l'effet du grammage sera évalué par les tests à petite échelle et par analyse thermogravimétrique. Finalement, la possibilité d'une relation entre les tests au feu et l'analyse thermogravimétrique a été traitée.

Objectifs

L'objectif de ce projet est d'évaluer la performance de trois revêtements ignifuges pour l'amélioration de la résistance au feu des panneaux OSB. Les objectifs spécifiques sont :

1. Évaluer les propriétés ignifuges de trois revêtements intumescents commerciaux vis-à-vis le feu,
2. Étudier l'effet du grammage sur les propriétés de retardement de feu,
3. Comparer l'efficacité des peintures étudiée,
4. Évaluer les propriétés thermiques des revêtements.

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCE

1. Propriétés thermiques du bois

Sous l'effet de la température, le bois et ses dérivées subissent une dégradation thermique, il est connu que le bois ne brûle pas sous son aspect solide, mais plutôt le dégagement des composés gazeux à des températures élevées qui amorce la combustion, l'étude de la pyrolyse et la combustion du bois est élémentaire pour mieux comprendre le comportement des différents composants de ce matériau (Browne 1956, Schaffer 1966). La présente section est dédiée à la description des étapes de dégradation thermique du bois.

1.1 Pyrolyse et combustion

La Pyrolyse est la dégradation thermique des hydrocarbures en absence ou à teneur faible en oxygène, cette dégradation donne naissance à des composés volatils de masse moléculaire relativement faible (tableau 1.1). La combustion survient à des températures plus élevées en présence d'oxygène, de source d'initiation et de combustibles volatils issus de la pyrolyse.

Lorsque le bois atteint des températures élevées, les différents composés chimiques subissent une dégradation thermique, l'ampleur des changements dépend de la durée de l'exposition. À des températures inférieures à 100°C, des réductions permanentes de la résistance peuvent avoir lieu dépendamment de la teneur en humidité du bois, l'espèce du bois et la période d'exposition. La rupture des liaisons chimiques commence à des températures supérieures à 100°C engendrant des pertes de masse dues à la dégradation des polysaccharides (White et Dietenberger 2010). La pyrolyse

de bois se produit selon quatre stades de température (Bryan 1998, Shafizadeh 1984, Atreya 1983, Browne 1956).

Entre 100 et 200°C, le bois se déshydrate et libère de la vapeur d'eau et d'autres gaz incombustibles comme le dioxyde de carbone (CO₂), l'acide formique, l'acide acétique. Avec l'exposition à des températures plus élevées, le bois peut être carbonisé, des réactions exothermiques peuvent avoir lieu car l'air ambiant peut pénétrer et réagir avec le charbon poreux développé. En l'absence d'oxygène ou la présence d'une quantité relativement faible, la dégradation thermique est dite pyrolyse.

Entre 200 et 300 °C, certains composants du bois commencent à subir une pyrolyse significative, des quantités importantes de monoxyde de carbone (CO) et de goudron à haut point d'ébullition sont produites. Les hémicelluloses commencent à se dégrader à des températures de 225 °C et leur dégradation est complétée à environ 300 °C. La dégradation de la lignine se reproduit entre 225 et 450 °C. Une grande partie de l'acide acétique libérée de la pyrolyse de bois est attribuée à la déacétylation des hémicelluloses. Les réactions de déshydratation commencent à 200 °C et sont responsables de la pyrolyse de la lignine conduisant à un grand rendement en charbon.

Puisque la majeure partie des parois cellulaires du bois est composée de la cellulose, la dégradation thermique de ce polymère domine la pyrolyse de bois (Shafizadeh et Fu 1973). La cellulose est le polymère le plus stable thermiquement, il commence à se décomposer à 375 °C et se dégrade entièrement sur une courte plage de température. Sa dégradation peut être accélérée en présence d'eau, d'acides et d'oxygène. Le degré de polymérisation de la cellulose diminue avec l'augmentation de la température, ce qui conduit à l'apparition des radicaux libres, ainsi que les groupements carbonyles, carboxyles, et hydroperoxydes. À ce stade de la pyrolyse, les réactions sont généralement endothermiques. La réaction de l'oxygène avec le charbon et les composés volatils conduit à la combustion rougeoyante.

Au troisième stade de température (300 à 450°C), la dépolymérisation de la cellulose conduit aux produits combustibles volatils. Les chaînes aliphatiques se détachent des noyaux aromatiques de la lignine à environ 300°C et les liaisons carbone-carbone des unités de la lignine se rompent entre 370 à 400°C. La décomposition de la lignine est exothermique ainsi que la décomposition des composés volatils formés. Cette chaleur de la phase vapeur est transmise dans le bois et fait augmenter le taux de la pyrolyse dans la phase solide. Quand le mélange combustible accumule une chaleur suffisante, une radiation est émise dans le spectre visible. Ce phénomène est connu comme la combustion flamboyante en phase vapeur. Les produits de la pyrolyse quand le bois est thermiquement dégradé sont présentés au tableau 1.1 (Shafizadeh 1984).

Tableau 1.1: Produits de la pyrolyse du bois.

Produits	Pourcentage du produit dans le mélange (%)
Acétaldéhyde	2,3
Furane	1,6
Acétone	1,5
Propéanal	3,2
Méthanol	2,1
2,3-Butanedione	2,0
1-Hydroxy-2propanone	2,1
Glyoxal	2,2
Acide acétique	6,7
5-Methyl-2-furaldehyde	0,7
Acide formique	0,9
Dioxyde de carbone	12,0
Eau	18,0
Charbon	15,0
Goudron (à 600°C)	28,0

Au-delà de 450°C, le résidu du bois est sous forme d'un charbon activé, subit une dégradation par oxydation donnant le CO₂, le CO et le H₂O, jusqu'à l'obtention des cendres. Il s'agit alors de l'incandescence.

1.2 Méthodes d'ignifugation

Considéré comme un matériau polymérique, le bois est combustible. Les risques liés à cette combustion sont caractérisés par les indices suivants (Dobele et al. 2007) :

- Combustibilité, la capacité de maintenir et de développer le processus de combustion;
- Émission de fumées lors de la combustion et l'action des flammes;
- Toxicité des produits de combustion et de la pyrolyse;
- Résistance au feu de la construction, à savoir, le degré de préservation des propriétés physico-mécaniques sous l'action des flammes.

Pour protéger le bois de l'action des flammes, les techniques d'ignifugations sont largement utilisées souvent par des agents de retardements de feu qui perturbent le mécanisme de dégradation. Les retardateurs de feu agissent par différentes manières, les principales classes de traitement sont détaillées dans les suivantes (Rowell et al. 2005).

1.2.1 Traitement avec de produits chimiques qui favorisent la formation de charbon à des températures moins élevées que le bois non traité

Les retardateurs de feu de cette classe modifient la production du carburant en augmentant le taux de charbon, en réduisant la production de volatils, et vapeur combustible et en diminuant la température de commencement de la pyrolyse (Rowell et al. 2005). Le dihydrogène orthophosphate d'ammonium augmente

considérablement le taux du résidu carbonneux et abaisse la température de la dégradation thermique (Shafizadeh 1984).

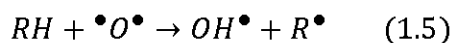
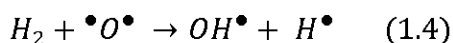
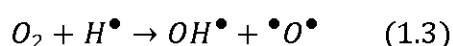
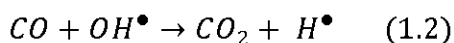
1.2.2 Produits chimiques agissant comme des radicaux libres pour piéger les flammes

Il existe des retardateurs de feu qui peuvent affecter les réactions en chaînes par inhibition dans la phase vapeur. Les halogènes comme le chlore et le brome sont de bons inhibiteurs de radicaux libres. En général, une grande concentration en halogène entre 15 à 30 % en masse est requise pour avoir un bon effet de retardement de feu. L'efficacité des halogènes diminue avec l'électronégativité de l'élément dans l'ordre suivant : Br > Cl > F (Rowell et al. 2005). Ils agissent par l'action de l'acide halohydrique correspondant en piégeant les radicaux chauds de la flamme. Les étapes sont schématisées par les réactions suivantes (Brossas 1995) :

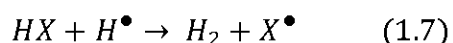
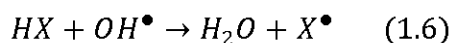
- Génération primaire des espèces actives :



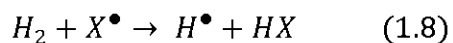
- Réactions de propagation de la combustion et formation des radicaux de haute énergie :



- Réactions d'inhibition des radicaux chauds par les hydracides correspondants :



- Régénération des espèces actives :



Sur le plan chimique, HX agit comme un catalyseur puisqu'il est régénéré.

1.2.3 Produits chimiques employés pour former un revêtement à la surface du bois

Les revêtements ignifuges forment une barrière physique sur la surface du bois empêchant l'oxygène d'atteindre le substrat et les produits inflammables de s'échapper. Les revêtements ignifuges isolent les matériaux de l'effet de la chaleur (Rowell 2005). Les barrières les plus fréquentes sont ceux à base de silicates de sodium et les revêtements intumescents. Ces derniers seront traités en détail ci-dessous (section 1.3). Les revêtements à base de céramique peuvent aussi être utilisés comme le montre l'étude de Harada et al. (2007), où la combinaison de revêtement céramique avec un traitement d'imprégnation a rendu le bois quasi inflammable.

1.2.4 Traitement pour l'augmentation de la conductivité thermique du bois

Le bois peut être traité avec un alliage de métaux avec un point de fusion à 105°C. Lorsque le bois est chauffé, l'élévation de la température dans le bois traité est plus lente que dans le bois non traité jusqu'à ce que la température de fusion soit atteinte (Browne 1956). Au-dessus de la température de fusion de l'alliage, l'augmentation de la température est la même pour le bois traité et non traité. Une autre approche suggère que des produits ignifuges provoquent des changements chimiques et physiques de sorte que la chaleur est absorbée par les produits chimiques empêchant ainsi la surface de bois de s'allumer. Cette théorie est basée sur les produits chimiques ayant beaucoup d'eau de cristallisation, la chaleur latente de la pyrolyse est absorbée par l'eau ce qui ralentit les réactions de la pyrolyse dans le bois (Rowell et al. 2005).

1.2.5 Traitements pour diluer les gaz combustibles provenant du bois avec des gaz non-combustibles

Les produits chimiques tels que le dicyandiamide et l'urée produisent des gaz non-combustibles à des températures plus faibles que celle de la pyrolyse. Le borax produit des grandes quantités de vapeur d'eau. La présence de produits non-

combustibles fait augmenter la demande en produits volatils nécessaires pour l'allumage. De plus, le mouvement des gaz loin du bois peut diminuer la concentration d'oxygène près de la couche limite entre le bois et la phase vapeur réactive (Rowell et al. 2005).

1.2.6 Traitements pour réduire l'énergie contenue dans les gaz combustibles

Les additifs inorganiques abaissent la température d'initiation de la pyrolyse, les réactions de déshydratation, en particulier de la cellulose, augmentent le taux de charbon et diminuent le taux de formation des composés volatils. Cependant, des réactions en concurrence comme la décarbonylation, la décomposition des composés simples et des réactions de condensation peuvent avoir lieu. Les changements favorisant une réaction sur une autre affectent la chaleur globale de la réaction. Cette classe de traitement ignifuge permet de réduire la chaleur moyenne de combustion des gaz volatils libérés au premier stade de la pyrolyse, à 40 % de volatilisation, le bois non traité libère 29 % de la chaleur issue des gaz combustibles volatils, le bois traité libère 10 à 19 % de cette chaleur. De tous les produits chimiques testés, le chlorure de sodium ne réduit pas la chaleur des gaz combustibles (Rowell et al. 2005).

1.3 Revêtements ignifuges intumescent

Le mot intumescent vient du *Latin intumescere* qui veut dire « à gonfler ». Lorsqu'un matériau intumescent atteint une température bien déterminée, il commence à enfler puis à s'élargir, il résulte ainsi une couche sous forme d'une mousse cellulaire carbonisée sur la surface du matériau qui le protège de l'action de flux de la chaleur ou le feu et empêche l'oxygène d'atteindre le substrat (Bourbigot et al. 2004; Samyn et al. 2010). Les matériaux intumescent peuvent augmenter leur volume de 50 fois et parfois même 200 fois formant ainsi une barrière physique qui protège les matériaux (Wladyka-Przybylak et Kozłowski 1999). Les revêtements intumescent sont parmi les moyens de retardement du feu les plus utilisés dont le but ultime est de maintenir

l'intégrité et la fonctionnalité du substrat le plus longtemps possible (Bourbigot et Duquesne 2010). De plus, ils présentent plusieurs avantages : ils ne modifient pas les propriétés intrinsèques du matériau (exemple des propriétés mécaniques), faciles à appliquer, et peuvent être utilisés sur plusieurs matériaux y compris le bois (Luneva et Petrovskaya 2008), les matériaux métalliques (Jimenez et al. 2006a), les polymères (Bourbigot et al. 2004) et les textiles (Horrocks et al. 2005). Les phénomènes d'inflammation surviennent la plupart du temps sur la surface des matériaux, il est avantageux de protéger cette zone en premier lieu (Duquense 2001).

Dans la pratique, le taux de propagation de la flamme lors d'un incendie est le facteur le plus important. Les revêtements intumescents peuvent réduire le phénomène de propagation des flammes d'où leur importance pour prévenir les événements tragiques qui entraînent les pertes de vies et des biens (Wladyka-Przybylak et Kozlowski 1999).

1.3.1 Composition et mécanisme d'intumescence

Les revêtements intumescents se composent d'additifs intumescents liés ensemble par un liant. En général, les trois ingrédients intumescents sont :

- un acide inorganique ou un composé qui forme des produits acides lors de chauffage (source d'acide);
- un agent de carbonisation;
- un composé qui se décompose à la bonne température et au bon moment afin de permettre le soufflage du système (agent de gonflement).

La composition des systèmes intumescents se dirige vers la limitation d'utilisations des halogènes dans la préparation des systèmes intumescents. Ce changement est relié à la réglementation environnementale en vigueur ainsi que la conscience publique des dangers reliée à l'utilisation des halogènes (Ducrocq et al. 2006). Les formulations à

base de phosphores et les oxydes de métaux sont les plus répandus. La nanotechnologie peut jouer un rôle clé dans la composition des systèmes intumescents par l'amélioration des propriétés ignifuges, réductions de la charge des agents retardateurs et ainsi baisser le prix du traitement, multifonctionnalité, amélioration des propriétés mécaniques. L'utilisation des composés phosphoriques est plus avantageuse en termes de charge et de coût comparativement aux hydroxydes de métaux. (Bourbigot et Duquesne 2010).

La formulation intumescence doit être optimisée en termes de propriétés physiques (résistance et expansion de la couche carbonisée, viscosité), et de propriétés chimiques (réactivité, stabilité thermique) en vue de fournir une protection efficace au substrat (Jimenez et al. 2006b). La formulation la plus fréquente est à base de polyphosphate d'ammonium, mélamine et Pentaérythritol. Le simple mélange aléatoire des trois compositions d'intumescence n'assure pas le comportement intumescent. Les trois composés doivent montrer un comportement thermique approprié (Camino et al. 1989). Selon Gu et al. (2007), les températures de dégradation des différents agents intumescents obtenus par l'analyse thermogravimétrique sont les facteurs clés pour former une couche protectrice idéale. Ces auteurs mentionnent que si la température de dégradation de la mélamine (agent de gonflement) est très inférieure à celle du polyphosphate d'ammonium (source d'acide) les gaz s'échappent avant la carbonisation, dans le cas contraire les gaz s'échappent après la formation de la couche carbonée ce qui induit un mauvais moussage de la couche. En même temps, si la décomposition de pentaérythritol (agent de carbonisation) survient avant celle du polyphosphate d'ammonium, le phénomène de formation de couche protectrice est perturbé. Les étapes qui prennent place dans le développement des phénomènes intumescents sont les suivants (Vandersall 1971, Camino et al. 1985) :

Tableau 1.2 : Composition des systèmes intumescents (Bourbigot et Duquesne 2010).

Source d'acide	Agent de carbonisation	Agent gonflant
Acide inorganique : phosphorique, sulfurique, borique Sel d'ammonium : Phosphates, polyphosphates, borates, polyborates, sulfates, halogénures. Phosphates d'amine ou d'amide: Mélamine phosphate; Urée avec acide phosphorique; Produit de la réaction de l'ammoniac avec P ₂ O ₅ . Composés organophosphorés: phosphate de tricrésyle; Alkylphospahtes; Halo alkyl phosphates	L'amidon (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n Dextrines (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n Sorbitol Mannitol Résinesphénol-formaldéhyde Pentaérythritol C(CH ₂ OH) ₄ Méthylolmélamine	Urée Urée-formaldéhyde Résines Mélamine Dicyandiamide

1. L'acide inorganique est libéré entre 150 et 250°C dépendamment de sa source et les autres composés;
2. L'acide estérifie les composés riches en carbone légèrement au-dessus de sa température de libération;
3. Le mélange de composés fond avant ou durant l'estérification;
4. L'ester se décompose via la déshydratation résultant de la formation d'un résidu de carbone-inorganique;
5. Les gaz résultants de ces réactions et les produits de dégradation (en particulier la décomposition de l'agent de gonflement) font mousser le composé de carbonisation;

6. À la fin de la réaction, la congélation et finalement la solidification se produisent. Ce solide est sous forme de mousse multicellulaire.

1.3.2 Facteurs intervenants dans le concept intumescent et nouvelles tendances

Un survol de la littérature montre que les différents travaux de recherches ont pour but d'améliorer la composition des formulations intumescentes, incorporer de nouvelles technologies, ainsi l'augmentation de l'efficacité des revêtements ignifuges. L'aspect synergique des formulations a trouvé un large intérêt auprès des chercheurs, où l'effet de la formulation intumescente en présence d'un agent synergique exemple de zéolites naturel (Demir et al. 2005) et de borate de zinc (Samyn et al. 2007) est plus grand que l'addition des effets de chacun individuellement. Dans cette section, on touchera aux différents paramètres intervenant sur les formulations intumescentes, ainsi que les nouvelles tendances.

Chuang et al. (2008) ont étudié l'effet de revêtement ignifuge sur le contreplaqué à base de Luana rouge (*Parashorea* spp.). Les formulations utilisées sont à base d'émulsion acrylique, pentaerythritol comme agent de carbonisation, de mélamine comme agent de gonflement et de polyphosphate d'ammonium comme source d'acide. L'étude portait sur l'effet de la variation du ratio liant/agent de carbonisation et le ratio agent de gonflement/source d'acide. Les résultats obtenus par le calorimètre à cône ont montré qu'une faible teneur en liant (ratio liant/agent de carbonisation) et une teneur faible en agent de gonflement (ratio agent de gonflement/source d'acide) augmentent l'intervalle entre les pics maximaux de dégagement de chaleur et des valeurs relativement faibles de ces derniers. Les formulations avec les ratios liant/agent de carbonisation/agent de gonflement/source d'acide (15/35/22,5/27,5) et (15/35/15/35) sont les formulations les plus performantes. Dans cette étude, la formulation avec les ratios (15/35/15/35) forme l'ester de phosphate plus tôt, Ce constat peut être attribué aussi à la teneur relativement élevée en source d'acide. Les résultats obtenus sur le calorimètre à cône, l'analyse thermogravimétrique et la

spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ont été similaires. Une estérification plus rapide donne de meilleurs résultats en terme d'ignifugation par formation de bouclier carbonisé (Baljinder et Horrocks 1996; Lindsay et al. 2000; Drevelle et al. 2004; Bourbigot et al. 2004).

Les revêtements à base de polyuréthanes trouvent plusieurs applications sur différents substrats (bois, acier, matériaux de construction), néanmoins, ces revêtements sont hautement inflammables, l'ajout d'additifs intumescents aux revêtements en polyuréthane augmente leurs résistances au feu. L'ajout des agents de retardement est accompagné de deux problèmes : faible compatibilité avec les polyuréthanes et leurs pourcentages d'ajout élevés. Hassan et al. (2008) ont utilisé la montmorillonite modifiée (échange d'ion avec le chlorure ferrique en premier lieu, et modifier ensuite avec un polymère de butyle acrylate) avec une charge de 20 %, les performances trouvées sur le calorimètre à cône montrent que la montmorillonite modifiée augmente la résistance au feu des revêtements de polyuréthanes appliqués sur le bois avec un comportement intumescent élevé. D'autre part, le butyle acrylate a permis d'augmenter la compatibilité de polyuréthane avec les ingrédients intumescents (mélamine phosphate et pentaérythritol) en formant un mélange homogène.

La couche protectrice formée a pour rôle de protéger le substrat de l'effet de la chaleur, la nature de la protection procurée dépend de la structure chimique et les propriétés physiques de bouclier carbonisé. La formulation polyphosphate d'ammonium, pentaérythritol et mélamine est la plus répandue. Andersson et al. (2007) ont étudié l'effet de l'agent de carbonisation sur l'isolation thermique selon une méthode proposée par les auteurs (la surface revêtue est exposée à un brûleur Bunsen, la température sur la surface non revêtue est enregistrée à l'aide d'un pyromètre infrarouge), le taux de gonflement et l'aspect rhéologique de la couche protectrice. Dans l'étude, le pentaérythritol, di-pentaérythritol et tri-pentaérythritol sont utilisés. La formulation utilisant le pentaérythritol est considérablement plus efficace par le maintien d'une température basse le long du processus. La température

se développe plus rapidement avec des formulations ayant le di et le tri-pentaérythritol comme agent de carbonisation. Le taux de gonflement est aussi supérieur dans le cas du pentaérythritol. Les essais sur le rhéomètre ont montré que la formulation avec le pentaérythritol entame le processus d'intumescence à des températures plus basses que les formulations avec le di et le tri-pentaérythritol, probablement à cause de la forte réactivité entre le pentaérythritol et le polyphosphate d'ammonium (estérification à 190°C).

L'utilisation des additifs à base de nano et micro particules dans les formulations de revêtements intumescents ont fait leurs preuves, de nombreuses études ont été consacrées. Li et al. (2007) ont utilisé la combinaison du graphite expansible avec le di siliciure de molybdène (MoSi_2) dans la formulation classique polyphosphate d'ammonium-pentaérythritol-méla mine. L'effet d'isolation thermique a été intensifié par le prolongement de temps pour atteindre un seuil de 500°C fixé par les auteurs, ainsi que le taux de formation de la couche protectrice. À partir de la microscopie électronique à balayage et la thermogravimétrie, les auteurs ont suggéré que l'effet synergique est obtenu par la formation d'une couche semblable à la céramique produite par le MoSi_2 sur la surface de la couche multicellulaire. Wang et al. (2005) ont utilisé le nano organo-modifié à double couche d'hydroxydes (nano-size magnesium aluminum-layered double hydroxides) comme additif au revêtement intumescent à base de résine acrylique, les différents revêtements sont appliqués sur des plaques métalliques, les échantillons revêtus avec la formulation à 1,5 % d'organo-modifié à double couche d'hydroxydes ont permis l'augmentation de l'effet isolant du revêtement. L'épaisseur de la couche carbonée est similaire avec ou sans le nano-additif, l'amélioration des propriétés thermiques est reliée alors à la résistance de la couche carbonée formée par le revêtement modifié. Les cavités distinguées dans la couche carbonée dans le cas du revêtement modifié sont plus petites que celle de la couche formée par le revêtement sans nano-additif. Les auteurs mentionnent que les dimensions des cellules expliquent l'augmentation des propriétés mécanique de la

couche carbonée. Plus les cavités sont fermées, dispersées d'une manière uniforme (mousse), plus l'effet isolant et l'efficacité du bouclier sont élevés. Dans une étude plus récente, Wang et Yang (2011a) attribuent la détérioration de la protection du bouclier à la taille très grande des cavités et la non-uniformité de ces derniers). Les auteurs postulent que le nano organo-modifié double couche d'hydroxydes catalyse la réaction d'estérification entre le polyphosphate d'ammonium et le pentaérythritol. Wang et al. (2007a) ont étudié l'effet de l'ajout de nano-argile au revêtement ignifuge intumescent. Une dispersion raisonnable des nano-argiles était distinguée par la microscopie électronique en transmission expliquée par la formation de nano-composites. L'effet de taux de charge est mis en évidence. À l'ajout de 1,5 % de nano-argile, le revêtement présent de meilleures propriétés (par diminution de la conductivité thermique), l'ajout de 3 % de nano-argile à la formulation avait un effet négatif sur les propriétés de retardement de feu. Les auteurs suggèrent qu'une couche semblable à la céramique se forme sur la surface du revêtement intumescent.

Le liant utilisé dans les formulations des revêtements peut contribuer au développement des phénomènes d'intumescence particulièrement dans la formation de la couche protectrice ainsi que son homogénéité d'où l'importance du choix de polymère liant. Duquesne et al. (2005) ont étudié l'effet du liant dans les revêtements intumescents. Le mélange styrène substitué avec les copolymères acryliques faisait l'objet de l'étude, en variant la nature chimique des monomères (linéaire et réticulés, rhéologie). Les auteurs ont conclu que l'isolation thermique est plus importante quand le liant est réticulé. L'importance de la nature chimique du liant dépend de sa réactivité avec la source d'acide (polyphosphate d'ammonium), elle est plus élevée dans le cas du styrène substitué comparativement avec le styrène. Une protection optimale est obtenue lorsque le liant est composé de résines newtoniennes et rhéologiques avec du styrène substitué. Dans une étude plus récente, Wang et Yang (2011b) ont étudié l'influence de la masse moléculaire du liant à base d'émulsions d'époxy, les masses moléculaires moyennes utilisées sont : 446, 568, 1025, et 1729

g/mol. Les résultats montrent que le liant époxy à masse moléculaire élevée améliore la stabilité thermique du revêtement ainsi que l'anti-oxydation de la couche multicellulaire à des températures élevées. La viscosité de fusion du liant époxy augmente avec l'augmentation de la masse moléculaire qui ralentit la vitesse d'expansion et augmente la taille des pores de la couche carbonisée. Le revêtement avec un liant de masse moléculaire 1025 g/mol présente de bonnes propriétés retardatrices de feu. Toutefois, le liant avec une masse moléculaire très élevée a conduit à la formation d'une couche carbonisée faible et non uniforme ce qui pourrait réduire les performances retardatrices de feu du revêtement.

1.4 Caractérisation des propriétés thermiques

1.4.1 Test de propagation de la flamme

Les bâtiments doivent satisfaire à certaines spécifications de propagation de la flamme dictées par le code du bâtiment. Pour la réglementation, le test du tunnel à 25 pieds est utilisé, il s'agit d'une méthode d'essai normalisée approuvée (ASTM Test method for surface burning characteristics of building Materials E 84) à grande échelle. Dans ce test, l'échantillon à tester est placé dans une position verticale avec la surface à tester en bas. Le but du test est de déterminer la combustion relative de l'échantillon en observant la propagation de la flamme. Des tests similaires à petite échelle existent comme le tunnel à 2 pieds et à 8 pieds, la différence entre les méthodes se situe au niveau du temps d'exposition de l'échantillon. Le test du tunnel à 25 pieds est le plus sévère avec un temps d'exposition de 10 minutes, c'est pour cela qu'il est utilisé dans les codes de bâtiment. Le test du tunnel à 2 pieds permet d'évaluer l'efficacité des revêtements ignifuges en mesurant la propagation de la flamme sur l'échantillon quand il est soumis à une source de flamme standard et sous des conditions contrôlées. Le test de tunnel à 2 pieds est moins sévère. Des petits échantillons peuvent être utilisés ce qui le rend un bon outil de développement dans les travaux de traitement ignifuges (Rowell et al. 2005).

1.4.2 Test de brûlage vertical

Il s'agit d'un test comparatif à petite échelle entre les caractéristiques de combustion d'un matériau dans une position verticale sous des conditions contrôlées de laboratoire. La méthode d'essai est décrite dans la norme UL 94 (20 mm vertical burning test) ou bien suivant la norme ASTM D 3801. On présente à la figure 1.1 une illustration du dispositif utilisé pour la réalisation de ce test. La flamme est appliquée pendant 10 secondes sous l'échantillon puis retirée à une certaine distance, la combustion de l'échantillon est observée et le temps pendant lequel la flamme persiste est noté. Une deuxième application est réalisée et le temps du brûlage est noté aussi. Une classification peut être attribuée à l'issue du test V-0, V-1 et V-2 (Tableau 1.3).

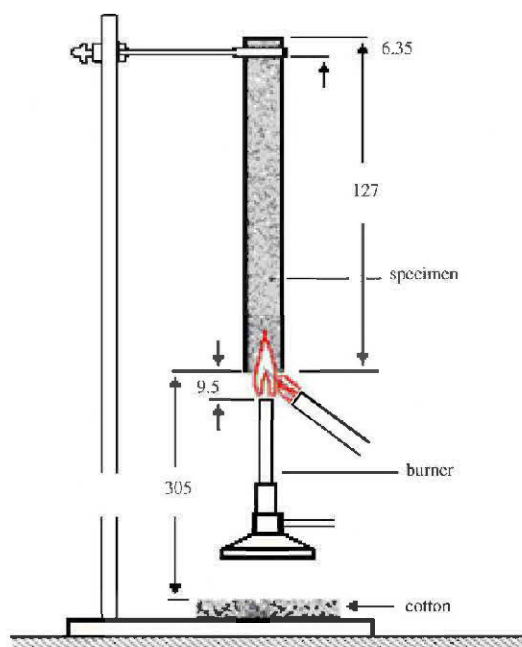


Figure 1.1 : Dispositif pour le test de brûlage vertical (Laoutid et al. 2009).

Tableau 1.3 : Classification des matériaux issus du test du brûlage vertical (ASTM D3801-10).

Critères	V-0	V-1	V-2
Temps de brûlage pour chaque échantillon, t_1 ou t_2	≤ 10 s	≤ 30 s	≤ 30 s
Temps de brûlage total pour une série donnée (t_1+t_2 pour les 5 échantillons)	≤ 50 s	≤ 250 s	≤ 250 s
Temps de brûlage plus le temps d'incandescence pour chaque échantillon après la deuxième application de la flamme	≤ 30 s	≤ 60 s	≤ 60 s
Brûlage ou incandescence d'un échantillon jusqu'aux pinces de fixation de l'échantillon	Non	Non	Non
Allumage du coton par les goulettes ou particules	Non	Non	Oui

1.4.3 Analyse thermogravimétrique (TGA)

De loin, l'analyse thermogravimétrique est le test de décomposition thermique le plus couramment utilisé. Dans ce test, l'échantillon est suspendu sur une balance sensible et exposé à une chaleur dans une chambre en présence d'azote. Le flux de gaz inerte a le rôle d'évacuer les produits de la pyrolyse ou de la combustion. Dans la procédure isotherme, la perte de masse est enregistrée en fonction du temps et de la température (Rowell et al. 2005). Pratiquement, il est clair qu'on ne peut pas porter l'échantillon à la température désirée sans qu'une décomposition significative de l'échantillon ne se produise. Dans la procédure non-iso thermique, il est courant de soumettre l'échantillon à une température linéairement croissante à un taux prédéterminé (Neag 1995, Babrauskas 2000). Dans la technologie des revêtements, la TGA est souvent utilisée dans l'analyse de la composition, par exemple, l'étude de la stabilité thermique, la teneur en composé non-volatils, et peut aussi être utilisée pour étudier la cinétique de la décomposition et la stabilité à l'oxydation (Figure 1.2). L'analyse

thermogravimétrique peut devenir un outil d'analyse puissant une fois combinée à la spectroscopie de masse ou à la chromatographie en phase gazeuse (Neag 1995).

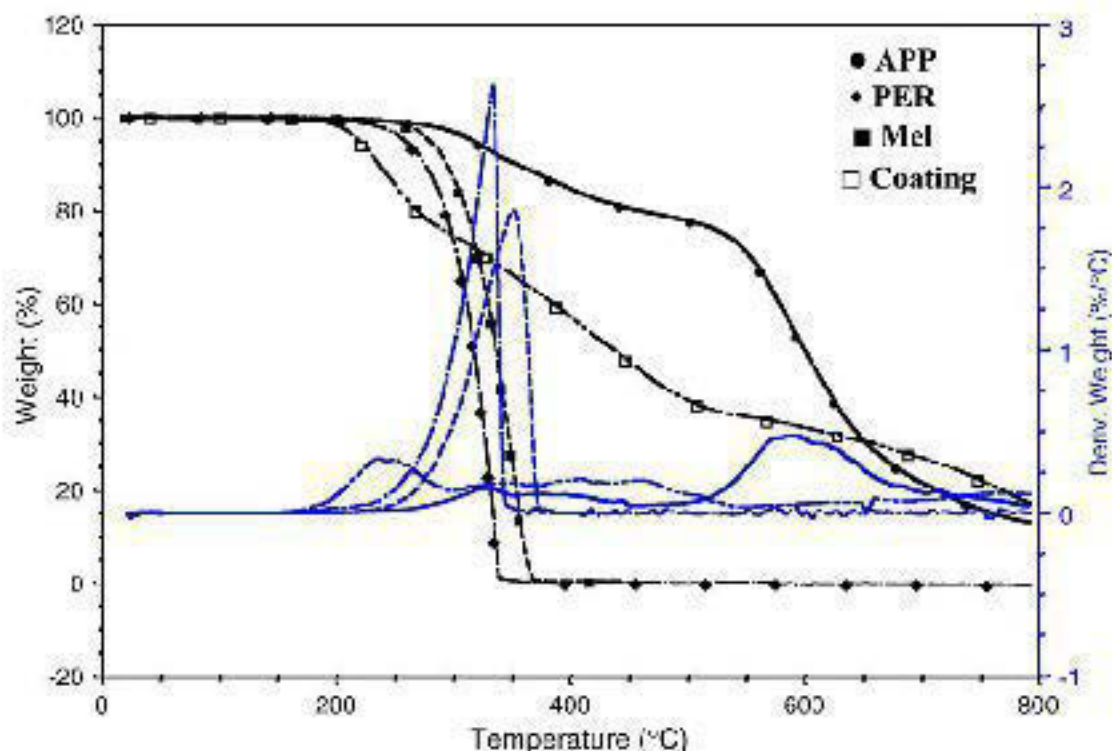


Figure 1.2 : Courbes TGA du polyphosphate d'ammonium, pentaérythritol, mélamine et le revêtement (Gu et al. 2007).

1.4.4 Analyse thermique différentielle (DTA)

Lors du processus de décomposition, il est intéressant de déterminer la chaleur de réaction. Dans la plupart des cas, cette chaleur doit être fournie à l'échantillon pour atteindre la température de décomposition thermique. Ce processus peut générer (réaction exothermique) ou consommer (réaction endothermique) de l'énergie. L'ampleur de cette énergie peut être mesurée. L'échantillon et la référence sont soumis au même régime de température linéaire, leurs températures sont ainsi mesurées et comparées. La température de l'échantillon est inférieure à celle de la référence si la décomposition est endothermique, et exothermique si la température de l'échantillon est supérieure à celle de la référence. En général, l'échantillon est mis

dans un creuset, et un creuset vide est utilisé comme référence (Babrauskas 2000). Le matériel est étalonné par rapport à des références connues à plusieurs températures (Rowell et al. 2005).

1.4.5 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La DSC est similaire à la DTA, sauf que c'est la différence actuelle de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence qui est mesurée. L'échantillon et la référence sont soumis séparément au même programme de température linéaire. La différence de température est compensée selon la nature de la décomposition d'une manière à garder la même température entre l'échantillon et la référence. La calorimétrie permet de mesurer plusieurs caractéristiques illustrées à la figure 1.3.

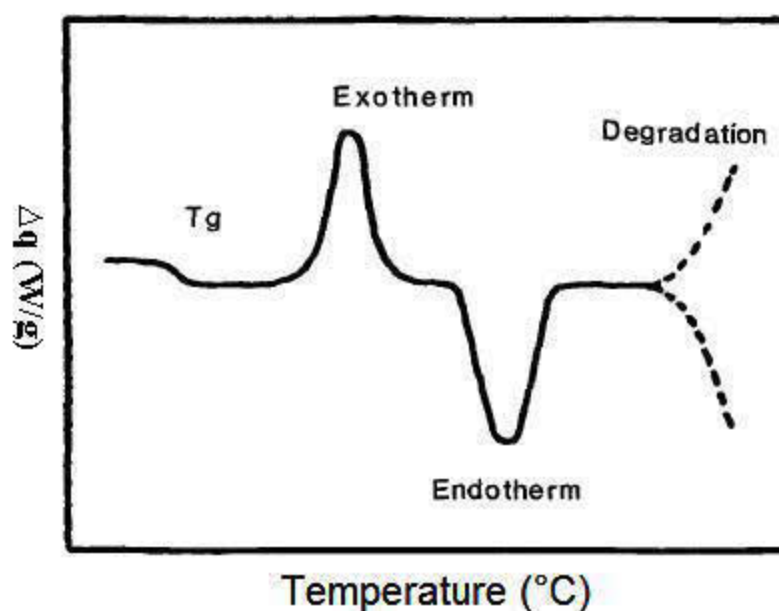


Figure 1.3 : Courbe DSC schématique illustrant les transitions communes (Neag 1995).

Les caractéristiques mesurées par la DSC sont :

- La température de transition vitreuse (T_g) ou une transition liée au changement de la chaleur spécifique;
- Le pic exothermique entraîné par un phénomène physique ou une réaction chimique telle que la cristallisation ou une réaction de réticulation;
- Le pic endothermique étroit lié à la fusion ou plus large causé par la volatilisation des composés à faible masse moléculaire.

1.4.6 Indice critique d'oxygène

L'indice d'oxygène permet de mesurer la concentration minimale d'oxygène dans un mélange fluide d'azote et d'oxygène qui vient soutenir la combustion flamboyante. Ce test a l'avantage de produire uniquement une valeur numérique indicative de l'inflammabilité relative. L'indice d'oxygène, ou l'indice d'oxygène limité (limiting oxygen index LOI) représente le pourcentage minimum d'oxygène nécessaire pour maintenir la combustion d'un échantillon sous des conditions de laboratoire spécifiées.

La figure 1.4 illustre le dispositif utilisé pour la réalisation de ce test. Pour un taux d'oxygène fixe, le temps de combustion et la distance parcourue par la flamme sont mesurés. Tant que le temps de combustion est inférieur à 3 minutes et la distance parcourue par la flamme est inférieure à 50 mm, la teneur en oxygène doit être augmentée.

Les matériaux très inflammables sont susceptibles d'avoir un indice d'oxygène bas, et une valeur élevée pour les matériaux peu inflammables. La taille relativement petite des échantillons est un atout favorisant l'utilisation de ce test dans la recherche et le développement des produits de bois traités contre le feu. La teneur en humidité, l'anisotropie de bois ainsi que les dimensions des échantillons sont les paramètres qui influencent l'indice d'oxygène (White 1979).

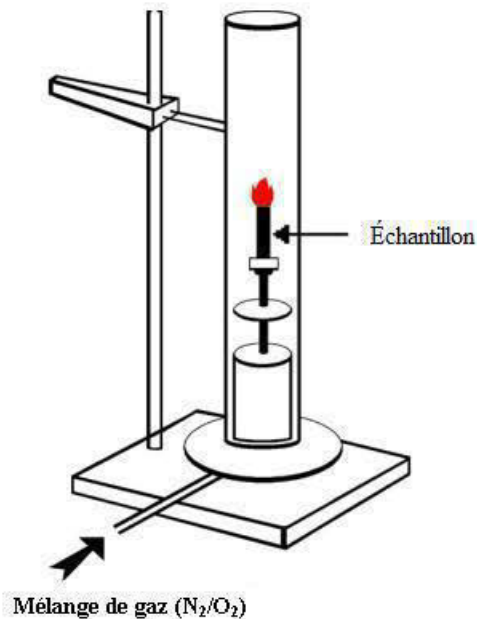


Figure 1.4 : Installation expérimentale d'indice critique d'oxygène (Laoutid et al. 2009).

1.4.7 Calorimètre à cône

Actuellement, le calorimètre à cône est le test le plus couramment utilisé à l'échelle de laboratoire. La méthode était développée la première fois par Babrauskas (1984) au « The National Institute of Standards and Technology, États-Unis ». Le test est normalisé selon la norme nord-américaine ASTM E 1354 et la norme internationale ISO 5660 parties 1 et 2. Le test est généralement utilisé pour déterminer le taux de dégagement de chaleur. Le calcul de flux de chaleur est basé sur le principe de consommation d'oxygène qui mentionne que pour une combustion totale d'un matériau, la quantité de chaleur dégagée par unité de masse d'oxygène consommée est une constante, Huggett (1980) attribue la valeur $13,1 \pm 0,7$ KJ/g d'oxygène consommé à cette constante. Le dispositif pour ce test est illustré à la figure 1.5. L'échantillon de 100 x 100 mm placé sur la cellule de charge est exposé à un flux de chaleur produit par un cône tronqué capable de produire une radiation entre 10-110

KW/m^2 , une étincelle électrique est utilisée pour enflammer les produits de la pyrolyse libérés par l'échantillon. Les produits de combustions et l'air sont collectés par une hotte aspirante, un prélèvement d'échantillon de gaz est prévu sur la conduite d'évacuation afin de déterminer la concentration d'oxygène. La mesure de température et la pression partielle des gaz à travers le diaphragme permettent de calculer le débit massique des gaz d'échappement. Le taux de chaleur dégagée est calculé sur la base de la concentration d'oxygène et le débit massique des gaz d'échappement. Le test est utilisé non seulement pour calculer le taux de chaleur libérée, mais aussi pour la teneur en CO et CO_2 , l'opacité des fumées et d'autres analyses des fumées. (Janssens 2010).

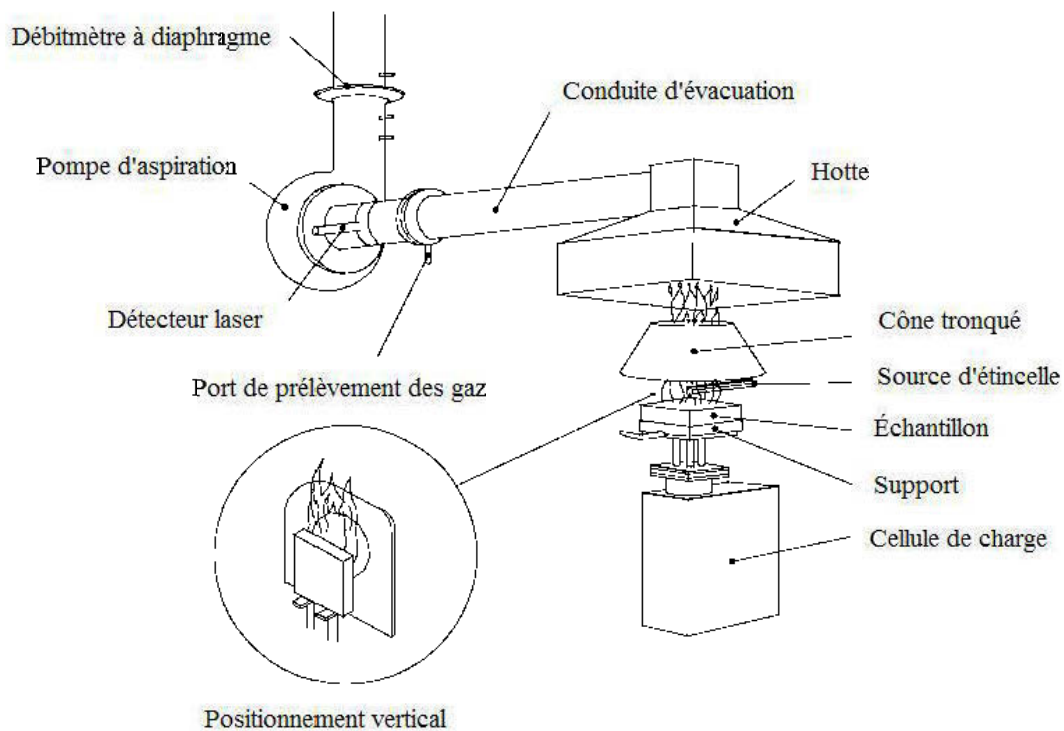


Figure 1.5 : Représentation schématique du calorimètre à cône (Janssens 2010).

Le chapitre précédant traite les propriétés thermiques du bois. En premier lieu, il était nécessaire de comprendre les phénomènes intervenants lors de la décomposition thermique du bois ainsi que les différentes voies d'ignifugations. La deuxième section était consacrée au traitement d'ignifugation par revêtement, la composition chimique des revêtements intumescent, le mécanisme d'ignifugation et les facteurs intervenants dans le concept intumescent étaient détaillés. La dernière section traite les méthodes de caractérisation des propriétés thermiques.

Dans notre travail, le traitement d'ignifugation par revêtements des panneaux à lamelles orientées est la méthode d'ignifugation choisie vue les avantages qu'elle présente. Les principales propriétés thermiques sont étudiées en utilisant des tests destructifs (tunnel à deux pieds et test du brûlage vertical) et une caractérisation non destructive (analyse thermogravimétrique). Un survol de la littérature montre que rare les auteurs qui ont traité ce sujet. Les objectifs tracés, l'utilisation de nouvelles méthodes de caractérisation en l'occurrence le test du brûlage vertical démontrent l'originalité des travaux et l'intérêt porté à l'avancement des connaissances en termes d'ignifugation des produits dérivées du bois.

CHAPITRE II

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Test au feu

2.1.1 Matériel

Le projet vise essentiellement les panneaux à lamelles orientées (OSB). Ces derniers ont été fournis par la compagnie Norbord à La Sarre. Les panneaux utilisés avaient 11 mm d'épaisseur, 1,219 m de largeur et 2,438 m de longueur. Leur masse volumique moyenne était de 612 kg/m³.

Les trois peintures utilisées sont à base de latex (liant) de fabrication canadienne, avec une composition intumescente différente (en se basant sur les fiches signalétiques). Dans ce projet, on a préféré garder la confidentialité, les produits sont désignés par les revêtements A, B et C.

2.1.2 Préparation des échantillons

Pour le test de propagation de la flamme, les échantillons de panneaux OSB sont coupés selon les dimensions suivantes : 610 mm x 310 mm x 11 mm (longueur x largeur x épaisseur). Les panneaux ont été coupés selon la direction des lamelles sur la surface dans la plupart des cas. Les surfaces à peindre sont sèches, propres et dépourvues de contaminants comme l'huile, graisse ou sel. Les différents revêtements sont appliqués sur la surface lisse des panneaux (sans avoir été sablée). L'application est réalisée à l'aide d'un pulvérisateur à air travaillant sous une pression de l'ordre de 70 psi. Les revêtements sont séchés à l'air libre sous une température ambiante. Dans le cas des panneaux à double ou triple couches, l'application de la deuxième ou

troisième couche est réalisée après 8 heures au moins afin de laisser largement le temps à la couche précédente pour sécher. La différence de masse des panneaux avant l'application des peintures ignifuges et après séchage représente la masse du revêtement appliqué. Les différents taux de recouvrements (grammages) obtenus sont présentés dans le tableau 2.1.

Sur chaque panneau traité, trois échantillons de 610 mm x 100 mm x 11 mm (longueur x largeur x épaisseur) sont obtenus. Les échantillons sont ensuite conditionnés à une humidité relative de $50 \pm 5 \%$ et à une température de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 2 semaines pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre.

Pour le test de brûlage vertical, les panneaux sont coupés en 125 mm x 13 mm x 6 mm (longueur x largeur x épaisseur) le long de la direction des lamelles dans la plupart des cas, les surfaces sont sablées en utilisant du papier de fibre de verre. Les surfaces des échantillons sont propres et sèches. L'application des revêtements est réalisée par un pinceau, les échantillons sont ensuite séchés dans un four à 105°C pendant 10 minutes. Par la suite, les échantillons ont été entreposés au laboratoire à 21°C pendant 24 heures avant de tester leurs propriétés de résistance au feu. Pour chaque taux de recouvrement (bas, moyen, élevée), cinq échantillons sont préparés, les grammages obtenus pour chaque peinture ignifuge sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.1: Grammages des différents revêtements appliqués sur les panneaux OSB destinés pour le test de propagation de la flamme.

N ^o Éch.	Grammage (g/m ²)		
	Revêtement A	Revêtement B	Revêtement C
1	110,06	127,39	120,44
2	115,55	115,98	127,49
3	213,98	244,55	225,23
4	218,66	241,70	223,08
5	302,73	332,87	325,50
6	322,05	321,62	313,39

Tableau 2.2: Grammages des différents revêtements obtenus sur les échantillons destinés pour le test de brûlage vertical.

N° Éch.	Grammage (g/m ²)		
	Revêtement A	Revêtement B	Revêtement C
1	63,72	90,99	83,51
2	92,74	74,56	86,45
3	73,95	71,61	78,15
4	89,03	67,16	85,22
5	69,85	69,98	110,70
6	128,93	181,54	156,65
7	134,15	184,06	166,54
8	131,06	178,50	160,34
9	136,10	188,93	155,34
10	141,19	192,15	163,87
11	214,43	248,37	239,95
12	203,93	296,35	241,40
13	210,07	260,56	259,54
14	216,54	234,26	233,02
15	218,98	247,41	228,74

2.1.3 Test de propagation de la flamme

Avant d'entamer le test, le tunnel à deux pieds (Figure 2.1a) doit être calibré à l'aide d'un panneau de calibrage standard en ciment-amiante (zéro propagation de la flamme), la procédure de calibration est la suivante :

1. Ajuster le brûleur afin d'avoir une hauteur de la flamme de 5 cm, puis couper l'alimentation en gaz.
2. Placer le panneau d'étalonnage (ciment-amiante) dans le support, la face lisse vers le bas, mettre ensuite la plaque contenant les thermocouples (Figure 2.1 b), et couvrir avec une plaque de support en ciment-amiante, bien fixer l'assemblage à l'aide des supports des deux côtés du tunnel.

3. Ajuster le flux de gaz à 0,8 L/min, initier le brûleur; enregistrer ensuite la position de la flamme en pouce (in) pour des intervalles de 15 secondes en utilisant les graduations sur la fenêtre d'observation de l'appareil.
4. Enregistrer la propagation extrême de la flamme sur la surface du panneau. Après une période de 4 minutes, éteindre le brûleur.
5. Calculer la moyenne des trois plus hautes lectures consécutives de la progression de la flamme pour le panneau zéro-propagation, noté L_a .

Le calibrage est réalisé quotidiennement, il est important de noter aussi que notre système est chauffé préalablement avant le calibrage par des plaques de support en ciment-amiante afin de réduire les fluctuations sur les mesures des températures.



Figure 2.1 : a) Tunnel à 2 pieds; b) Plaque de thermocouples (Laboratoire FPIinnovations).

2.1.4 Procédure pour le test de tunnel à deux pieds

Le test se déroule sous une hotte afin de permettre l'évacuation des produits de la combustion, elle demeure fermée durant le test et elle est mise en marche directement après la fin du test. Le test est réalisé dans l'obscurité afin de bien lire le déplacement

de la flamme le long de l'échantillon et d'observer les autres propriétés mesurables comme le temps du brûlage.

La procédure d'essai des panneaux expérimentaux est décrite comme suite :

1. Retirer l'échantillon de la chambre de conditionnement, peser immédiatement l'échantillon et le placer dans le support avec la surface revêtue en bas.
2. Placer le dispositif de la mesure des températures (plaque de thermocouples) dans les positions 0, 4, 8, et 12 pouces.
3. Appliquer la flamme et enregistrer l'avancement du front de cette dernière à chaque 15 secondes en lisant la valeur sur les graduations de la fenêtre pendant 5 minutes, de la même manière que la calibration, prendre la moyenne des trois plus hautes lectures consécutives de l'avancement de la flamme, noté L_s .
4. La procédure est répétée au moins pour cinq échantillons, dans notre cas, six échantillons sont testés pour chaque grammage des différents revêtements étudiés.
5. Observer l'inflammation de la surface testée après l'extinction du bruleur, noter le temps du brûlage en secondes.
6. Peser l'échantillon directement après le test.
7. Si possible, répéter la procédure de calibrage en utilisant le panneau ciment-amiante, noter la moyenne des trois lectures les plus élevées de l'avancement de la flamme L_a . La différence entre la moyenne de lecture du panneau testé et l'étalon ($L_s - L_a$) représente la propagation nette de la flamme.
8. Les échantillons sont entretenus dans une boîte métallique pendant 24 heures au moins afin d'assurer que la combustion est totalement complétée.
9. Peser ensuite les échantillons, noter la masse G_1 comme étant la masse de l'échantillon après le test.
10. Les échantillons sont conditionnés à 50 ± 5 % d'humidité relative (HR) et une température de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant deux semaines afin d'atteindre la teneur en

humidité d'équilibre, peser ensuite les échantillons soit G_2 la masse des échantillons testés après conditionnement, la différence entre la masse de l'échantillon avant d'être testé et sa masse après le test et le conditionnement représente la consommation du panneau.

La différence entre la température maximale enregistrée lors du test et la température de la surface non testée représente la valeur d'isolation thermique en l'occurrence la différence à la position 0 pouce. Néanmoins, les autres différences de température dans les positions 4, 8, et 12 pouces sont notées.

Sur la surface testée, les dimensions de la zone de carbonisation sont mesurées, après avoir coupé l'échantillon en deux, l'épaisseur maximale de la portion carbonisée directement sous la zone d'application de la flamme est notée. La multiplication de l'épaisseur maximale, longueur et largeur donne l'indice de carbonisation.

2.1.5 Test de brûlage vertical

Le test de brûlage vertical est réalisé selon la norme ASTM D 3801-10, 1. Avant d'entamer le test, le brûleur doit être ajusté afin de répondre aux exigences de la norme, une flamme bleue d'une hauteur de 20 ± 2 mm, le brûleur doit produire une flamme jaune-bleue au départ, un ajustement de l'apport en oxygène est fait jusqu'à disparition de la couleur jaune-orange. Il est souhaitable d'effectuer un test préalable sur les échantillons, afin d'avoir un aperçu sur le comportement de la matière lors du test. De plus, il faut prendre les mesures nécessaires si l'échantillon produit des écoulements de particules. Si les échantillons produisent des écoulements de particules, le brûleur doit être pivoté à 45 degrés, du coton chirurgical doit être placé sur la base du dispositif.

Les étapes dans la procédure du test de brûlage vertical sont les suivantes :

1. L'échantillon à tester est fixé à une distance de 6 mm du haut, de façon à avoir l'axe longitudinal dans une position verticale.

2. Avant d'allumer le brûleur, les distances entre le bas de l'échantillon et le bec du brûleur (10 ± 1 mm), et entre le bas de l'échantillon et la base (300 ± 10 mm) doivent être respectées. Une fois les vérifications complétées, le brûleur est écarté à une distance d'au moins 150 mm et ensuite allumé.
3. Par un coulissement vertical, le brûleur est mis sous l'échantillon pendant une durée de $10 \pm 0,5$ secondes, le brûleur doit être centré sous le bas de l'échantillon, une fois les 10 s écoulés, le brûleur est écarté, on calcule le temps de brûlage de l'échantillon soit t_1 .
4. On répète la même procédure pour 10 secondes, et on calcule le deuxième temps de brûlage t_2 . On observe l'émission de particules ou gouttelettes par l'échantillon. On note aussi, si il y'a lieu, l'inflammation du coton chirurgical placé à la base du dispositif (voir figure 2.2). Le test ne doit pas être interrompu entre les deux applications de la flamme. Par exemple, en notant le premier temps de brûlage, ou bien en remplaçant le coton, la deuxième application doit être immédiatement réalisée.

Le test se déroule sous une hotte et dans le noir pour bien visualiser et noter le temps de brûlage. La hotte est mise à l'arrêt lors du test pour éviter les perturbations, et allumée après la combustion de l'échantillon afin d'évacuer les produits de la combustion. Le temps du brûlage total est calculé pour chaque série de cinq échantillons t_f , en utilisant l'équation suivante :

$$t_f = \sum_{i=1}^5 (t_{1,i} + t_{2,i}) \dots \dots \dots (2.1)$$

Où :

t_f = temps de brûlage total (s).

$t_{1,i}$ = temps de brûlage après la première application de la flamme pour le $i^{\text{ème}}$ échantillon (s), et

$t_{2,i}$ = temps de brûlage après la deuxième application pour le $i^{\text{ème}}$ échantillon (s).



Figure 2.2 : Appareil de test de brûlage vertical (Laboratoire FPInnovations).

2.2 Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique est la méthode la plus employée pour la caractérisation thermique des matériaux et l'étude de la stabilité thermique. L'échantillon est placé dans une nacelle, ce dernier est suspendu sur une balance sensible. Le dispositif est soumis à un régime de chauffage fourni par un four. Sous l'effet de la température, l'échantillon subit plusieurs changements de masse reliée aux différents phénomènes (évaporations, réactions chimiques, dégradation thermique) qui sont enregistrés sous forme d'une courbe permettant ainsi de suivre l'évolution de la masse d'un échantillon donné en fonction de la température. La figure 2.3 présente une courbe TGA du revêtement C. À partir de cette courbe, plusieurs caractéristiques peuvent être déduites dont la température de début de la dégradation, la température de fin de la dégradation, la distinction des différents stades de dégradations dans le

développement des phénomènes d'intumescences, et la masse résiduelle à des températures élevées (exemple à 700 °C).

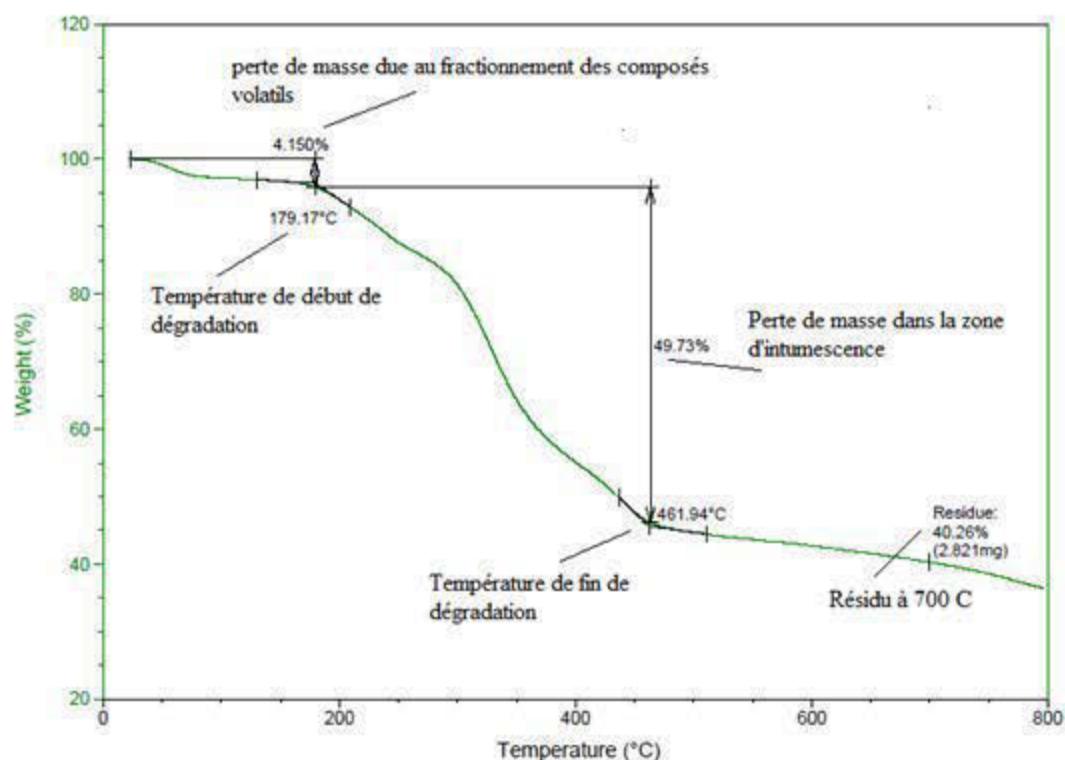


Figure 2.3 : Courbe TGA du revêtement C avec les différents paramètres mesurés.

L'étude de la stabilité thermique des revêtements ignifuges est effectuée sur l'appareil TA instrument modèle Q 50, États-Unis. Les analyses ont été réalisées avec une vitesse de chauffage de 10 °C/min sur une plage de 30 à 800 °C et sous un flux d'azote de 60 ml/min. Les échantillons d'environ 20 mg sont placés dans une nacelle ouverte en platine, l'appareil est muni d'une balance sensible qui enregistre les changements de masse provoqués par la température.

Afin de réaliser l'analyse thermogravimétrique des mélanges revêtements-lamelles, les revêtements ignifuges sont appliqués à l'aide d'un pinceau sur des lamelles de

bois, ces dernières sont pesées avant et après séchage dans un four à 103°C pendant 10 minutes afin de déterminer le pourcentage massique du bois et de la peinture. Les lamelles traitées sont ensuite broyées. Des échantillons d'environ 20 mg de chaque mélange sont testés.

À partir des courbes TGA de peintures et des lamelles non traitées ainsi que les courbes de masse résiduelle des mélanges bois-peintures, on peut déduire la masse résiduelle du bois dans les mélanges appropriés, cela nous permettra de tracer des courbes TGA théoriques du bois dans les différents revêtements ignifuges en considérant qu'il n'existe aucune réaction entre les produits de la pyrolyse du bois ainsi que les produits formés lors de la décomposition des formulations intumescents. Cette méthode peut nous informer sur l'impact de l'application des revêtements sur la protection du substrat à petite échelle. Les masses du mélange et du bois sont calculées selon les équations 2.2 et 2.3, respectivement.

$$M_{mélange}(T) = x M_{bois}(T) + (1 - x) M_{revêtement}(T) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$M_{bois}(T) = \frac{M_{mélange}(T) - (1 - x)M_{revêtement}(T)}{x} \dots \dots \dots (2.3)$$

Où :

x : concentration massique du bois dans le mélange bois-peinture

$M_{bois}(T)$ (%) : masse résiduelle théorique du bois dans le mélange à la température T

$M_{revêtement}(T)$ (%) : masse résiduelle expérimentale du revêtement donnée à la température T

$M_{mélange}(T)$ (%) : masse résiduelle expérimentale du mélange bois-peinture à la température T

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Test au feu

3.1.1 Test de propagation de la flamme

Le test de propagation de la flamme adapté de la norme ASTM D 3806-98 permet de mesurer plusieurs propriétés : la consommation du panneau, la propagation de la flamme, la valeur d'isolation thermique et l'indice de carbonisation. La propagation de la flamme représente la propriété principale mesurée dans ce test. Elle met en relief la capacité d'un revêtement ignifuge à limiter la propagation de feu sur une surface traitée.

Les valeurs présentées dans les tableaux de cette section sont les valeurs moyennes de chaque série de grammage (moyenne de 6 échantillons). Les valeurs entre parenthèses représentent les écarts types appropriés. Les résultats intégraux des tests sont représentés en annexe (du tableau X.1 au tableau X.16).

3.1.1.1 Consommation du panneau

Avant le test, les échantillons sont conditionnés dans une chambre à environnement contrôlé (50 ± 5 HR et $21 \pm 2^\circ\text{C}$) pendant au moins 2 semaines pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre. Aussi, après le test au feu, tous les échantillons testés sont reconditionnés dans le même environnement pendant 2 semaines pour atteindre de nouveau la teneur en humidité d'équilibre, le tableau 3.1 donne la masse d'équilibre des échantillons avec les différents revêtements et les panneaux OSB de

contrôle avant le test (G_1), la masse des échantillons après le test (G_2), la masse d'équilibre des échantillons après le test (G_3) et la perte de masse (PM) en pourcentage.

Tableau 3.1 : Masse des échantillons avant et après le test.

ID	G_1 (g/m ²)	G_1 (g)	G_2 (g)	G_1-G_2 (g)	G_3 (g)	G_1-G_3 (g)	PM (%)
Panneaux témoins							
E 1;6	-----	434,2 (14,3)	406,9 (13,5)	27,3 (1,5)	411,1 (13,8)	23,1 (1,5)	6,28
Peinture A							
A1;2	112,8 (3,0)	413,9 (6,0)	393,3 (6,4)	20,6 (0,5)	397,06 (6,3)	16,9 (0,5)	4,97
A3;4	216,3 (2,6)	418,7 (9,3)	401,7 (9,7)	17,0 (1,4)	405,1 (9,5)	13,6 (1,3)	4,06
A5;6	312,4 (10,6)	445,0 (15,0)	429,7 (14,7)	15,3 (1,5)	433,1 (14,6)	12,0 (1,5)	3,43
Peinture B							
B1;2	121,7 (6,3)	433,4 (11,0)	423,4 (10,4)	10,0 (1,0)	426,6 (10,3)	6,7 (1,0)	2,30
B3;4	243,1 (1,6)	438,3 (12,3)	433,0 (12,3)	5,3 (0,3)	435,7 (12,3)	2,6 (0,5)	1,21
B5;6	327,3 (6,2)	434,75 (9,3)	429,80 (9,6)	5,0 (0,4)	433,3 (9,4)	1,5 (0,4)	1,15
Peinture C							
C1;2	124,0 (3,9)	426,4 (5,2)	416,9 (5,3)	9,5 (0,8)	419,6 (5,3)	6,8 (0,6)	2,22
C3;4	224,2 (1,2)	432,8 (6,4)	427,1 (6,4)	5,74 (0,6)	430,0 (5,8)	2,8 (0,7)	1,32
C5;6	319,5 (6,6)	438,1 (11,0)	433,8 (11,1)	4,3 (0,3)	436,1 (10,9)	1,96 (0,3)	0,98

Les résultats montrent que la consommation des panneaux OSB diminue après l'application des revêtements ignifuges, la consommation du panneau diminue avec l'augmentation du taux de recouvrements pour les trois revêtements. La figure 3.1 montre la perte de masse des panneaux OSB après le test (G_1-G_2) en fonction du grammage pour les trois types de revêtements.

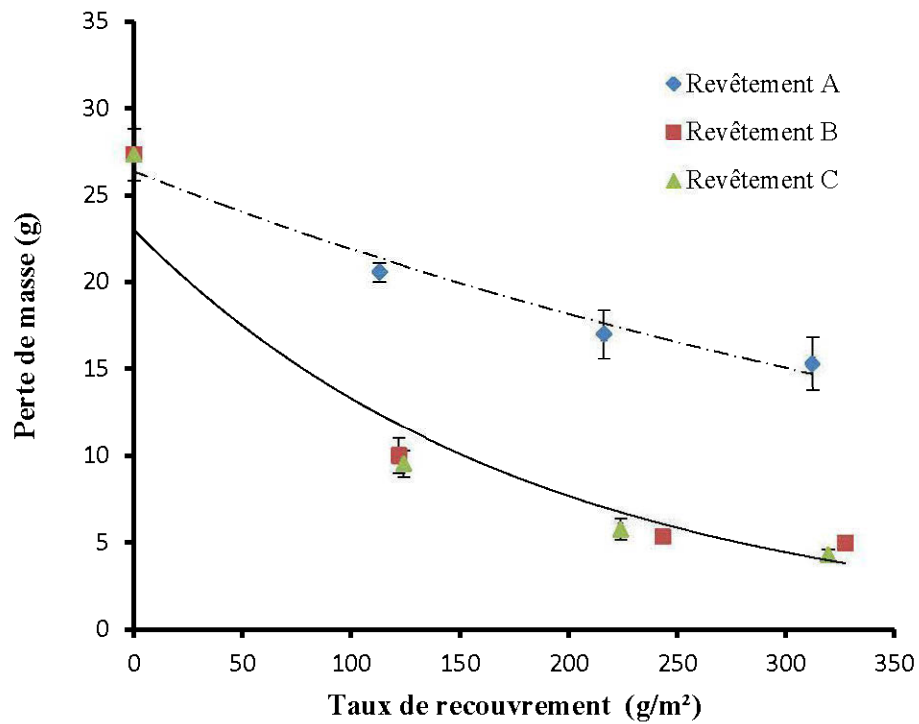


Figure 3.1 : Perte de masse des panneaux OSB après le test en fonction du taux de recouvrement des peintures.

La perte de masse diminue de 27 g pour les panneaux non revêtus à 5 g pour les panneaux traités avec le revêtement B et C à un grammage de 320 g/m², et de 15 g pour les panneaux traités par le revêtement A. L'efficacité des revêtements B et C a diminué l'effet destructif des flammes et est largement supérieure à celle du produit A.

De fortes corrélations entre la perte de masse après le test et le taux de recouvrement ont été générées pour les trois revêtements étudiés, avec des tendances exponentielles et de forts coefficients de déterminations R^2 avoisinant 1. Une seule tendance peut décrire cette relation pour les revêtements B et C vu la similitude du comportement des deux peintures (ce constat est repris dans toutes les propriétés mesurées lors test à deux pieds). Les détails sont présentés dans le tableau 3.2

Tableau 3.2 : Modèle de prédiction de la perte de masse après le test de propagation de la flamme des panneaux OSB.

Type de peinture	Équation	R ²
Revêtement A	$PM = 26,37 e^{-0,002X}$	0,97
Revêtement B et C	$PM = 23 e^{-0,005X}$	0,91

PM : perte de masse après le test (g)

X : taux de recouvrement (g/m²)

La consommation du panneau est la différence entre la masse d'équilibre de l'échantillon avant et après le test (G_1-G_3). La figure 3.2 illustre la consommation du panneau en fonction du taux de recouvrement pour les trois peintures A, B et C. La différence entre la perte de masse après le test représente la perte en humidité du panneau durant le test, soit (G_2-G_3). Cette différence est compensée par le conditionnement des échantillons après le test. Pour un taux de recouvrement voisinant 320 g/m², la consommation du panneau diminue de 23 g pour les panneaux non traités à 2 g pour les panneaux traités avec les revêtements B et C, et à 12 g pour les panneaux traités avec le revêtement A.

Des tendances exponentielles ont été trouvées pour les trois peintures étudiées. Les détails des modèles décrivant la dépendance entre la consommation du panneau et le taux de recouvrement sont donnés dans le tableau 3.3

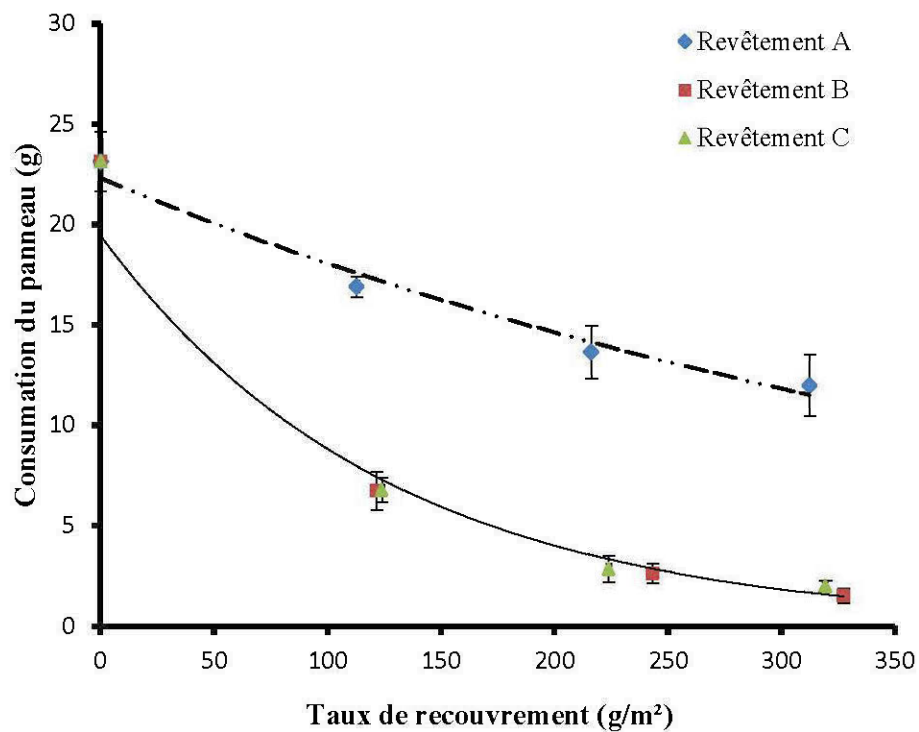


Figure 3.2 : Consommation des panneaux OSB en fonction de taux de recouvrement des peintures.

Tableau 3.3 : Modèles de prédiction de la consommation des panneaux OSB après le test.

Type de peinture	Équation	R ²
Revêtement A	$CP = 22,30 e^{-0,002X}$	0,98
Revêtement B et C	$CP = 19,44 e^{-0,008X}$	0,98

CP : consommation du panneau (g)

X : taux de recouvrements (g/m²)

3.1.1.2 Propagation de la flamme

On illustre à la figure 3.3 les échantillons après le test du tunnel à deux pieds. Cette illustration montre clairement que les échantillons non traités sont complètement dégradés par le feu (Figure 3.a) alors que les échantillons traités ne sont dégradés que partiellement (Figure 3.b).

Les résultats du test de propagation tunnel à deux pieds sont présentés au Tableau 3.4. On y présente la moyenne des trois plus hautes lectures consécutives des panneaux testés (L_s), les valeurs de la propagation de la flamme nette, donnée par et la différence entre la moyenne des lectures pour les panneaux ciment-amiante (L_s-L_a).



Figure 3.3 : Apparence des échantillons après le test du tunnel à deux pieds, a) Échantillons de référence, b) Échantillons traités par le revêtement A (à droite) et par le revêtement B (à gauche).

En général, la propagation de la flamme diminue en fonction du taux de recouvrement pour les trois revêtements. La figure 3.4 illustre l'avancement net de la flamme en fonction du grammage des différents panneaux revêtus. On remarque que les revêtements B et C diminuent la propagation de la flamme d'une façon plus efficace que le revêtement A. La valeur de la propagation nette de la flamme est de 1 pouce pour les échantillons traités par le revêtement B au taux de recouvrement 320 g/m². Cela montre que le revêtement B confère aux panneaux OSB un

comportement très similaire à celui des panneaux zéro-propagation en ciment-amiante. Pour les revêtements B et C, la propagation de la flamme ne subit pas une grande diminution à partir de 230-250 g/m³ vers un grammage de 320 g/m². L'application de la deuxième couche est suffisante pour procurer aux panneaux de bonnes propriétés ignifuges, contrairement au revêtement A, où la diminution de la propagation de la flamme subit encore des changements lors de l'application de la troisième couche (320 g/m²).

Tableau 3.4 : Propagation de la flamme des différents panneaux.

Identification	G_i (g/m²)	L_s (po)	L_s-L_a (po)
Panneaux témoins			
E1;6	-----	17,08 (0,66)	15,08 (0,66)
Peinture A			
A1;2	112,81 (3,01)	14,12 (0,47)	12,12 (0,47)
A3;4	216,32 (2,56)	11,57 (0,82)	9,57 (0,82)
A5;6	312,39 (10,58)	10,11 (0,27)	8,11 (0,27)
Peinture B			
B1;2	121,69 (6,25)	6,46 (0,78)	4,46 (0,78)
B3;4	243,13 (1,56)	3,55 (0,46)	1,55 (0,46)
B5;6	327,25 (6,16)	2,83 (0,26)	0,83 (0,26)
Peinture C			
C1;2	123,97 (3,86)	6,43 (0,70)	4,53 (0,70)
C3;4	224,16 (1,18)	3,83 (0,62)	1,93 (0,62)
C5;6	319,45 (6,63)	3,32 (0,37)	1,42 (0,37)

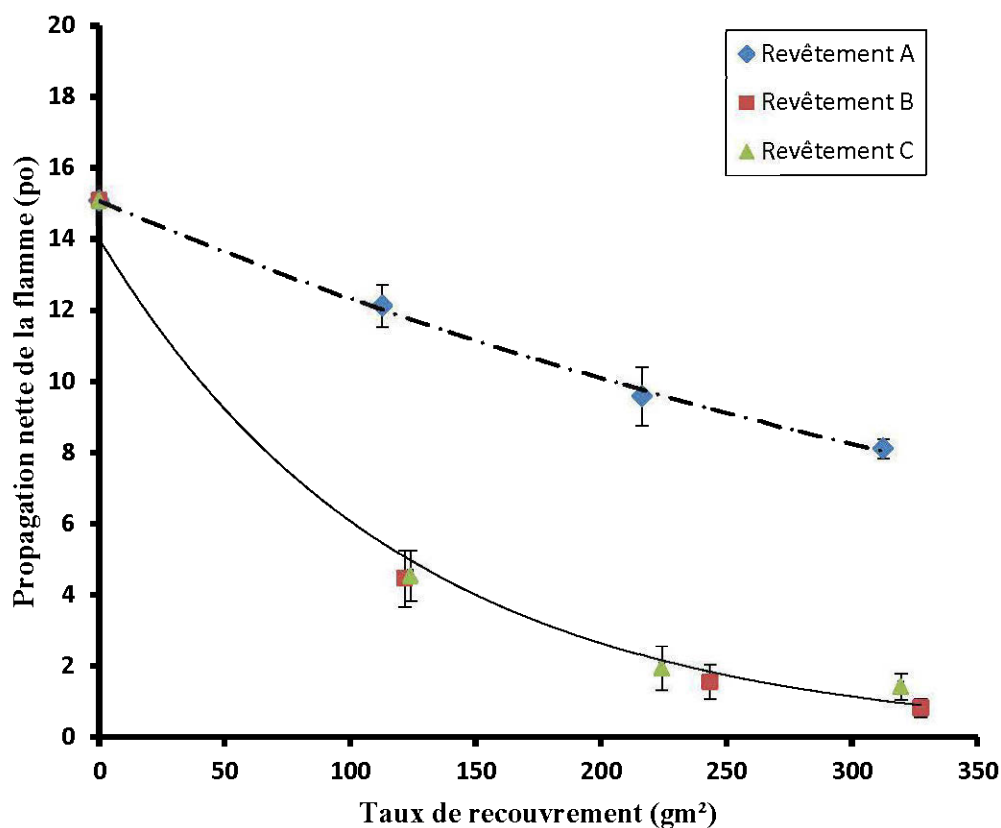


Figure 3.4 : Propagation nette de la flamme en fonction du grammage des trois peintures appliquées sur les panneaux OSB.

Giudice et Pereyra (2010) ont combiné les nanoparticules de silice aux solutions colloïdales de silice/alcalin comme agent d'imprégnation pour les panneaux de bois (*Pinus radiata*) avec différents rapports molaires. La combinaison des systèmes nanocomposites était facilement réalisable. Les auteurs ont classé les échantillons selon le taux de rétention des solutions dans le bois après imprégnation. L'indice de propagation de la flamme ($FSI = \text{propagation nette de l'échantillon} / \text{propagation nette de la référence}$) calculé lors du test du tunnel à deux pieds diminue avec l'augmentation du taux de rétention et le ratio silice/alcalin, la meilleure performance enregistrée est un indice de propagation de la flamme de 0,20 et une consommation de

panneau (perte de masse durant le test) de 2,65 %. Dans notre étude, la meilleure performance est obtenue après l'application d'un grammage de 327g/m^2 du revêtement C donnant un indice de propagation de la flamme de 0,05 (considérant les échantillons OSB non traités comme références) et une perte de masse après le test de 1,15 %. Le processus d'imprégnation décrits dans l'étude de Giudice et Pereyra (2010) nécessite plusieurs étapes et ainsi relativement long, des conditions opératoires spécifiques (imprégnation sous vide), alors que dans notre cas, l'application des revêtements était facile, sans condition opératoire et a permis d'avoir de meilleures propriétés ignifuges. Plus récemment, Canosa et al. (2012) ont développé des revêtements intumescents hybrides pour le bois, il s'agit de formulation de système intumescent classique (polyphosphate d'ammonium, pentaérythritol et mélamine) avec plusieurs additifs (dioxyde de titanium, alumine trihydratée, hydroxyde de magnésium) renforcée par différentes fibres (carbone, verre, aramide et alumine). Les auteurs ont utilisé différents agents liants. Les systèmes intumescents hybrides sont appliqués sur des panneaux de bois (*Araucaria angustifolia*) afin de former un film sec de 280-300 μm d'épaisseur (en trois couches). Les résultats des tests montrent que le revêtement utilisant la résine de caoutchouc chloré comme agent liant et la fibre d'alumine est le plus performant. La propagation nette de la flamme enregistrée est de 55mm (2,16 po). Giudice et Benitez (2001) ont utilisé les borates de zinc ($2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ et $2\text{ZnO} \cdot 3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dans les revêtements ignifuges à base d'alkyde chloré dans le but de remplacer l'oxyde d'antimoine. Différentes formulations sont appliquées sur des échantillons de bois (*Araucaria angustifolia*). Les revêtements formaient une couche de 70-80 μm d'épaisseur (deux couches). Les résultats du test de la propagation de la flamme montrent que le revêtement utilisant les deux formes de borates de zinc et le trioxyde d'antimoine avec un ratio 1/1/1 est le plus performant avec un indice de propagation de la flamme (FSI) de 0,08 et une consommation de panneau de 2,01 %. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans notre étude notamment lors de l'application des revêtements B et C à des grammages entre 200 et 340 g/m^2 . Les résultats des deux études précédentes

démontrent l'intérêt porté aux traitements d'ignifugations par revêtement et la diversité des produits chimiques qui peuvent être employés afin d'augmenter l'efficacité d'un revêtement ignifuge.

Le tableau 3.5 présente les modèles de prédiction de la propagation de la flamme en fonction du grammage de chaque revêtement. Les valeurs des coefficients de détermination R^2 pour la propagation de la flamme en fonction du taux de recouvrement sont très élevées, d'où la puissance des modèles trouvés pour fins de prédiction de la propagation de la flamme en fonction du taux de recouvrement d'un revêtement donné.

Tableau 3.5 : Modèles de prédiction de la propagation nette de la flamme en fonction du taux de recouvrement.

Type de peinture	Équation	R^2
Revêtement A	$PN = 15,08 e^{-0,002X}$	0,99
Revêtement B et C	$PN = 14 e^{-0,008X}$	0,96

PN : Propagation nette (po)

X : Taux de recouvrement (g/m^2)

3.1.1.3 Valeur d'isolation thermique

L'isolation thermique est une des caractéristiques que le traitement d'ignifugation par revêtement procure au matériau traité. Le test de propagation de la flamme permet d'évaluer cette propriété. La valeur d'isolation (ΔT_1) représente la différence entre la température du substrat avant le test et la valeur maximale atteinte lors de l'application de la flamme à la position zéro à savoir, directement sous le bruleur. Le tableau 3.6 donne la valeur de l'isolation thermique pour les trois revêtements étudiés ainsi que la variation de température du substrat ΔT_2 , ΔT_3 et ΔT_4 aux positions 4, 8 et 12 pouces, respectivement.

Tableau 3.6 : Différence de température des panneaux OSB testés.

ID	G ₁ (g/m ²)	Δ T ₁ (°C)	Δ T ₂ (°C)	Δ T ₃ (°C)	Δ T ₄ (°C)
Panneaux témoins					
E1;6	-----	21,60 (2,04)	21,35 (1,79)	16,83 (2,23)	11,87 (2,15)
Peinture A					
ID	G ₁ (g/m ²)	Δ T ₁ (°C)	Δ T ₂ (°C)	Δ T ₃ (°C)	Δ T ₄ (°C)
A 1;2	112,81 (3,01)	22,33 (1,44)	22,57 (1,76)	17,45 (1,47)	11,53 (0,84)
A 3;4	216,32 (2,56)	19,32 (0,69)	19,00 (0,68)	12,88 (0,93)	7,52 (0,76)
A 5;6	312,39 (10,58)	14,88 (0,56)	14,00 (0,70)	8,42 (0,60)	4,35 (0,23)
Peinture B					
ID	G ₁ (g/m ²)	Δ T ₁ (°C)	Δ T ₂ (°C)	Δ T ₃ (°C)	Δ T ₄ (°C)
B 1;2	121,69 (6,25)	13,40 (0,87)	11,50 (0,78)	6,33 (0,78)	3,43 (0,39)
B 3;4	243,13 (1,56)	10,72 (1,45)	8,92 (1,50)	4,88 (1,10)	2,93 (0,73)
B 5;6	327,25 (6,16)	8,93 (0,78)	7,12 (0,85)	3,70 (0,54)	2,08 (0,38)
Peinture C					
ID	G ₁ (g/m ²)	Δ T ₁ (°C)	Δ T ₂ (°C)	Δ T ₃ (°C)	Δ T ₄ (°C)
C 1;2	123,97 (3,86)	14,12 (0,73)	12,17 (0,93)	6,70 (0,84)	3,62 (0,35)
C 3;4	224,16 (1,18)	11,87 (1,12)	9,60 (0,93)	5,12 (0,53)	2,95 (0,34)
C 5;6	319,45 (6,63)	9,90 (0,46)	7,53 (0,76)	4,02 (0,53)	2,40 (0,42)

Les résultats montrent que la valeur d'isolation thermique diminue en fonction du taux de recouvrement pour les trois peintures intumescentes utilisées. La figure 3.5 illustre la variation de la valeur d'isolation thermique en fonction du taux de recouvrement pour les trois revêtements, elle est de 23°C pour les panneaux de contrôle, et atteint 15°C sur les panneaux traités avec le revêtement A, et 10°C et 8°C sur les panneaux traités avec le revêtement C et B, respectivement. Cette isolation est due essentiellement à la couche de carbone formée par le revêtement intumescent qui joue le rôle d'isolant thermique. Il est clair qu'à chaque fois que le grammage

augmente, la couche de carbonisation se forme d'avantage, le taux de gonflement est nettement plus grand sur les panneaux revêtus par les peintures B et C.

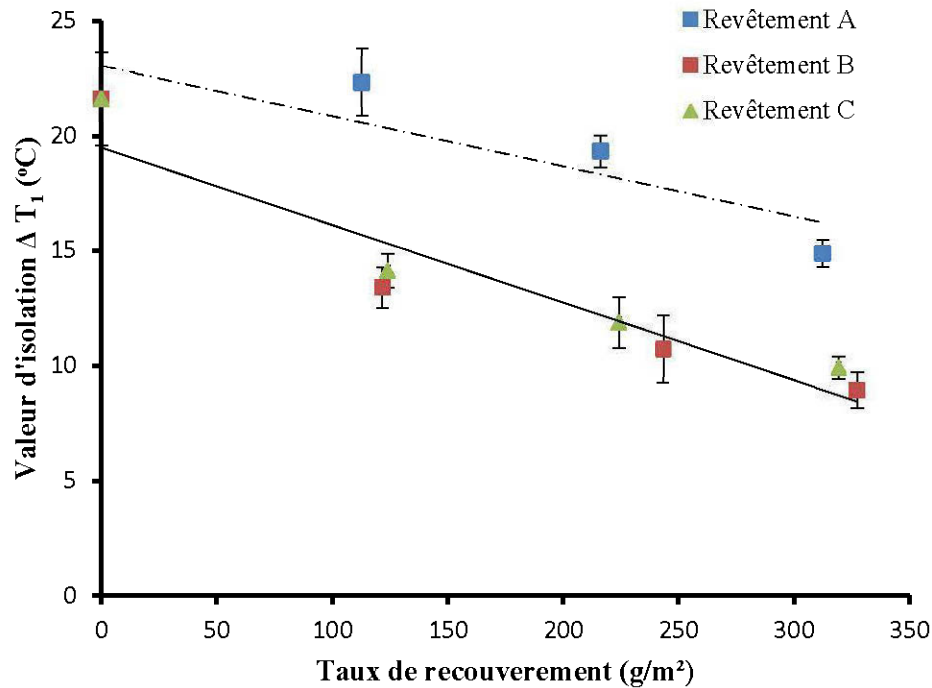


Figure 3.5 : Valeur d'isolation thermique (ΔT_1) des panneaux OSB revêtus en fonction du taux de recouvrement.

Les autres valeurs d'isolation thermique à 4, 8, 12 pouces (ΔT_2 , ΔT_3 et ΔT_4), diminuent en fonction du taux de recouvrement pour les trois revêtements. Cette diminution est linéaire sur les échantillons traités avec le revêtement A et cela sur les 3 positions des thermocouples (ΔT_2 , ΔT_3 et ΔT_4). Plus on s'éloigne de la source de flamme (du thermocouple à 0 pouce vers le thermocouple trouvé à 12 pouces), plus la différence de température est petite. De la même manière, plus le grammage augmente, plus la différence de température diminue. Ce phénomène est étroitement lié à la propagation de la flamme.

Pour les échantillons traités avec les trois revêtements, la différence de température est linéaire à la position 4 pouces (ΔT_2) en fonction de taux de recouvrement. Plus on s'éloigne de la source du feu, plus l'impact de taux de recouvrement diminue sur la valeur de l'isolation thermique. La propagation de la flamme est liée au phénomène d'isolation thermique. Loin de la source d'allumage, le feu ne se propage pas le long de l'échantillon ce qui permet aux panneaux OSB de garder pratiquement la même température qu'avant le test. Le tableau 3.7 présente les modèles de prédiction de la valeur d'isolation thermique en fonction du taux de recouvrement des différents revêtements avec les coefficients de détermination. Des tendances linéaires ont été générées.

Tableau 3.7 : Modèles de prédiction de la valeur d'isolation thermique des panneaux OSB traités par les différents revêtements en fonction du taux de recouvrement

Type de peinture	Équation	R ²
Revêtement A	$VI = -0,22X + 23,03$	0,76
Revêtement B et C	$VI = -0,034X + 19,48$	0,89

VI : La valeur d'isolation (°C)

X : Taux de recouvrement (g/m²)

3.1.1.4 Indice de carbonisation

L'indice de carbonisation représente le volume maximal de la zone carbonisée des panneaux OSB. Cette propriété exprime l'efficacité du revêtement ignifuge à ralentir l'effet destructif du feu en l'empêchant d'atteindre le substrat. L'épaisseur de carbonisation, calculée après avoir coupé les échantillons, est l'épaisseur maximale du charbon où la flamme est appliquée. La largeur et la longueur de carbonisation sont la largeur et la longueur maximale de la zone de carbonisation du bois (Figure

3.6). Les résultats d'indice de carbonisation ainsi que les dimensions sont présentés dans le tableau 3.8.



Figure 3.6 : Coupe pour le calcul d'indice de carbonisation. a) Échantillon de référence, b) Échantillon traité par le revêtement C.

Tableau 3.8 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les différents panneaux.

ID	G_i (g/m ²)	E^1 (cm)	I^2 (cm)	L^3 (cm)	I_C^4 (cm ³)
Panneaux témoins					
E 1;6	-----	0,49 (0,04)	5,70 (0,06)	38,52 (2,39)	106,68 (6,64)
Peinture A					
A 1;2	112,81 (3,01)	0,47 (0,02)	5,54 (0,07)	29,28 (1,79)	76,68 (4,36)
A 3;4	216,32 (2,56)	0,42 (0,01)	5,47 (0,08)	25,73 (1,64)	58,99 (4,73)
A 5;6	312,39 (10,58)	0,42 (0,03)	5,47 (0,10)	23,25 (2,04)	53,19 (7,34)
Peinture B					
B 1;2	121,69 (6,25)	0,43 (0,03)	5,33 (0,05)	15,33 (1,40)	34,77 (3,95)
B 3;4	243,13 (1,56)	0,31 (0,01)	5,12 (0,08)	11,62 (0,77)	18,71 (1,27)
B 5;6	327,25 (6,16)	0,27 (0,01)	4,78 (0,08)	10,00 (0,28)	13,08 (1,17)
Peinture C					
C 1;2	123,97 (3,86)	0,42 (0,02)	5,48 (0,08)	15,42 (0,8)	35,54 (2,78)
C 3;4	224,16 (1,18)	0,30 (0,02)	5,15 (0,14)	10,72 (0,25)	16,47 (1,91)
C 5;6	319,45 (6,63)	0,27 (0,02)	4,82 (0,12)	10,37 (0,29)	13,40 (1,41)

1. E : épaisseur, 2.I : Largeur, 3.L : Longueur, 4. I_C : Indice de carbonisation.

La figure 3.7 illustre la variation de l'indice de carbonisation en fonction du taux de recouvrement des panneaux OSB. L'indice de carbonisation diminue quand le taux de recouvrement augmente pour les trois revêtements. Il est de 106 cm^3 pour les panneaux témoins, diminue à une valeur de 13 cm^3 sur les panneaux traités par les revêtements B et C et 53 cm^3 sur les panneaux traités avec le revêtement A pour un taux de recouvrement de 320 g/m^2 . Tel que démontré par les résultats de propagation de la flamme et de l'indice d'isolation thermique, l'indice de carbonisation montre que les revêtements B et C sont nettement plus efficaces que le revêtement A.

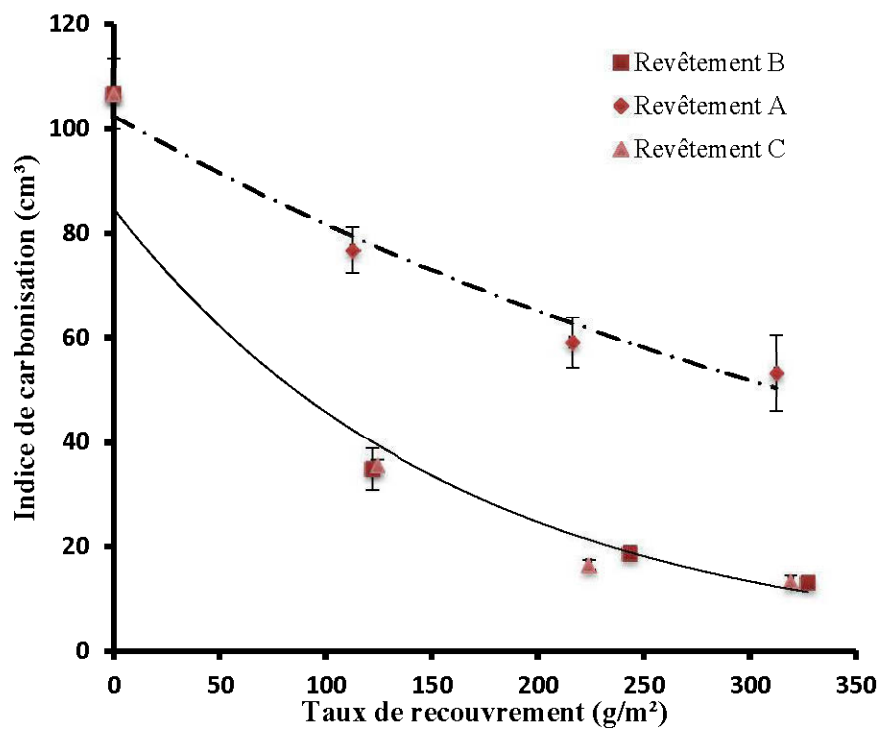


Figure 3.7 : Indice de carbonisation en fonction de grammage des différents revêtements.

Le tableau 3.9 présente les modèles qui décrivent la variation de l'indice de carbonisation en fonction du taux de recouvrement. Les coefficients de détermination pour les différents modèles de prédiction trouvés pour les panneaux OSB testés sont très élevés.

Tableau 3.9 : Indice de carbonisation des échantillons OSB.

Type de peinture	Équation	R ²
Revêtement A	$IC = 102,48 e^{-0,002X}$	0,97
Revêtement B et C	$IC = 84,62 e^{-0,006X}$	0,94

IC : indice de carbonisation (cm³)

X : taux de recouvrement (g/m³)

3.1.2 Test de brûlage vertical

Le temps de brûlage total est la propriété calculée dans le test de brûlage vertical. Les résultats des temps de brûlage après la 1^{ère} application (t₁) et après la deuxième application (t₂), ainsi que le temps de brûlage total (t_f) pour les échantillons sont représentés dans les tableaux 3.10; 3.11; 3.12. Il est à noter que les échantillons OSB de contrôle brûlent entièrement après la première application de la flamme. Tous les échantillons testés ne produisent pas d'écoulement de particules lors du test. Pour les trois peintures testées, trois niveaux de grammages (bas, moyen et haut) sont préparés, sur 5 échantillons.

Les résultats du test montrent que le temps de brûlage diminue avec l'augmentation de taux de recouvrement pour les trois types de revêtements étudiés. Le temps de brûlage total pour les échantillons revêtus par la peinture ignifuge A est le plus élevé, en comparant avec les autres échantillons OSB traités par les deux peintures B et C. Les échantillons avec un grammage bas brûlent entièrement alors que le temps total

de brûlage est de 690 s et 473 s pour des taux de recouvrement moyen et élevé, respectivement. Les échantillons revêtus avec la peinture ignifuge C atteignent un temps total du brûlage de 5 s lors de l'application d'un taux de recouvrement élevé. Par contre, l'application d'un taux de recouvrement moyen de revêtement B sur les échantillons OSB fait chuter le temps total de brûlage de 546 s à 7 s, et un temps de brûlage total nul lors de l'application d'un taux de recouvrement élevé.

Tableau 3.10 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement A.

Identification	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
Grammage (g/m²)	63,72	92,74	73,95	89,03	69,85
t₁ (s)	98,00	5,00	141,50	82,00	0,00
t₂ (s)	brûlage total	106,60	brûlage total	brûlage total	brûlage total
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)					
Identification	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
Grammage (g/m²)	128,93	134,15	131,06	136,10	141,19
t₁ (s)	10,00	0,00	0,00	2,80	7,00
t₂ (s)	144,00	135,50	140,00	161,00	90,50
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	690,80				
Identification	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
Grammage (g/m²)	214,43	203,93	210,07	216,54	218,98
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	91,00	95,00	98,00	88,00	101,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	473,00				

Tableau 3.11 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement B.

Identification	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
Grammage (g/m²)	90,99	74,56	71,61	67,16	69,98
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	86,10	75,00	134,00	109,00	142,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	546,10				
Identification	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10
Grammage (g/m²)	181,54	184,06	178,50	188,93	192,15
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	5,00	0,00	0,00	0,00	2,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	7,00				
Identification	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15
Grammage (g/m²)	248,37	296,35	260,56	234,26	247,41
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	0				

Tableau 3.12 : Temps de brûlage et temps de brûlage total des échantillons OSB traités par le revêtement C.

Identification	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Grammage (g/m²)	83,51	86,45	78,15	85,22	110,70
t₁ (s)	0,00	0,00	1,50	3,60	0,00
t₂ (s)	83,00	82,00	79,20	86,50	90,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	425,80				
Identification	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10
Grammage (g/m²)	156,65	166,54	160,34	155,34	163,87
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	80,00	71,20	83,00	77,00	65,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	376,20				
Identification	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15
Grammage (g/m²)	239,95	241,40	259,54	233,02	228,74
t₁ (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t₂ (s)	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t_r=∑ (t₁+t₂) (s)	5,00				

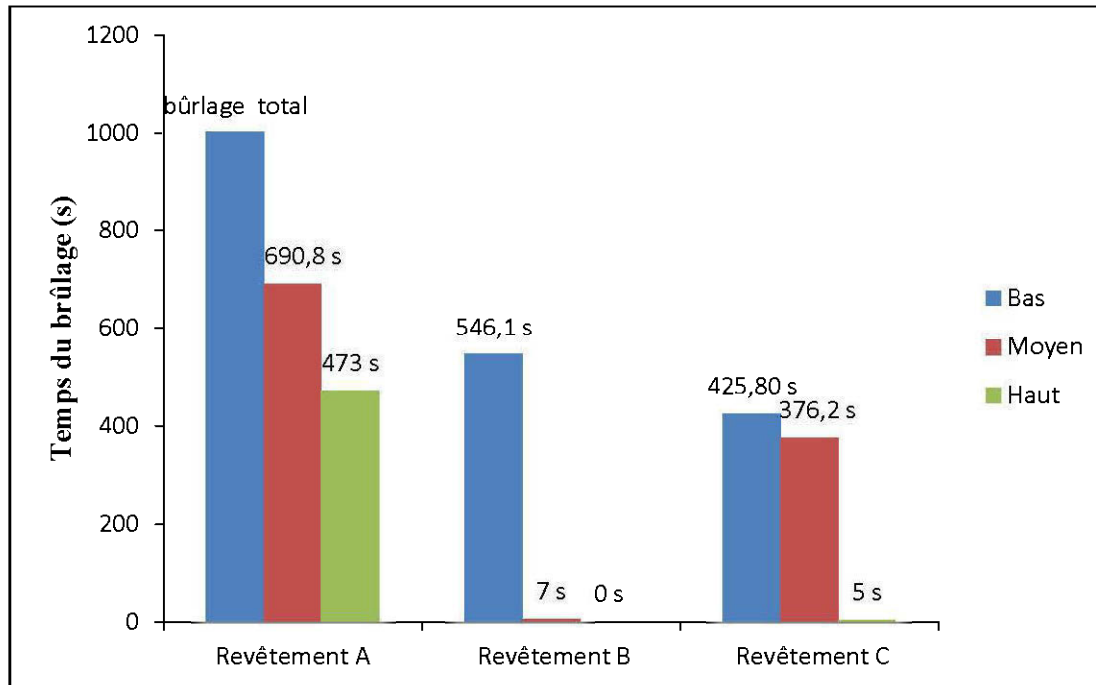


Figure 3.8 : Temps de brûlage total des différents revêtements à chaque niveau de grammage.

3.1.3 Relations entre les propriétés de résistance au feu

La propagation de la flamme était la propriété principale mesurée lors du test de tunnel à deux pieds. Cette partie met en évidence la relation entre la propagation de la flamme et les autres paramètres soient la consommation du panneau, la valeur d'isolation et l'indice de carbonisation. Les figures 3.9; 3.10 et 3.11 illustrent les relations trouvées. Les graphiques sont tracés sur la base des valeurs trouvées sur tous les panneaux OSB. Les résultats montrent de très fortes corrélations entre la propagation de la flamme et les autres propriétés mesurées lors du test de tunnel à deux pieds. Les relations montrent l'effet protecteur des revêtements ignifuges sur les panneaux OSB. En premier lieu, les revêtements ignifuges empêchent les flammes d'atteindre le substrat par formation d'un bouclier qui diminue la propagation des flammes ce qui ralentit l'effet destructif de ces dernières. Ainsi, la consommation du

panneau et l'indice de carbonisation augmentent avec l'augmentation de la propagation de la flamme. Une efficacité du revêtement idéale (une faible propagation de la flamme) permet de garder l'intégrité du panneau et diminue les risques liés aux dommages causés par un incendie. Dans les deux relations relatives à la destruction du panneau, la consommation du panneau et l'indice de carbonisation avoisinent la valeur zéro pour une propagation de la flamme nulle. D'autres parts, les revêtements ignifuges isolent le substrat de l'effet de la chaleur. La valeur d'isolation thermique (ΔT_1) augmente avec l'augmentation de la propagation de la flamme, plus la propagation de la flamme est faible, plus le bouclier carboné formé est isolant. Contrairement aux deux relations précédentes, la valeur d'isolation thermique n'avoisine pas le zéro pour une faible propagation de la flamme. Ce résultat est cohérent avec la réalité d'un incendie où la chaleur se propage même en présence d'un fort isolant.

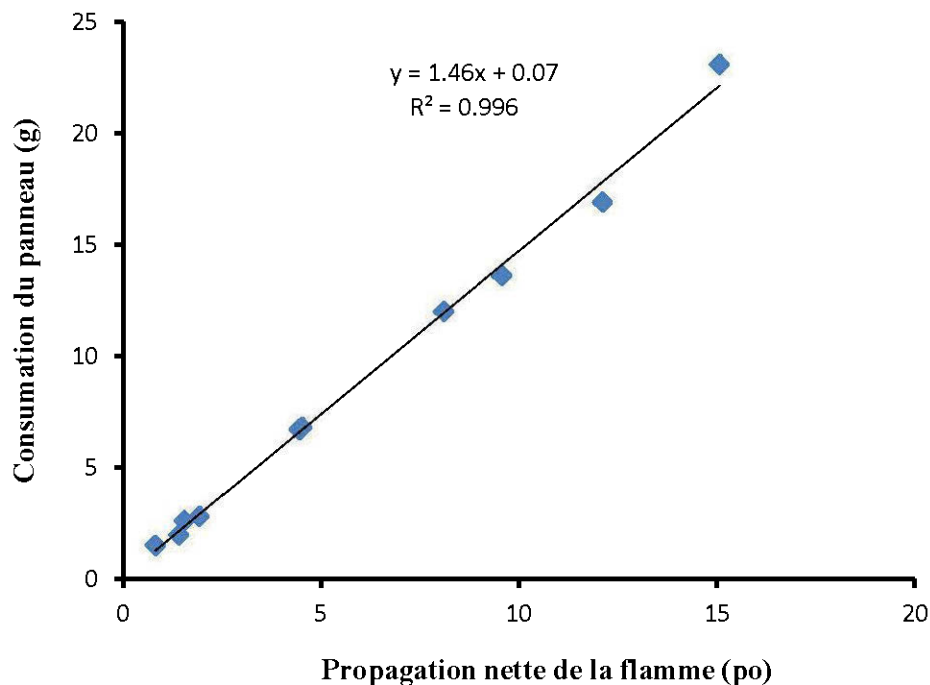


Figure 3.9 : Relation entre la propagation de la flamme et la consommation du panneau.

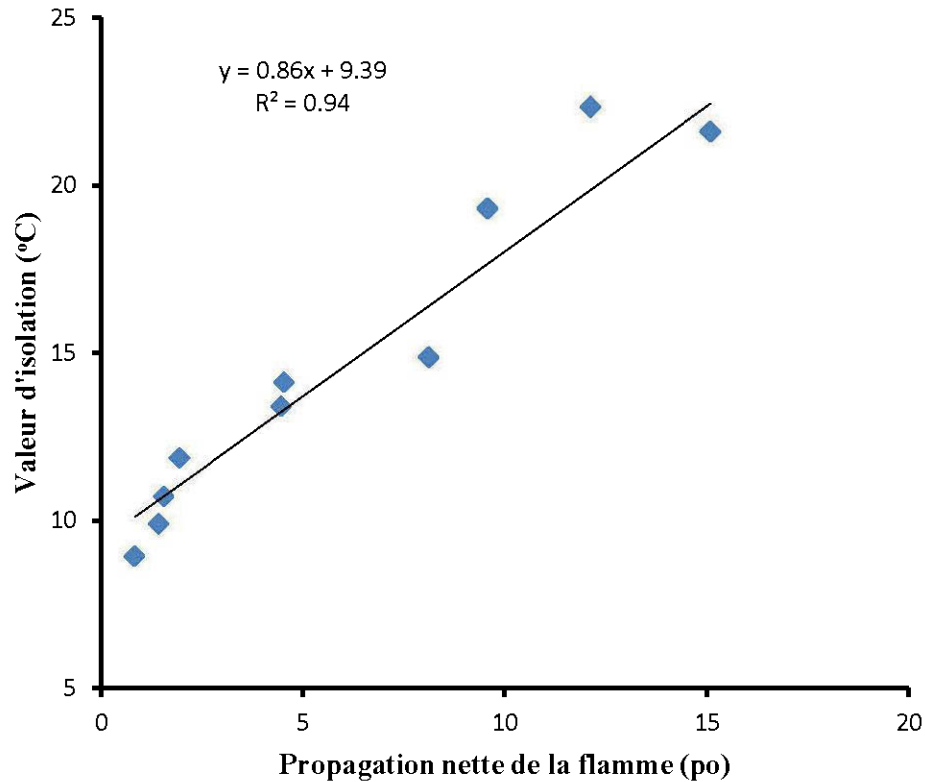


Figure 3.10 : Relation entre propagation de la flamme et la valeur d'isolation.

La figure 3.12 illustre la relation entre les deux propriétés mesurées dans les tests au feu à savoir le temps de brûlage total et la propagation de la flamme. Le test du tunnel à deux pieds est destructif et relativement long en comparant avec le test du brûlage vertical. Ainsi à partir des résultats du test du brûlage vertical, il est possible de prédire la propagation de la flamme trouvée à partir du test du tunnel à deux pieds. La tendance entre les deux propriétés est linéaire. La propagation de la flamme augmente avec l'augmentation du temps total du brûlage pour l'ensemble des revêtements étudiés. La propriété mesurée lors du test de brûlage vertical (temps du brûlage) reflète l'efficacité d'un revêtement d'empêcher l'oxygène d'atteindre le substrat et les

produits combustibles volatils de s'échapper et alimenter ainsi la flamme. Cette propriété est importante, car elle permet d'étouffer un incendie ou l'arrêt de ce dernier au premier stade du développement d'un feu. La relation est moins précise que les relations précédentes à cause de la difficulté de reproduire le même grammage pour une série d'échantillons donnée (faible, moyen et grammage élevé) et hétérogénéité du matériau testé (anisotropie du bois, orientation des lamelles dans l'échantillon, cavités, etc.).

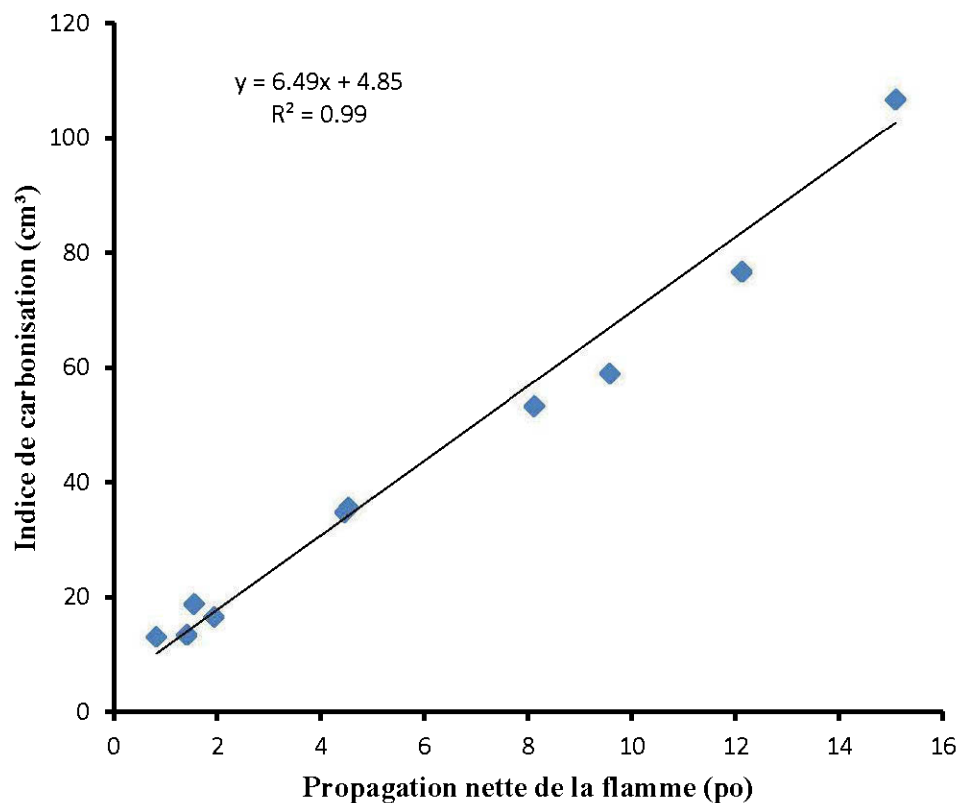


Figure 3.11 : Relation entre la propagation de la flamme et l'indice de carbonisation.

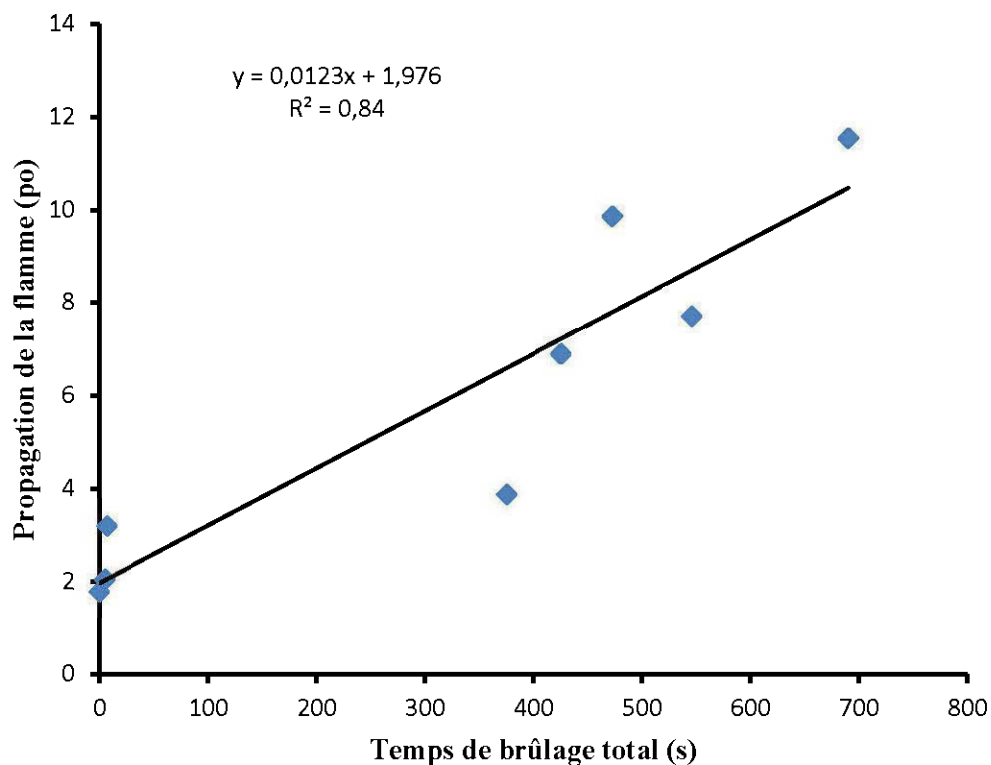


Figure 3.12: Relation entre le temps de brûlage total et la propagation de la flamme.

3.2 Analyse thermogravimétrique

3.2.1 Analyses thermogravimétriques des revêtements intumescents

Les revêtements ignifuges ont été séchés à l'air libre pendant 48 heures afin d'avoir une solidification de la formulation, les peintures sont ensuite enlevées du substrat à l'aide d'un couteau pour être placées dans la nacelle ouverte sous forme de fine poudre. Les courbes thermogravimétriques des revêtements ignifuges sont représentées dans la figure 3.13.

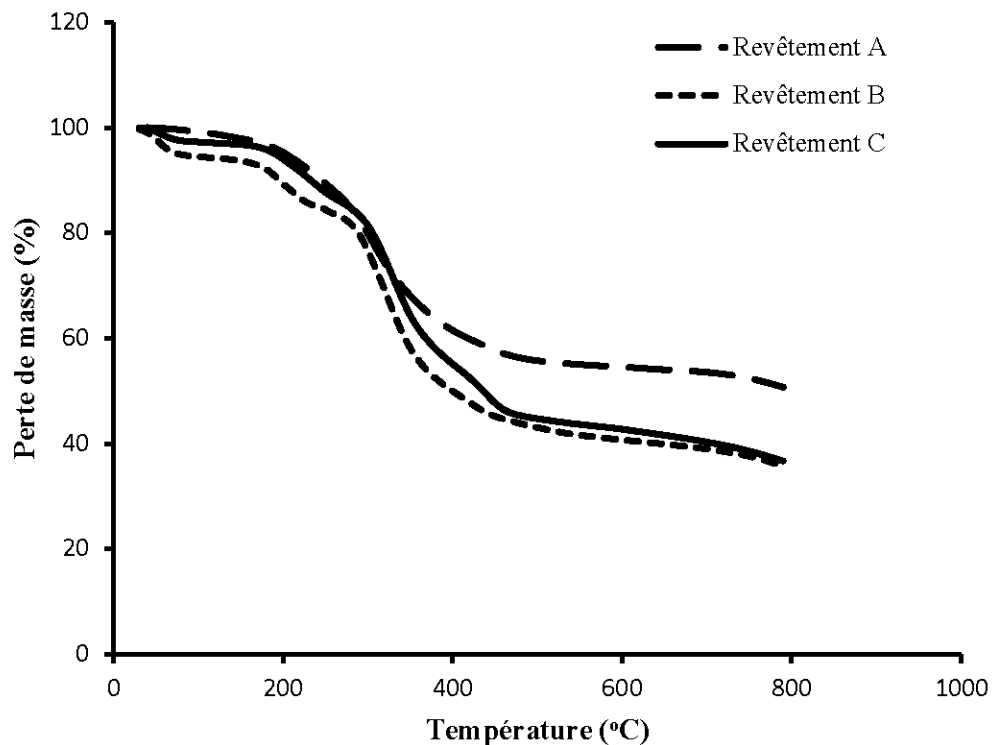


Figure 3.13 : Courbes TGA des revêtements ignifuges.

Le tableau 3.13 regroupe les principaux paramètres mesurés lors de l'analyse thermogravimétrique des revêtements ignifuges. Les courbes détaillées des peintures sont présentées en annexes (Figure X.1 à Figure X.3)

Au premier stade de dégradation à des températures de l'ordre de 180°C, la perte de masse est de 2,5 %, 4 %, 3,5 % pour les revêtements A, B et C respectivement, due essentiellement au fractionnement des composés volatils, solvants et autres produits fortement volatils qui rentre dans la composition des revêtements. À des températures avoisinant les 180°C, les revêtements ignifuges B et C commencent à subir une dégradation distincte avant d'entamer un autre stade de dégradation. Cette perte de masse est liée à la décomposition de la source d'acide (clairement définie dans le

cas du revêtement C : polyphosphate d'ammonium (APP) qui se dégrade en premier lieu dégageant l'ammoniac, le H₂O et l'acide phosphorique. Ce dernier se dégrade thermiquement pour libérer l'acide poly-métaphosphorique et l'acide pyrophosphorique. Ces acides réagissent avec la source de carbonisation le pentaérythritol dans le cas du revêtement C via une réaction de déshydratation pour former la couche carbonisée. En même temps, l'agent de soufflage ou de gonflement (la mélamine) libère le gaz NH₃ qui va diffuser à travers la couche carbonisée pour permettre l'expansion de cette dernière. L'effet catalytique est considéré comme un avantage, car il permet la progression de phénomène d'intumescence dans les premiers stades d'un incendie ce qui augmente l'efficacité de la couche protectrice (Gu et al. 2007). La température de dégradation des ingrédients de la formulation intumescence est un facteur important dans l'évolution des phénomènes d'intumescence. Plus les températures de dégradation des différents agents sont adjacentes, plus le développement de la couche alvéolaire carbonée est favorisé.

Tableau 3.13 : Paramètres mesurés à partir des courbes TGA des revêtements.

Identification	T₁ (°C)	T₂ (°C)	Résidu à 500°C (%)	Résidu à 700°C (%)
Revêtement A	191	463	55,72	53,50
Revêtement B	176	414	43,04	38,94
Revêtement C	180	462	44,71	40,26

T₁ : Température de début de dégradation.

T₂ : Température de fin de dégradation.

Dans la plage de température 250-430°C les peintures B et C subissent une dégradation plus importante comparativement au revêtement A. Cette étape est le stade clé du développement de la couche carbonée signifiant ainsi que les mécanismes de formation de la couche multicellulaire sont plus accrue dans le cas du revêtement B et C comparativement à la peinture A. Les formulations intumescences

doivent avoir une composition appropriée afin d'avoir un degré élevé de carbonisation et donc une efficacité de la couche protectrice carbonisée (Wladyka-Przybylak et Kozlowski 1999).

Au dernier stade entre 430°C et 800°C le résidu formé est stable thermiquement pour les trois revêtements. La perte de masse est de l'ordre de 65 % pour les revêtements B et C et de 53 % pour le revêtement intumescent A. Plusieurs auteurs ont rapporté qu'une masse résiduelle importante à des températures élevées est significative d'une bonne résistance thermique de la couche protectrice formée au dernier stade de la dégradation, une dégradation de la formulation intumescente laissant une faible masse résiduelle sur le substrat affecte la formation de la couche protectrice carbonisée. Toutefois, l'aspect physique doit être pris en compte dans le processus d'intumescence. Le résidu stable thermiquement doit présenter un effet de barrière physique. Afin d'atteindre cet objectif, une couche de mousse carbonisée doit être formée. La diffusion lente des gaz dans la structure lors du phénomène permet l'expansion de la couche carbonisée (Figure 3.14). Cette propriété est reliée directement à la viscosité du système. (Duquesne et al. 2004).

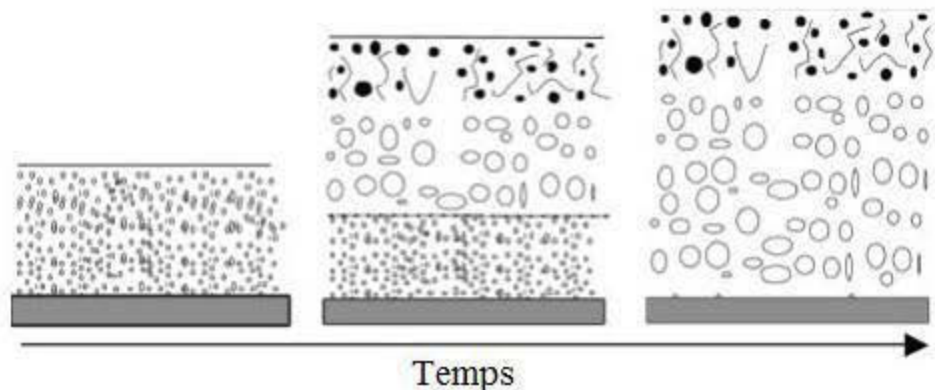


Figure 3.14 : Développement du processus d'intumescence (Duquesne et al. 2004).

annexes (Figure X.4 à la Figure X.16). On remarque que la résistance thermique des mélanges bois-revêtement augmente avec le taux de la peinture dans le mélange, plus précisément à des températures supérieures à 400°C, la masse résiduelle des mélanges bois-revêtement est nettement plus importante que les lamelles non traitées. Les paramètres mesurés sont résumés dans le tableau 3.14.

La température de début de dégradation de revêtements B et C est de 180°C et celle de revêtement A est de 190°C alors que la température de dégradation de lamelles non traitées est de 260°C, ce qui signifie que les formulations ignifuges utilisées commencent à réagir à des températures inférieures que celles de dégradation du bois.

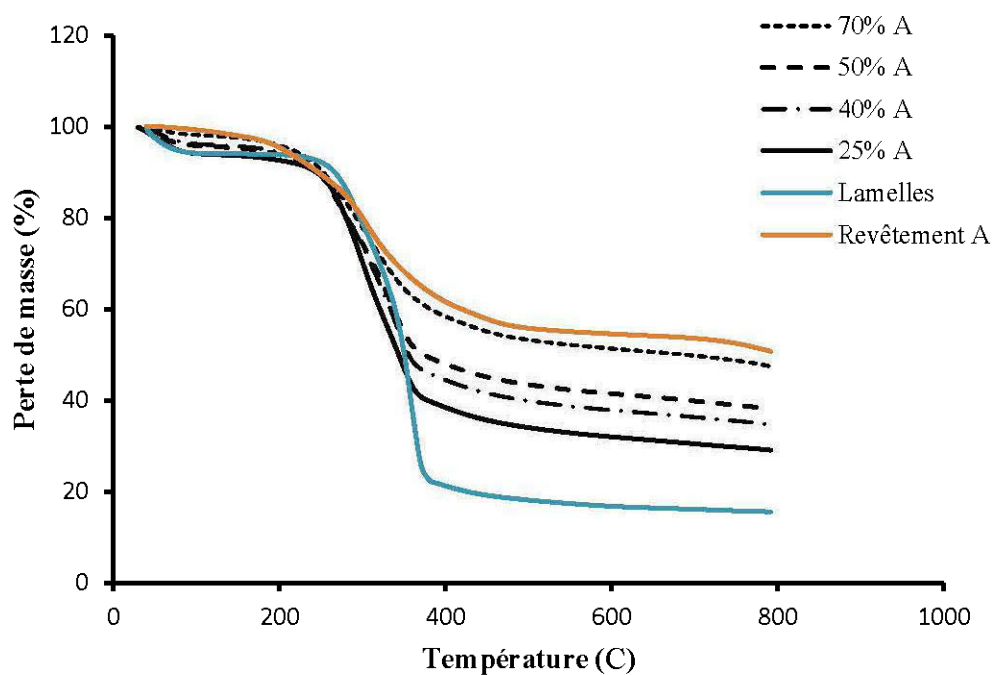


Figure 3.15 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement A à différents rapports massiques.

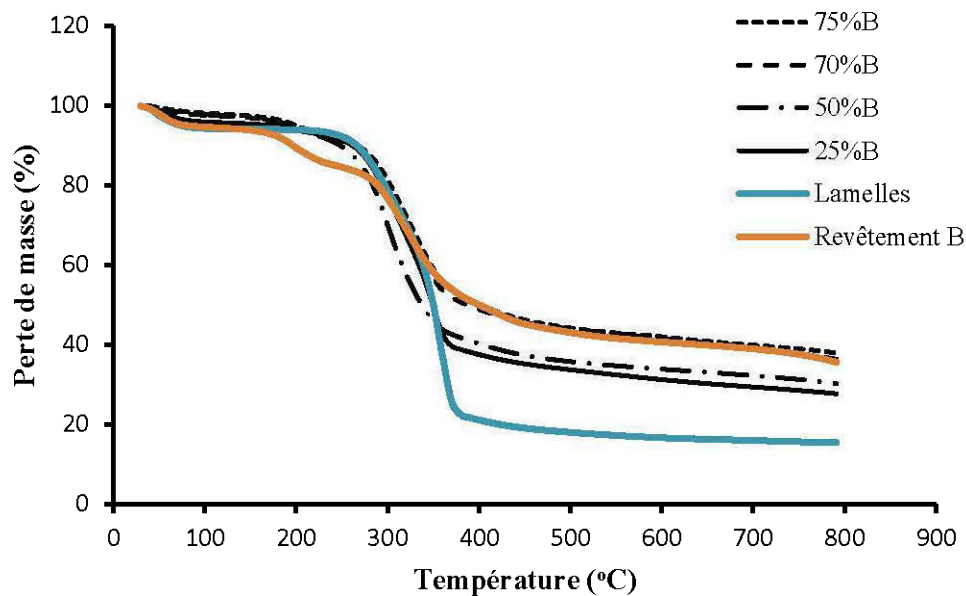


Figure 3.16 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement B à différents rapports massiques.

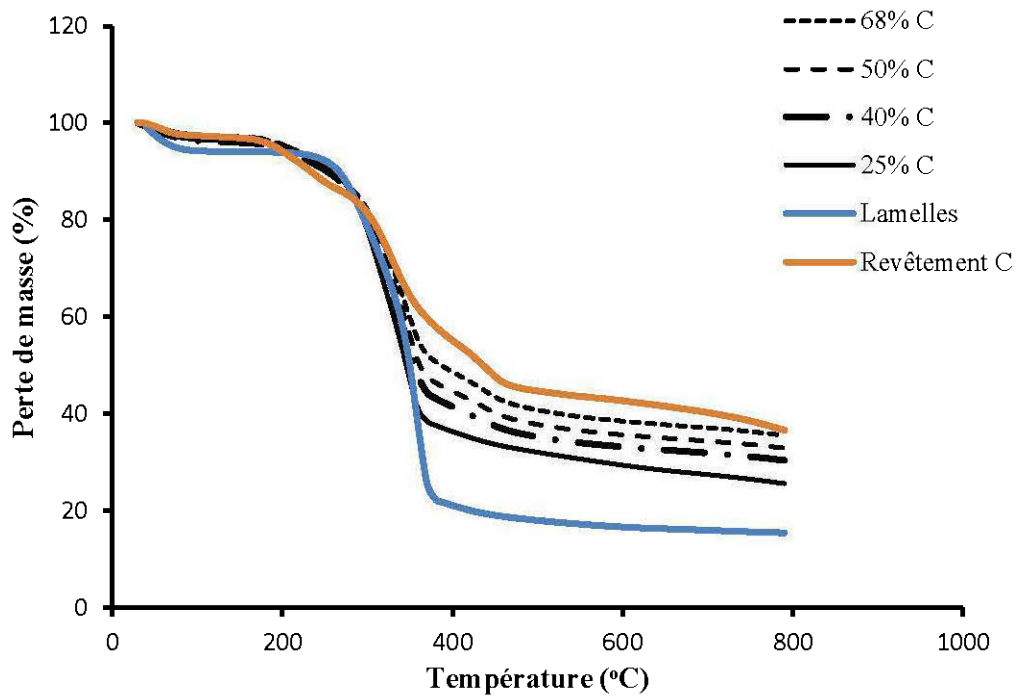


Figure 3.17 : Courbes TGA des mélanges bois-revêtement C à différents rapports massiques.

Le développement de la couche protectrice est le facteur clé dans le processus d'ignifugation, une masse résiduelle élevée n'est pas souvent significative d'une bonne résistance au feu. La comparaison entre les différents revêtements ignifuges n'est pas significative en l'occurrence sur les masses résiduelles à des températures élevées, les lamelles traitées par le revêtement A ont tendance à laisser une masse résiduelle plus élevée que les revêtements B et C. La figure 3.18 montre qu'à 70 % en pourcentage massique de revêtement, le résidu issu de l'analyse thermogravimétrique des peintures B et C suggère une meilleure formation de la couche carbonée protectrice que le revêtement A. Les différents paramètres mesurés durant l'analyse thermogravimétrique des mélanges bois-peinture sont résumés dans le tableau 3.14.

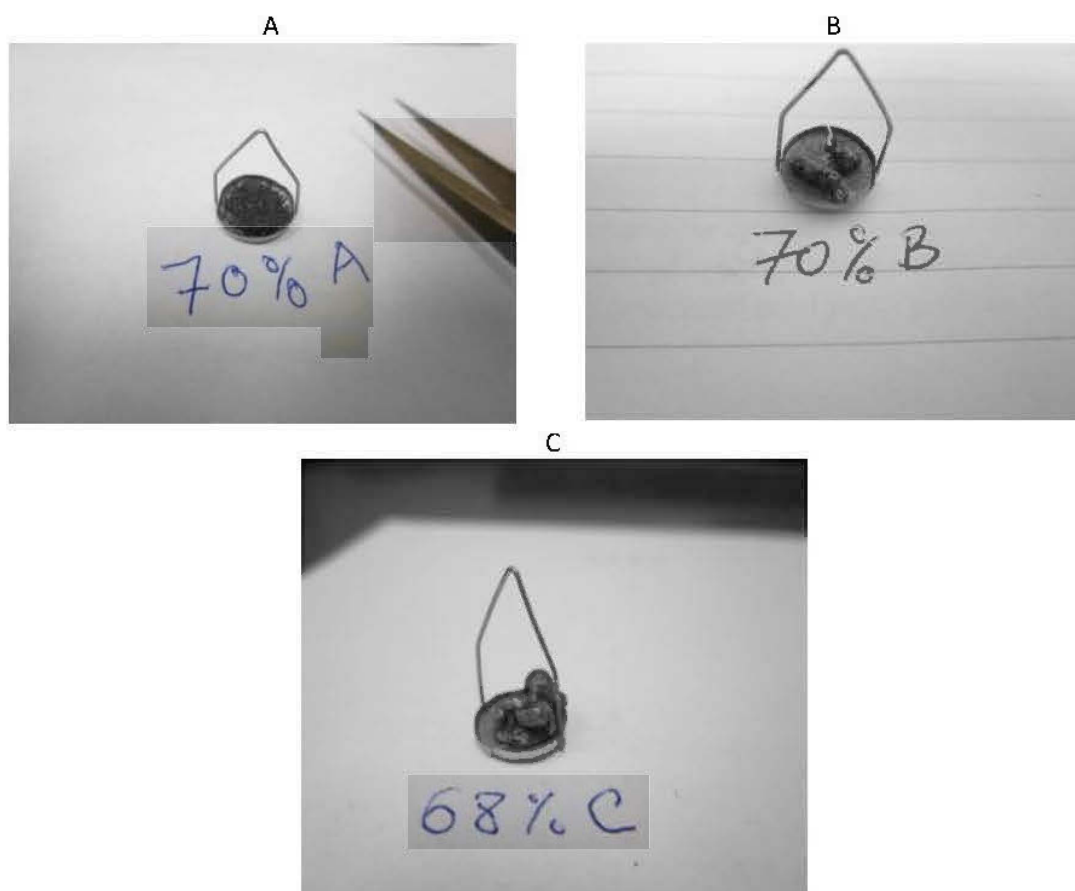


Figure 3.18 : Aspect des résidus formés lors des analyses thermogravimétriques des mélanges bois-peinture à 70% de concentration des trois peintures (A, B et C).

Tableau 3.14 : Paramètres mesurés à partir de courbes TGA des différents mélanges bois-peintures.

Mélange	Proportion (%)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	R ₅₀₀ (%)	R ₇₀₀ (%)
Bois-revêtement A	25	256	365	33,95	30,40
	40	246	362	39,79	36,32
	50	242	360	43,35	39,76
	70	232	376	53,17	49,7
Bois-revêtement B	25	263	364	33,74	29,41
	50	201	355	35,77	32,26
	70	176	367	43,91	39,19
	75	178	380	44,18	39,89
Bois-revêtement C	25	255	364	32,1	27,51
	40	216	375	35,27	31,93
	50	193	375	37,83	34,39
	68	197	385	40,82	37,11
Lamelles	---	263	370	18,09	16,06

T₁ : Température de début de dégradation.

T₂ : Température de fin de dégradation.

R₅₀₀ : Masse du résidu à 500 °C

R₇₀₀ : Masse du résidu à 700 °C

Les courbes présentées sur la figure 3.19 montrent le comportement du bois dans le mélange bois-peinture, les graphiques sont obtenus en utilisant la formule 2.3 pour les mélanges à 50 % en peintures. Ces courbes nous donnent une comparaison entre les substrats traités par les différents revêtements. On remarque que le bois traité par les trois formulations est plus stable thermiquement que le bois non traité. La masse résiduelle est de 25 %, 28 % et 29 % à 800°C pour le bois traité par le revêtement A, B et C, respectivement, et de 15 % pour le bois non traité. La formation du bouclier

carbonisée fournis au bois une protection contre la dégradation thermique à des températures élevées, entre 400 et 800°C, le bois continu à se dégrader dans le cas du bois traité par le revêtement A d'une manière plus rapide que le bois traité par le revêtement B et C, qui est relativement plus stable.

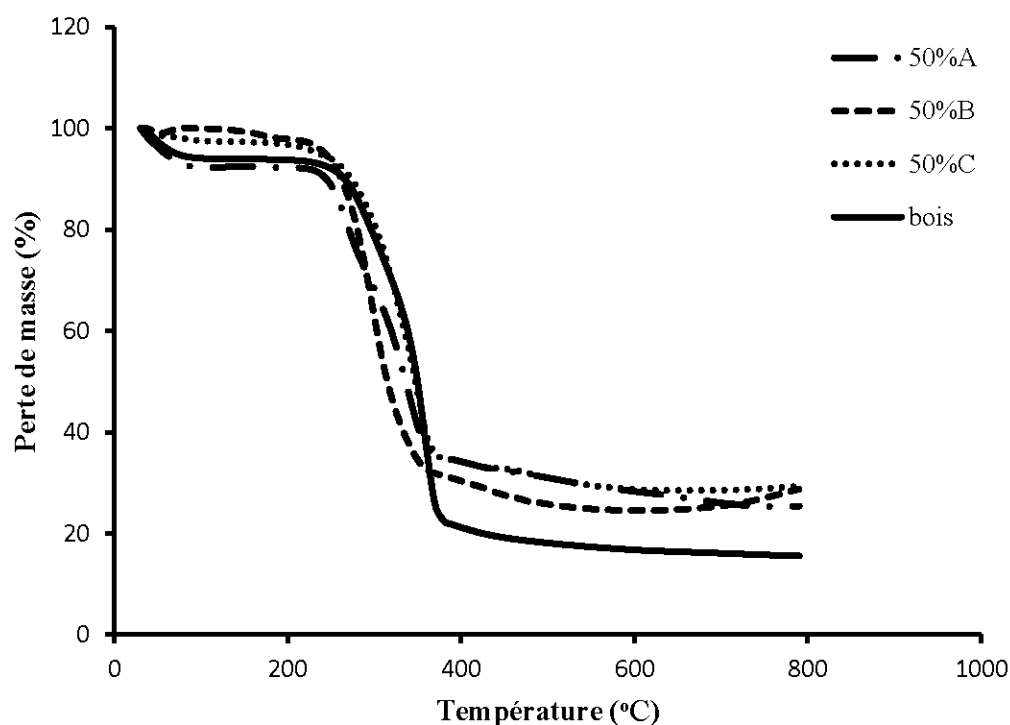


Figure 3.19 : Courbes TGA théoriques du bois dans les mélanges à 50 %.

3.2.3 Relation entre la TGA et test du tunnel à deux pieds

Cette section traite la possibilité d'une relation entre les propriétés thermiques mesurées lors des tests au feu et celle donnée par la thermogravimétrie. Plusieurs recherches ont porté un intérêt à la masse résiduelle obtenue à haute température dans l'analyse gravimétrique. Par exemple, Jimenez et al. (2006b) ont établi une relation entre la masse résiduelle obtenue par TGA à 800 °C et l'expansion de la couche carbonée enregistrée à 500 °C après avoir soumis l'échantillon d'acier muni d'un

revêtement ignifuge à un régime dynamique de température $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ dans le rhéomètre. Plus récemment, Lu et Wilkie (2010) ont rapporté une corrélation entre l'analyse thermogravimétrique et le test de la calorimétrie à cône pour les compositions polystyrène/systèmes intumescents. Les auteurs concluent qu'il existe une forte relation entre la masse résiduelle à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ obtenue par thermogravimétrie et la réduction du pic de chaleur dégagée enregistré sur le calorimètre à cône. Dans notre cas, nous supposons que les taux de recouvrement utilisés pour les échantillons dans le test du tunnel à deux pieds (faible, moyen et élevé) correspondront au 25%, 50% et 70% en proportion de revêtement dans les mélanges bois-peinture utilisés dans les analyses thermogravimétriques. La figure 3.20 présente la relation entre la masse résiduelle à $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ des mélanges bois-peinture et la perte de masse calculée à l'issue du test du tunnel à deux pieds. On remarque qu'il n'existe pas une relation significative qui met en évidence la totalité des résultats calculée pour tous les revêtements utilisés, cela est dû à la différence du comportement des revêtements ignifuges de point de vue masse résiduelle. En effet une comparaison entre les revêtements par analyse thermogravimétrique n'est pas significative. Les courbes TGA des mélanges bois-peinture montrent que la masse résiduelle augmente avec la proportion du revêtement pour les trois peintures

Le tracer de deux tendances linéaires (revêtement A, revêtements B et C communs) peuvent mettre en évidence la relation entre les masses résiduelles à $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la perte de masse vue la similitude dans le comportement des revêtements ignifuges du point de vue test au feu et analyse thermogravimétrique. Les deux relations montrent que l'efficacité ignifuge d'un revêtement augmente avec l'augmentation du résidu obtenu par TGA à haute température, la proportionnalité est relative à chaque peinture et ne peut pas être généralisé sur l'ensemble des revêtements étudiés.

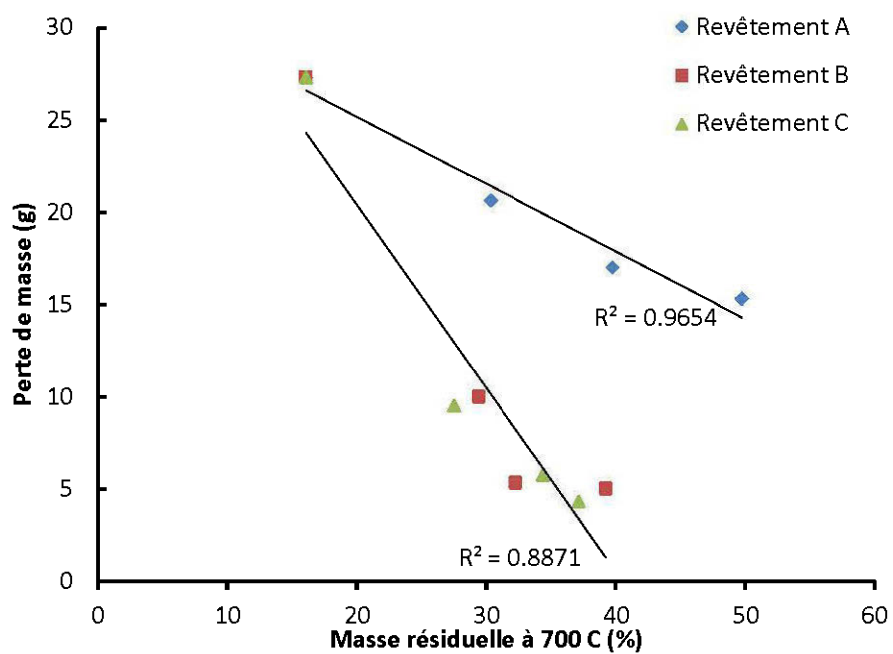


Figure 3.20 : Relations entre la masse résiduelle à 700 °C obtenue par TGA et la perte de masse lors du test de tunnel à deux pieds.

CONCLUSIONS

L'évaluation des propriétés ignifuges des revêtements intumescents commerciaux a fait l'objet de notre étude. Les tests de feu sur les trois revêtements utilisés ont montré que :

- Tous les revêtements étudiés confient aux panneaux OSB des propriétés ignifuges.
- Les propriétés mesurées dans le test de propagation de la flamme (perte de masse, propagation de la flamme, valeur d'isolation thermique et indice de carbonisation) diminuent avec l'augmentation du taux de recouvrement des revêtements pour les trois types de peinture.
- Les revêtements intumescents B et C sont largement plus efficaces que le revêtement A.
- L'application d'une troisième couche dans le cas des deux revêtements B et C (grammage avoisinant 300 g/m²) s'avère efficace pour la valeur d'isolation thermique, les autres propriétés ne subissent pas un grand changement.
- Les résultats du test du brûlage vertical ont montré qu'un temps de brûlage petit est indicatif d'une bonne résistance au feu.
- Le temps de brûlage diminue avec l'augmentation de grammages pour les trois peintures.
- L'application de la deuxième couche dans le cas du revêtement B suffit pour atteindre des résultats similaires à un grammage plus élevé.

L'analyse thermogravimétrique des revêtements ignifuges et des mélanges bois-revêtements a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les revêtements intumescents étudiés laissent un résidu thermiquement stable à des températures élevées, néanmoins, un résidu élevé à des hautes

températures ne correspond pas à une bonne efficacité ignifuge (cas du revêtement A). La présence d'oxyde de titane TiO_2 dans les revêtements B et C augmente l'efficacité de ces derniers

- Les revêtements ignifuges commencent leur dégradation à des températures inférieures aux températures de début de dégradation du bois. Le taux de dégradation des deux revêtements B et C dans le stade du développement du phénomène d'intumescence est plus accru que dans le cas du revêtement A cela explique l'efficacité de la couche protectrice formée par les deux peintures (gonflement et moussage élevés).
- La stabilité thermique des mélanges bois-peinture augmente avec le taux de revêtement dans le mélange, une comparaison entre les revêtements n'est pas significative. Les résultats de l'analyse thermique des mélanges confirment l'effet du taux de recouvrement sur les propriétés ignifuges déduit par les tests au feu.
- Le tracé des courbes TGA théoriques du bois a permis de comparer entre le comportement du bois dans les mélanges bois-peinture à 50% des différents revêtements. Le bois présent dans les mélanges est plus stable que le bois de référence. Cette stabilité est reliée à la formation du bouclier carbonée sur la surface du bois, plus stable dans le cas des revêtements B et C que le revêtement A qui, à des températures élevées, continue à se dégrader.

Finalement, il n'existe pas une relation générale qui relie entre les résultats trouvés par la TGA et le test du tunnel à deux pieds, néanmoins, la masse résiduelle à haute température et la perte de masse peuvent être reliée séparément pour chaque revêtement étudié ou par groupe de peintures qui se comportent de la même manière du point de vue ignifugation.

Bibliographies

ASTM D 3806-98. Standard Test Method of Small-Scale Evaluation of Fire-Retardant Paints (2-Foot Tunnel Method). ASTM International, West Conshohochen, PA.

ASTM D 3801-10. Standard Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a vertical Position. ASTM International, West Conshohochen, PA.

ASTM E 84. Surface burning characteristic of building materials. ASTM International, West Conshohochen, PA.

ASTM E 1354. Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter. Annual Book of Standards, Vol. 04.07, ASTM International, West Conshohochen, PA.

Andersson, A., Landmark, S., Maurer, F.H.J. 2007. Evaluation and characterization of ammonium polyphosphate-pentaerythritol-based systems for intumescent coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 104:748–753.

Atreya, A. 1983. Pyrolysis, ignition, and flame spread on horizontal surfaces of wood. Cambridge, MA: Harvard University. Ph.D. dissertation.

Babrauskas, V. 1984. Development of the cone calorimeter. A bench-scale heat release rate apparatus based on O₂ consumption. *Fire and Materials*, 8: 81-95.

Babrauskas, V. 2000: Fire test methods for evaluation of fire-retardant Efficacy in polymeric materials. Page 82-108 dans: Grand, A.F., Wilkie, C.A. 2000. Fire retardancy of polymeric materials, Marcel Dekker, Inc.

Baljinder, K.K., Horrocks, A.R. 1996. Complex char formation in flame-retarded fire-intumescent combinations-II thermal analytical studies. *Polymer Degradation and Stability*, 54:289–303.

Bourbigot, S., Duquesne, S. 2010. Intumescence-Based Fire Retardants. Pages 129-158 dans : Wilkie, C. A., Morgan, A. B. 2010. *Fire Retardancy of Polymeric Materials*. CRC Press ,Taylor and Francis Group.

Bourbigot, S., Le Bras, M., Duquesne, S., Rochery, M. 2004. Recent advances for intumescent polymers *Macromolecular Materials and Engineering*, 289: 499-511.

Bryan, K.M. 1998. Computational modeling of wood combustion. Madison, WI: University of Wisconsin–Madison. Ph.D. dissertation.

Brossas, J. 1995. Retardateur de flamme. *Technique de l'ingénieur*. AM 3-237, pp : 1-12.

Browne, F.L. 1956. Theories of the combustion of wood and its control—a survey of the literature. Rep. No. 2136. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Camino, G., Costa, L., Martinasso, G. 1989. Intumescent fire retardant systems. *Polymer Degradation and Stability*, 23: 359–376.

Camino, G., Costa, L., Trossarelli, L. 1985. Study of the mechanism of intumescence in fire retardant polymers: Part V-Mechanism of formation of gaseous products in the thermal degradation of ammonium polyphosphate. *Polymer Degradation and Stability*, 12: 203-211.

Canosa, G., Alfieri, P.V., Giudice, C.A. 2012. Hybrid intumescent coatings for wood protection against fire action. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50: 11897-11905.

Chuang, C-S., Tsai, K-C., Wang, M-K., Ou, C-C., Ko, C-H., Shiau, I-L. 2008. Effects of intumescent formulation for acrylic-based coating on flame-retardancy of painted red lauan (*Parashorea* spp.) thin plywood. *Wood Science and Technology*, 42: 593-607.

Demir, H., Arkis, E., Balköse, D., Ülkü, S. 2005. Synergistic effect of natural zeolites on flame retardant additives. *Polymer Degradation and Stability*, 89: 478-483.

Dobele, G., Urbanovich, I., Zhurins, A., Kampars, V., Meier, D. 2007. Application of analytical pyrolysis for wood fire protection control. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79: 47-51.

Drevelle, C., Duquesne, S., Le Bras, M., Lefebvre, J., Delobel, R., Castrovinci, A., Magniez, C., Vouters, M. 2004. Influence of ammonium polyphosphate on the mechanism of thermal degradation of an acrylic binder resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 94:717–729.

Ducrocq, P., Duquesne, S., Magnet, S., Bourbigot, S., Delobel, R. 2006. Interactions between chlorinated paraffins and melamine in intumescent paint-investing a way to suppress chlorinated paraffins from the formulations. *Progress in Organic Coatings*, 57: 430-438.

Duquesne, S. 2001. Étude des procédés d'ignifugation de substrats polymères par revêtements intumescents, application aux polyuréthanes. Université des sciences et technologies de Lille, thèse de Doctorat, 206 pages.

Duquesne, S., Magnet, S., Jama, C., Delobel, R. 2005. Thermoplastic resins for thin film intumescence coatings-Towards a better understanding of their effect on intumescence efficiency. *Polymer Degradation and Stability*, 88: 63-69.

Gu, J-W., Zhang, G-C., Dong, C-L., Zhang, Q-Y., Kong, J. 2007. Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame-retardant coatings. *Surface Coating and Technology*, 201: 7835-7841.

Giudice, C.A., Benitez, J.C. 2001. Zinc borates as flame-retardant pigments in chlorine-containing coatings. *Progress in Organic Coatings*, 42: 82-88.

Giudice, C.A., Pereyra, A.M. 2010. Silica nanoparticles in high silica/alkali molar ratio solutions as fire-retardant impregnants for woods. *Fire and Materials*, 34:177-187.

Harada, T., Yasushi, N., Yasushi, A. 2007. The effect of ceramic coating of fire-retardant wood on combustibility and weatherability. *Journal of Wood Science*, 53 (3): 249-254.

Hassan, M.A., Kozlowski, R., Obidzinski, B. 2008. New Fire-Protective Intumescent Coating for Wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 110: 83-90.

Horrocks, A.R., Kandola, B.K., Davies, P.J., Zhang, S., Padbury, S.A. 2005. Developments in flame retardant textiles a review. *Polymer Degradation and Stability*, 88: 3-12.

Huggett, C. 1980. Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements. *Fire and Materials*, 4: 61-65.

ISO 5660-1. Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 5660-2. Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 2: Smoke Production Rate (Dynamic Measurement). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- Janssens, M. 2010. Fundamentals of Fire Testing and What Tests Measure. Pages 350-385 dans: Wilkie, C.A. et Morgan, A.B. 2010. Fire Retardancy of Polymeric Materials. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Jimenez, M., Duquesne, S., Bourbigot, S. 2006a. Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*, 449: 16-26.
- Jimenez, M., Duquesne, S., Bourbigot, S. 2006b. Multiscale experimental approach for developing high-performance intumescent coating. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45: 4500-4508.
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.-M., Dubois, P. 2009. New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering R*, 63: 100-125.
- Li, G., Liang, G., He, T., Yang, Q., Song, X. 2007. Effects of EG and MoSi₂ on thermal degradation of intumescent coating. *Polymer Degradation and Stability*, 92:569–579.
- Lindsay, C.I., Hill, S.B., Hearn, M., Manton, G., Everall, N., Bunn, A., Heron, J., Fletcher, I. 2000. Mechanisms of action of phosphorus based flame retardants in acrylic polymers. *Polymer International*, 49:1183–1192.
- Luneva, N.K., Petrovskaya, L.I. 2008. Performance of Intumescent Fire Retardant for Wood. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 81(4): 704-707.
- Neag, C.M. 1995. Coating characterization by thermal analysis. Pages 841-864 dans Koleske J. V. 1995 *Paint and Coating Testing Manuel*. Gardner-Sward handbook.
- Rowell, M., Susan, L., Van-Green, L. 2005. Thermal properties. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla,(CRC press): pages:121-138.

Samyn, F., Bourbigot, S., Duquesne, S., Delobel, S. 2007. Effect of zinc borate on the thermal degradation of ammonium polyphosphate. *Thermochimica Acta*, 456:134-144.

Samyn, F., Jimenez, M., Duquesne, S., Bourbigot, S. 2010. L'intumescence: un concept de barrière thermique contre le feu. pp : 1-6. Société française de thermique.

Schaffer, E.L. 1966. Review of information related to the charring rate of wood. Research Note FPL-0145. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Shafizadeh, F. 1984. The chemistry of pyrolysis and combustion. Dans : Rowell, R.M., ed. *The chemistry of solid wood, advances in chemistry series 207*. Washington, DC: American Chemical Society, 489–530.

Shafizadeh, F., Fu, Y.L. 1973. Pyrolysis of cellulose. *Carbohydrate Res.*, 29:113–122.

Vandersall, H.L. 1971. Intumescent coating systems, their development and chemistry. *Journal of Fire and Flammability*, 2:97–140.

Wang, G., Yang, J. 2011a. Thermal degradation study of fire resistive coating containing melamine polyphosphate and dipentaerythritol. *Progress in Organic Coatings*, 72: 605-611.

Wang, G. et Yang, J. 2011b. Influences of molecular weight of epoxy binder on fire protection of waterborne intumescent fire resistive coating. *Surface and Coating Technology*, SCT-17075; pp: 1-6.

Wang, Z., Han, E., Ke, W. 2005. Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame-retardant coating. *Progress in Organic Coatings*, 53:29-37.

Wang, Z., Han, E., Ke, W. 2007a. Fire-resistant effect of nanoclay on intumescent nanocomposite coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 103:1681–1689.

Wang, Z., Han, E., Liu, F., Ke, W. 2007b. Thermal Behavior of Nano-TiO₂ in Fire-Resistant Coating. *Journal of Materials Science and Technology*, 23(4): 547-550.

White, R. H. 1979. Oxygen index evaluation of fire-retardant-treated wood. *Wood Science and Engineering Dept., Oregon State University* Vol. 12, no. 2.

White, R.H., Dietsberger, M.A. 2010. Fire Safety of Wood Construction. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, Forest Service. Madison, Wisconsin. Centennial Edition.

Wladyka-Przybylak, M., Kozłowski, R. 1999. The Thermal Characteristics of Different Intumescent Coatings. *Fire and Materials*, 23:33-43.

ANNEXES

Tableau X.1 : Masse des panneaux OSB témoins (sans revêtement), avant et après le test.

Identification	G ₁ (g)	G ₂ (g)	G ₁ -G ₂ (g)	G ₃ (g)	G ₁ -G ₃ (g)
E-1	408,98	382,81	26,17	386,25	22,73
E-2	436,38	410,88	25,50	414,60	21,78
E-3	433,66	407,36	26,30	412,59	21,07
E-4	433,75	405,25	28,50	409,39	24,36
E-5	439,52	410,90	28,62	415,21	24,31
E-6	452,90	424,00	28,90	428,44	24,46
Moyenne	434,20	406,87	27,33	411,08	23,12
Écart type	14,28	13,47	1,50	13,80	1,48

Tableau X.2 : Masse des échantillons traités par le revêtement A, avant et après le test.

Identification	G _i (g/m ²)	G ₁ (g)	G ₂ (g)	G ₁ -G ₂ (g)	G ₃ (g)	G ₁ -G ₃ (g)
A 1-1	110,06	409,06	388,17	20,89	391,74	17,32
A 1-2	110,06	414,90	394,50	20,40	398,17	16,73
A 1-3	110,06	413,90	393,10	20,80	396,78	17,12
A 2-1	115,55	425,10	405,20	19,90	408,67	16,43
A 2-2	115,55	411,10	391,00	20,10	394,82	16,28
A 2-3	115,55	409,10	387,80	21,30	391,60	17,50
Moyenne	112,81	413,86	393,30	20,57	396,96	16,90
Écart type	3,01	6,01	6,40	0,53	6,31	0,49
A 3-1	213,98	411,30	394,21	17,09	397,45	13,85
A 3-2	213,98	416,55	397,70	18,85	401,52	15,03
A 3-3	213,98	414,33	399,51	14,82	402,98	11,35
A 4-1	218,66	430,80	413,85	16,95	416,67	14,13
A 4-2	218,66	429,69	413,50	16,19	416,74	12,95
A 4-3	218,66	409,37	391,37	18,00	394,95	14,42
Moyenne	216,32	418,67	401,69	16,98	405,05	13,62
Écart type	2,56	9,30	9,70	1,40	9,47	1,31
A 5-1	302,73	456,70	442,13	14,57	445,23	11,47
A 5-2	302,73	463,75	448,09	15,66	451,54	12,21
A 5-3	302,73	450,86	432,88	17,98	436,12	14,74
A 6-1	322,05	423,30	407,54	15,76	411,16	12,14
A 6-2	322,05	441,15	427,30	13,85	430,61	10,54
A 6-3	322,05	434,45	420,45	14,00	423,70	10,75
Moyenne	312,39	445,04	429,73	15,30	433,06	11,98
Écart type	10,58	14,97	14,73	1,54	14,64	1,52

Tableau X.3 : Masse des échantillons traités par le revêtement B, avant et après le test.

Identification	G_1 (g/m ²)	G_1 (g)	G_2 (g)	G_1-G_2 (g)	G_3 (g)	G_1-G_3 (g)
B 1-1	127,39	426,00	415,98	10,02	419,20	6,80
B 1-2	127,39	441,60	429,80	11,80	433,43	8,17
B 1-3	127,39	431,60	421,90	9,70	425,28	6,32
B 2-1	115,98	441,84	432,23	9,61	435,38	6,46
B 2-2	115,98	415,70	406,97	8,73	410,33	5,37
B 2-3	115,98	443,38	433,22	10,16	436,06	7,32
Moyenne	121,69	433,35	423,35	10,00	426,61	6,74
Écart type	6,25	11,04	10,42	1,01	10,34	0,95
B 3-1	244,56	461,60	456,40	5,20	459,15	2,45
B 3-2	244,56	427,70	422,75	4,95	425,85	1,85
B 3-3	244,56	434,25	428,60	5,65	431,03	3,22
B 4-1	241,70	434,54	429,45	5,09	432,13	2,41
B 4-2	241,70	430,69	424,95	5,74	427,78	2,91
B 4-3	241,70	441,05	435,83	5,22	438,29	2,76
Moyenne	243,13	438,31	433,00	5,31	435,71	2,60
Écart type	1,56	12,26	12,31	0,32	12,25	0,47
B 5-1	332,87	449,52	444,88	4,64	447,61	1,91
B 5-2	332,87	433,70	428,65	5,05	432,58	1,12
B 5-3	332,87	424,00	418,45	5,55	422,25	1,75
B 6-1	321,63	425,85	420,85	5,00	424,15	1,70
B 6-2	321,63	439,10	434,51	4,59	438,13	0,97
B 6-3	321,63	436,30	431,43	4,87	434,88	1,42
Moyenne	327,25	434,75	429,80	4,95	433,77	1,48
Écart type	6,16	9,33	9,62	0,35	9,35	0,37

Tableau X.4 : Masse des échantillons traités par le revêtement C, avant et après le test

Identification	G_1 (g/m ²)	G_1 (g)	G_2 (g)	G_1-G_2 (g)	G_3 (g)	G_1-G_3 (g)
C 1-1	120,45	419,85	411,28	8,57	413,86	5,99
C 1-2	120,45	428,10	418,56	9,54	421,37	6,73
C 1-3	120,45	422,00	411,15	10,85	414,26	7,74
C 2-1	127,50	434,10	424,90	9,20	427,66	6,44
C 2-2	127,50	429,50	419,84	9,66	422,37	7,13
C 2-3	127,50	424,91	415,53	9,38	418,22	6,69
Moyenne	123,97	426,41	416,88	9,53	419,62	6,79
Écart type	3,86	5,22	5,33	0,75	5,28	0,60
C 3-1	225,23	433,25	426,43	6,82	430,33	2,92
C 3-2	225,23	429,56	423,52	6,04	427,11	2,45
C 3-3	225,23	422,71	417,38	5,33	421,03	1,68
C 4-1	223,08	442,00	436,48	5,52	438,48	3,52
C 4-2	223,08	433,51	428,45	5,06	430,40	3,11
C 4-3	223,08	435,80	430,10	5,70	432,54	3,26
Moyenne	224,16	432,81	427,06	5,74	429,98	2,82
Écart type	1,18	6,43	6,43	0,62	5,79	0,67
C 5-1	325,50	424,13	419,79	4,34	422,28	1,85
C 5-2	325,50	429,12	424,95	4,17	427,34	1,78
C 5-3	325,50	440,10	436,17	3,93	438,43	1,67
C 6-1	313,39	455,89	451,73	4,16	453,84	2,05
C 6-2	313,39	441,18	436,80	4,38	439,23	1,95
C 6-3	313,39	437,95	433,20	4,75	435,47	2,48
Moyenne	319,45	438,06	433,77	4,29	436,10	1,96
Écart type	6,05	11,01	11,05	0,28	10,94	0,29

Tableau X.5 : Propagation de la flamme des panneaux témoins.

Identification	L_s (in)	L_s-L_a (in)
E-1	17	15
E-2	17	15
E-3	16	14
E-4	17	15
E-5	17,5	15,5
E-6	18	16
Moyenne	17,08	15,08
Écart type	0,66	0,66

Tableau X.6 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement A.

Identification	G_i (g/m ²)	L_s (in)	L_s-L_a (in)
A 1-1	110,06	14,00	12,00
A 1-2	110,06	14,30	12,30
A 1-3	110,06	13,30	11,30
A 2-1	115,55	14,60	12,60
A 2-2	115,55	14,50	12,50
A 2-3	115,55	14,00	12,00
Moyenne	112,81	14,12	12,12
Écart type	3,01	0,47	0,47
A 3-1	213,98	12,00	10,00
A 3-2	213,98	11,50	9,50
A 3-3	213,98	10,00	8,00
A 4-1	218,66	12,00	10,00
A 4-2	218,66	11,60	9,60
A 4-3	218,66	12,30	10,30
Moyenne	216,32	11,57	9,57
Écart type	2,56	0,82	0,82
A 5-1	302,73	10,00	8,00
A 5-2	302,73	10,00	8,00
A 5-3	302,73	10,66	8,66
A 6-1	322,05	10,00	8,00
A 6-2	322,05	10,00	8,00
A 6-3	322,05	10,00	8,00
Moyenne	312,39	10,11	8,11
Écart type	10,58	0,27	0,27

Tableau X.7 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement B.

Identification	G_1 (g/m ²)	L_s (in)	L_s-L_a (in)
B 1-1	127,39	6,00	4,00
B 1-2	127,39	8,00	6,00
B 1-3	127,39	6,00	4,25
B 2-1	115,98	6,25	4,00
B 2-2	115,98	6,50	4,50
B 2-3	115,98	6,00	4,00
Moyenne	121,69	6,46	4,46
Écart type	6,25	0,78	0,78
B 3-1	244,56	3,00	1,00
B 3-2	244,56	4,00	2,00
B 3-3	244,56	3,00	1,00
B 4-1	241,70	3,80	1,80
B 4-2	241,70	3,50	1,50
B 4-3	241,70	4,00	2,00
Moyenne	243,13	3,55	1,55
Écart type	1,56	0,46	0,46
B 5-1	332,87	3,00	1,00
B 5-2	332,87	3,00	1,00
B 5-3	332,87	3,00	1,00
B 6-1	321,63	2,50	0,50
B 6-2	321,63	2,50	0,50
B 6-3	321,63	3,00	1,00
Moyenne	327,25	2,83	0,83
Écart type	6,16	0,26	0,26

Tableau X.8 : Propagation de la flamme des panneaux traités par le revêtement C

Identification	G_i (g/m ²)	L_s (in)	L_s-L_a (in)
C 1-1	120,45	6,00	4,10
C 1-2	120,45	6,00	4,10
C 1-3	120,45	7,60	5,70
C 2-1	127,50	7,00	5,10
C 2-2	127,50	6,00	4,10
C 2-3	127,50	6,00	4,10
Moyenne	123,97	6,43	4,53
Écart type	3,86	0,70	0,70
C 3-1	225,23	4,50	2,60
C 3-2	225,23	4,00	2,10
C 3-3	225,23	4,50	2,60
C 4-1	223,08	3,00	1,10
C 4-2	223,08	3,30	1,40
C 4-3	223,08	3,70	1,80
Moyenne	224,16	3,83	1,93
Écart type	1,18	0,62	0,62
C 5-1	325,50	3,30	1,40
C 5-2	325,50	3,30	1,40
C 5-3	325,50	3,00	1,10
C 6-1	313,39	3,00	1,10
C 6-2	313,39	3,30	1,40
C 6-3	313,39	4,00	2,10
Moyenne	319,45	3,32	1,42
Écart type	6,63	0,37	0,37

Tableau X.9: Différence de température des panneaux OSB témoins.

Identification	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	ΔT_3 (°C)	ΔT_4 (°C)
E-1	22,90	22,70	18,90	13,40
E-2	18,10	18,10	12,70	8,20
E-3	21,70	22,00	17,10	11,20
E-4	23,20	22,00	16,50	12,00
E-5	23,30	22,80	18,60	14,50
E-6	20,40	20,50	17,20	11,90
Moyenne	21,60	21,35	16,83	11,87
Écart type	2,04	1,79	2,23	2,15

Tableau X.10 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent A

Identification	G_1 (g/m ²)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	ΔT_3 (°C)	ΔT_4 (°C)
A 1-1	110,06	20,50	20,40	16,10	11,50
A 1-2	110,06	24,40	25,10	19,40	12,30
A 1-3	110,06	23,70	23,70	17,70	11,50
A 2-1	115,55	21,80	23,00	18,80	12,60
A 2-2	115,55	22,00	22,30	17,00	11,00
A 2-3	115,55	21,60	20,90	15,70	10,30
Moyenne	112,81	22,33	22,57	17,45	11,53
Écart type	3,01	1,44	1,76	1,47	0,84
A 3-1	213,98	18,90	18,90	13,00	7,80
A 3-2	213,98	18,80	18,00	12,60	7,50
A 3-3	213,98	19,30	18,50	11,30	6,60
A 4-1	218,66	20,50	19,70	14,10	8,70
A 4-2	218,66	19,70	19,70	12,90	6,80
A 4-3	218,66	18,70	19,20	13,40	7,70
Moyenne	216,32	19,32	19,00	12,88	7,52
Écart type	2,56	0,69	0,68	0,93	0,76
A 5-1	302,73	15,30	14,60	9,00	4,40
A 5-2	302,73	14,20	14,10	9,00	4,60
A 5-3	302,73	15,00	13,70	8,40	4,30
A 6-1	322,05	15,50	15,00	8,70	4,60
A 6-2	322,05	14,20	13,30	7,70	4,20
A 6-3	322,05	15,10	13,30	7,70	4,00
Moyenne	312,39	14,88	14,00	8,42	4,35
Écart type	10,58	0,56	0,70	0,60	0,23

Tableau X.11 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent B.

Identification	G_1 (g/m ²)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	ΔT_3 (°C)	ΔT_4 (°C)
B 1-1	127,39	14,10	11,50	6,20	3,50
B 1-2	127,39	13,40	12,40	7,50	3,60
B 1-3	127,39	14,50	12,40	7,00	4,00
B 2-1	115,98	12,10	10,90	5,80	2,90
B 2-2	115,98	13,50	11,30	6,10	3,50
B 2-3	115,98	12,80	10,50	5,40	3,10
Moyenne	121,69	13,40	11,50	6,33	3,43
Écart type	6,25	0,87	0,78	0,78	0,39
B 3-1	244,55	10,20	8,00	4,00	2,30
B 3-2	244,55	9,30	7,80	4,00	2,30
B 3-3	244,55	9,80	8,10	4,40	2,60
B 4-1	241,70	10,50	8,10	4,40	2,70
B 4-2	241,70	11,10	10,00	5,90	3,70
B 4-3	241,70	13,40	11,50	6,60	4,00
Moyenne	243,13	10,72	8,92	4,88	2,93
Écart type	1,56	1,45	1,50	1,10	0,73
B 5-1	332,87	8,90	7,20	3,60	1,60
B 5-2	332,87	8,00	5,90	3,00	1,80
B 5-3	332,87	9,00	7,60	4,10	2,30
B 6-1	321,62	9,00	6,60	3,30	1,90
B 6-2	321,62	10,30	8,40	4,50	2,60
B 6-3	321,62	8,40	7,00	3,70	2,30
Moyenne	327,25	8,93	7,12	3,70	2,08
Écart type	6,63	0,78	0,85	0,54	0,38

Tableau X.12 : Différence de température des panneaux OSB revêtus par le revêtement ignifuge intumescent C.

Identification	Gi (g/m ²)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)	ΔT_3 (°C)	ΔT_4 (°C)
C 1-1	120,44	14,80	12,20	6,40	3,40
C 1-2	120,44	13,90	12,20	7,00	3,90
C 1-3	120,44	13,00	11,20	6,10	3,50
C 2-1	127,49	14,40	12,50	6,90	3,40
C 2-2	127,49	13,70	11,20	5,70	3,30
C 2-3	127,49	14,90	13,70	8,10	4,20
Moyenne	123,97	14,12	12,17	6,70	3,62
Écart type	3,86	0,73	0,93	0,84	0,35
C 3-3	225,23	13,50	11,20	6,00	3,40
C 3-2	225,23	12,20	9,90	5,40	3,30
C 3-3	225,23	10,10	8,60	4,60	2,60
C 4-1	223,08	11,50	8,80	4,60	2,60
C 4-2	223,08	12,30	9,50	5,10	2,90
C 4-3	223,08	11,60	9,60	5,00	2,90
Moyenne	224,16	11,87	9,60	5,12	2,95
Écart type	1,18	1,12	0,93	0,53	0,34
C 5-1	325,50	10,00	8,00	4,50	2,70
C 5-2	325,50	10,30	8,20	4,40	2,50
C 5-3	325,50	10,40	8,00	4,30	2,70
C 6-1	313,39	9,20	6,30	3,10	1,60
C 6-2	313,39	9,50	6,90	3,70	2,30
C 6-3	313,39	10,00	7,80	4,10	2,60
Moyenne	319,45	9,90	7,53	4,02	2,40
Écart type	6,63	0,46	0,76	0,53	0,42

Tableau X.13 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB témoins.

Identification	Épaisseur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)	Indice de carbonisation (cm ³)
E-1	0,45	5,70	40,30	102,45
E-2	0,49	5,70	36,30	101,59
E-3	0,55	5,60	36,80	112,31
E-4	0,52	5,80	36,00	108,47
E-5	0,43	5,70	40,50	99,27
E-6	0,49	5,70	41,20	116,01
Moyenne	0,49	5,70	38,52	106,68
Écart type	0,04	0,06	2,39	6,64

Tableau X.14 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement A.

Identification	G _i (g/m ²)	Épaisseur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)	Indice de carbonisation (cm ³)
A1-1	110,06	0,46	5,60	31,20	80,02
A1-2	110,06	0,48	5,50	31,00	82,35
A1-3	110,06	0,46	5,60	29,50	76,65
A 2-1	115,55	0,45	5,50	28,00	69,84
A 2-2	115,55	0,48	5,45	29,50	76,77
A 2-3	115,55	0,50	5,60	26,50	74,42
Moyenne	112,81	0,47	5,54	29,28	76,68
Écart type	3,01	0,02	0,07	1,79	4,36
A 3-1	213,98	0,41	5,40	27,50	61,55
A 3-2	213,98	0,43	5,60	28,00	67,03
A 3-3	213,98	0,42	5,50	25,40	58,60
A 4-1	218,66	0,41	5,50	24,50	55,05
A 4-2	218,66	0,43	5,40	25,00	57,44
A 4-3	218,66	0,42	5,40	24,00	54,24
Moyenne	216,32	0,42	5,47	25,73	58,99
Écart type	2,56	0,01	0,08	1,64	4,73
A 5-1	302,73	0,44	5,50	26,50	64,35
A 5-2	302,73	0,39	5,50	22,50	48,08
A 5-3	302,73	0,44	5,60	24,50	60,71
A 6-1	322,05	0,38	5,40	23,50	48,16
A 6-2	322,05	0,43	5,50	21,00	49,26
A 6-3	322,05	0,43	5,30	21,50	48,60
Moyenne	312,39	0,42	5,47	23,25	53,19
Écart type	10,58	0,03	0,10	2,04	7,34

Tableau X.15 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement B.

Identification	G_i (g/m ²)	Épaisseur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)	Indice de carbonisation (cm ³)
B 1-1	127,39	0,43	5,40	15,00	34,55
B 1-2	127,39	0,43	5,30	18,00	41,26
B 1-3	127,39	0,45	5,30	14,00	33,46
B 2-1	115,98	0,40	5,30	15,50	32,70
B 2-2	115,98	0,38	5,40	14,50	29,75
B 2-3	115,98	0,46	5,30	15,00	36,93
Moyenne	121,69	0,43	5,33	15,33	34,77
Écart type	6,25	0,03	0,05	1,40	3,95
B 3-1	244,55	0,33	5,10	11,00	18,34
B 3-2	244,55	0,31	5,20	10,80	17,35
B 3-3	244,55	0,31	5,10	11,00	17,19
B 4-1	241,70	0,32	5,20	12,00	19,72
B 4-2	241,70	0,32	5,10	12,50	20,21
B 4-3	241,70	0,31	5,00	12,40	19,44
Moyenne	243,13	0,31	5,12	11,62	18,71
Écart type	1,56	0,01	0,08	0,77	1,27
B 5-1	332,87	0,28	4,80	10,00	13,49
B 5-2	332,87	0,26	4,70	10,00	12,38
B 5-3	332,87	0,30	4,90	10,50	15,28
B 6-1	321,62	0,26	4,70	9,80	12,16
B 6-2	321,62	0,26	4,80	10,00	12,50
B 6-3	321,62	0,27	4,80	9,70	12,64
Moyenne	327,25	0,27	4,78	10,00	13,08
Écart type	6,16	0,01	0,08	0,28	1,17

Tableau X.16 : Indice de carbonisation et ces dimensions pour les échantillons OSB traités par le revêtement C.

Identification	G _i (g/m ²)	Épaisseur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)	Indice de carbonisation (cm ³)
C 1-1	120,44	0,43	5,50	14,00	33,26
C 1-2	120,44	0,42	5,50	16,00	36,61
C 1-3	120,44	0,44	5,60	16,00	39,07
C 2-1	127,49	0,44	5,40	16,00	37,97
C 2-2	127,49	0,40	5,40	15,00	32,00
C 2-3	127,49	0,40	5,50	15,50	34,31
Moyenne	123,97	0,42	5,48	15,42	35,54
Écart type	3,86	0,02	0,08	0,80	2,78
C 3-1	225,23	0,28	5,20	11,00	15,93
C 3-2	225,23	0,31	5,30	10,80	17,77
C 3-3	225,23	0,33	5,30	11,00	19,41
C 4-1	223,08	0,26	5,00	10,50	13,81
C 4-2	223,08	0,30	5,00	10,50	15,83
C 4-3	223,08	0,30	5,10	10,50	16,09
Moyenne	224,16	0,30	5,15	10,72	16,47
Écart type	1,18	0,02	0,14	0,25	1,91
C 5-1	325,50	0,27	4,90	10,50	13,84
C 5-2	325,50	0,23	4,80	10,00	10,85
C 5-3	325,50	0,27	4,70	10,20	13,04
C 6-1	313,39	0,27	5,00	10,50	14,33
C 6-2	313,39	0,28	4,70	10,20	13,42
C 6-3	313,39	0,29	4,80	10,80	14,90
Moyenne	319,45	0,27	4,82	10,37	13,40
Écart type	6,63	0,02	0,12	0,29	1,41

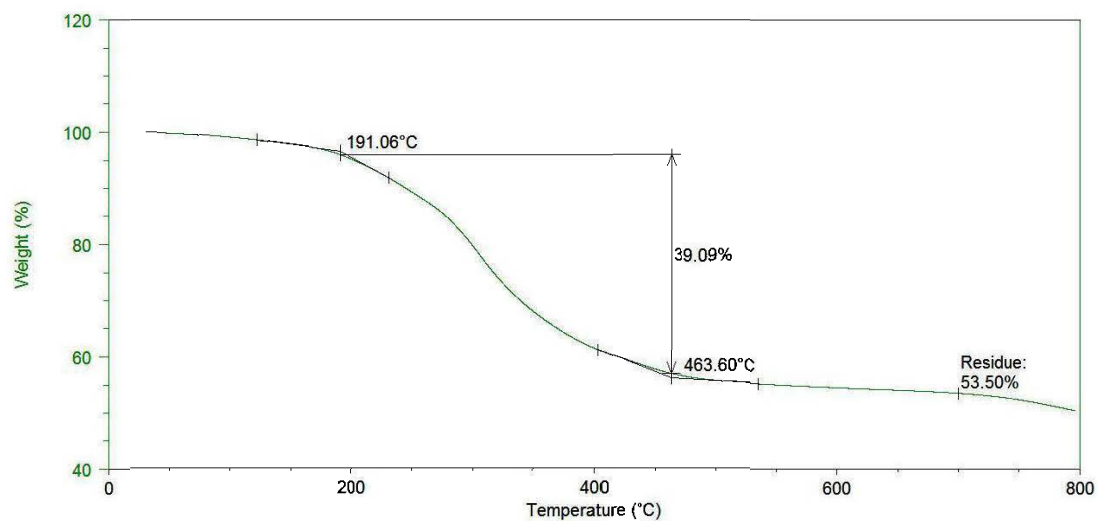


Figure X.1 : Courbe TGA du revêtement A.

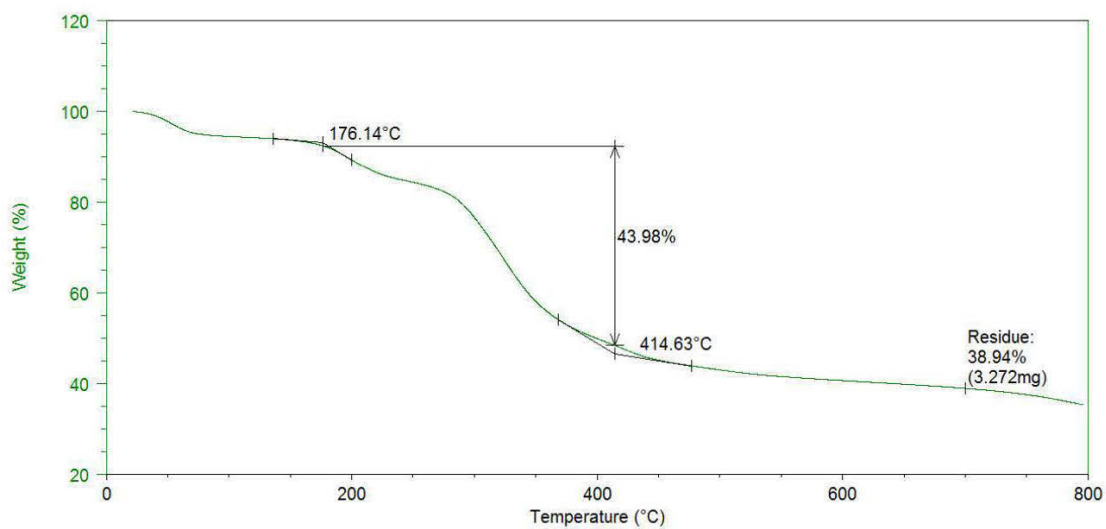


Figure X.2 : Courbe TGA du revêtement B.

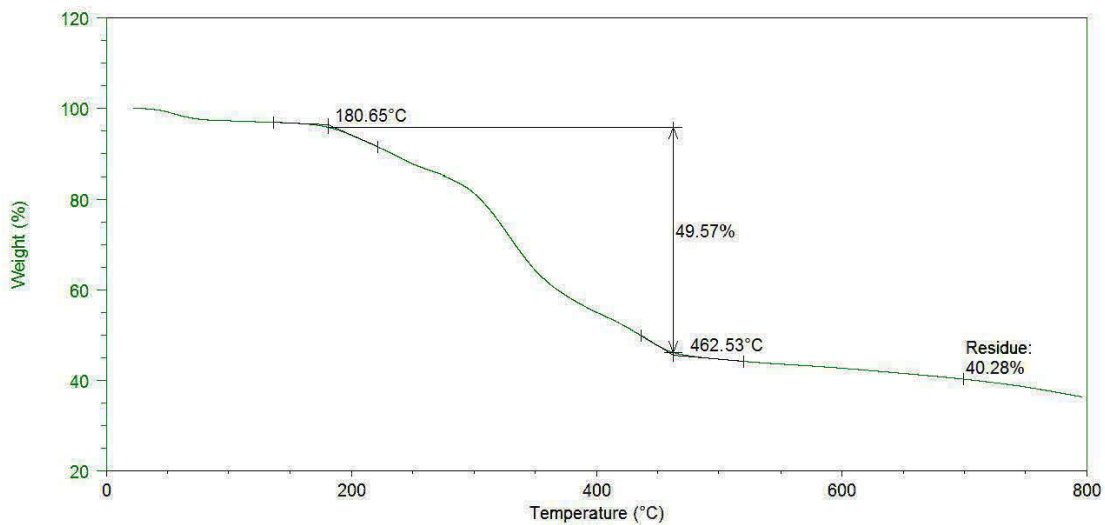


Figure X.3 : Courbe TGA du revêtement C.

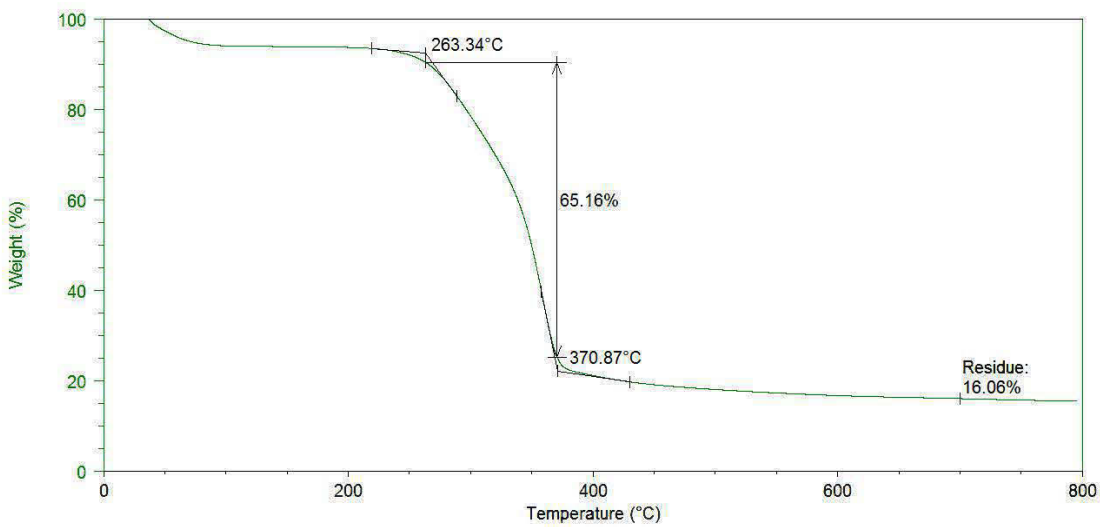


Figure X.4 : Courbe TGA des lamelles non traités.

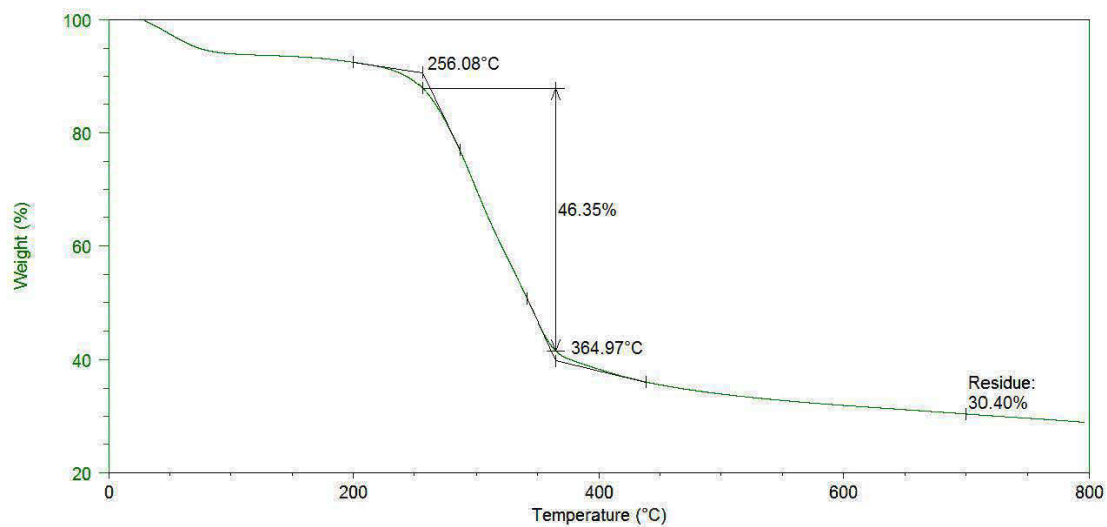


Figure X.5 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement A.

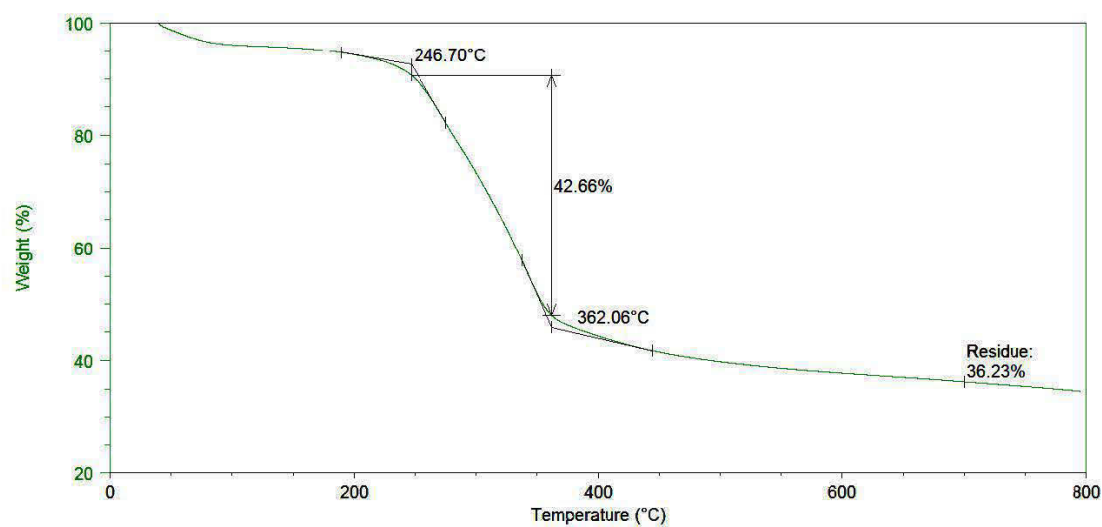


Figure X.6 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 40% de revêtement A.

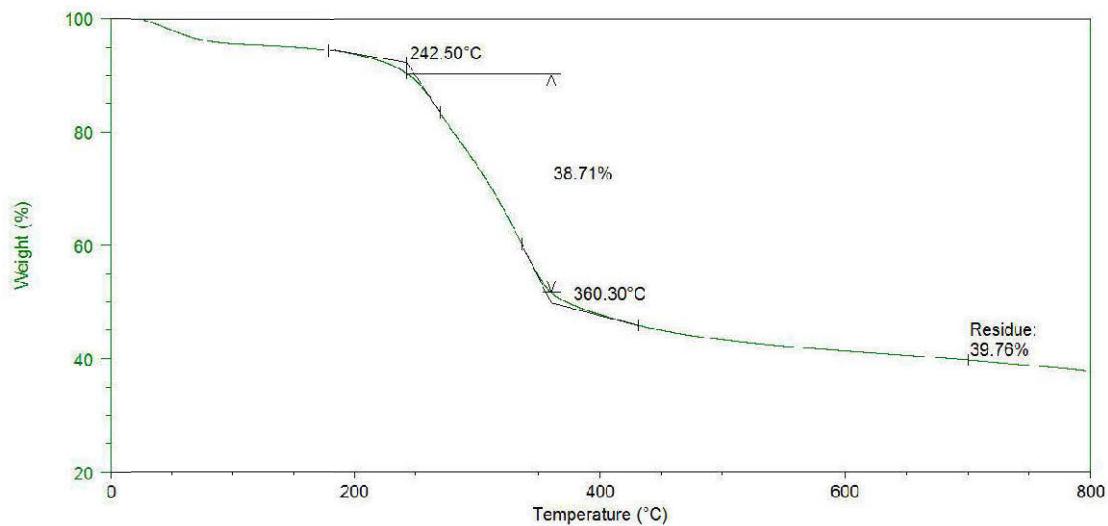


Figure X.7 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement A.

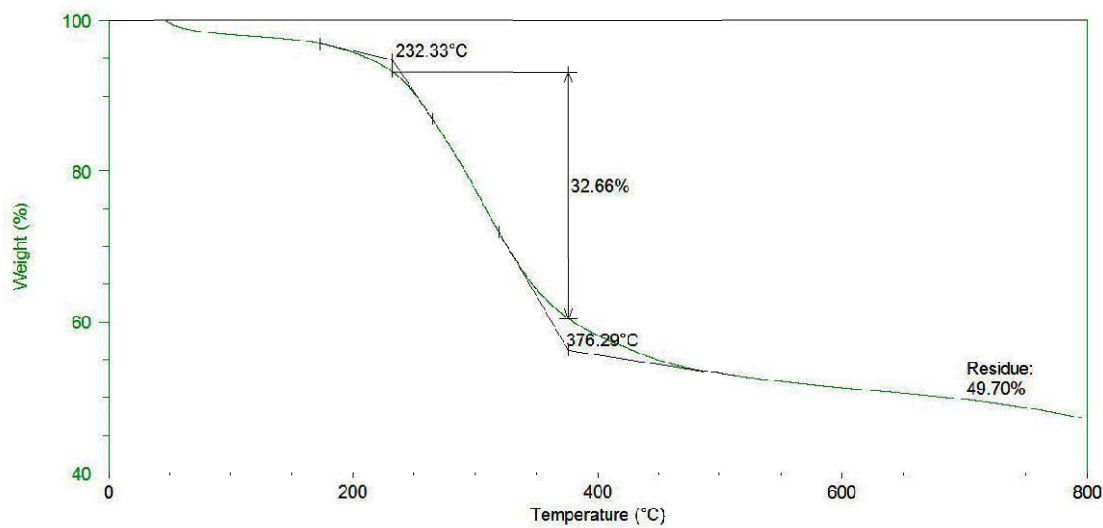


Figure X.8 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 70% de revêtement A.

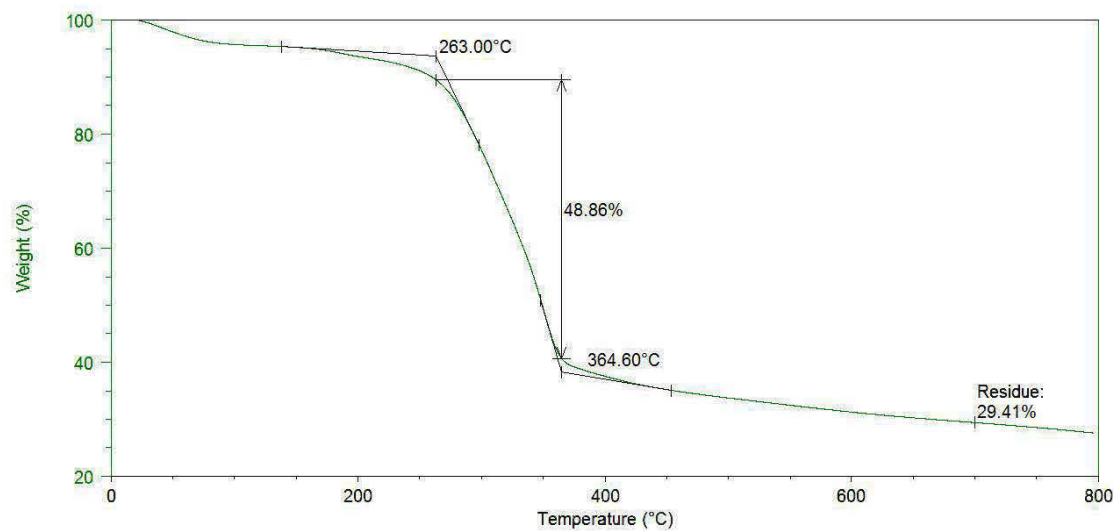


Figure X.9 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement B.

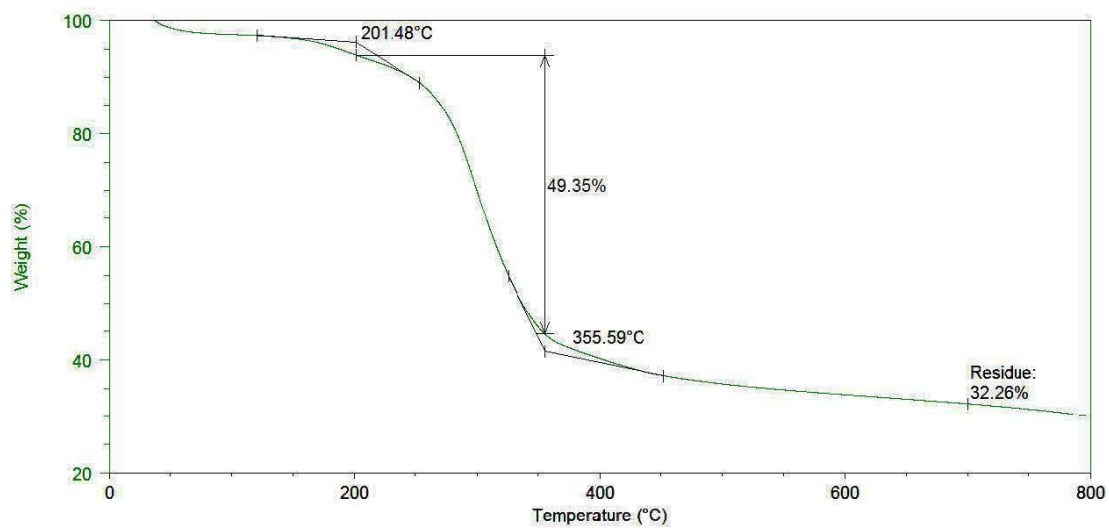


Figure X.10 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement B.

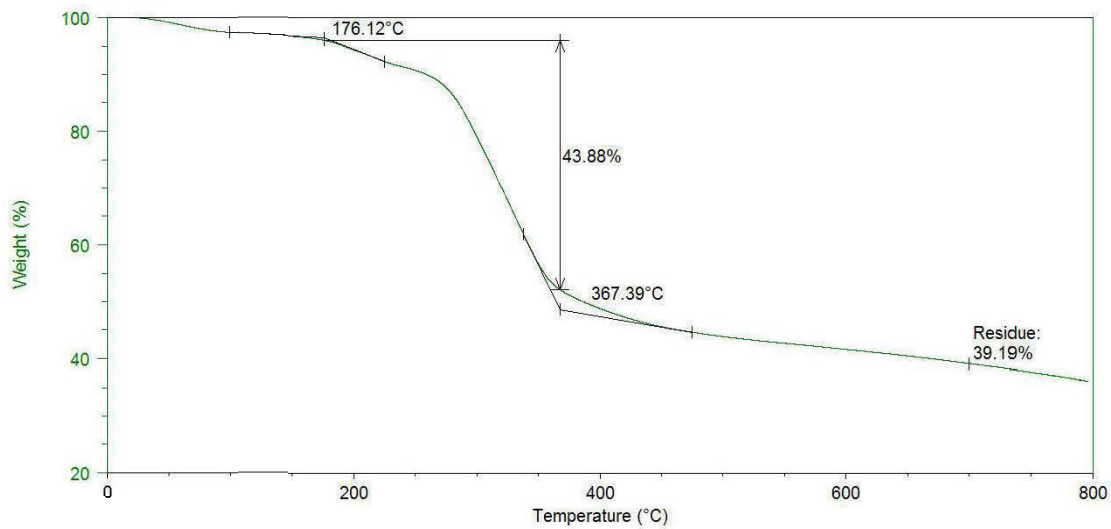


Figure X.11 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 70% de revêtement B.

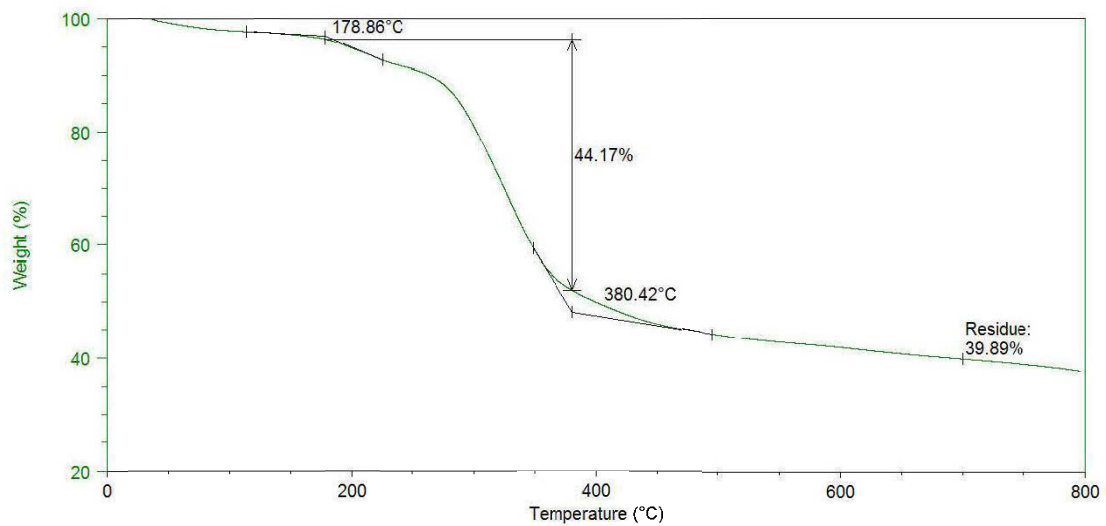


Figure X.12 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 75% de revêtement B.

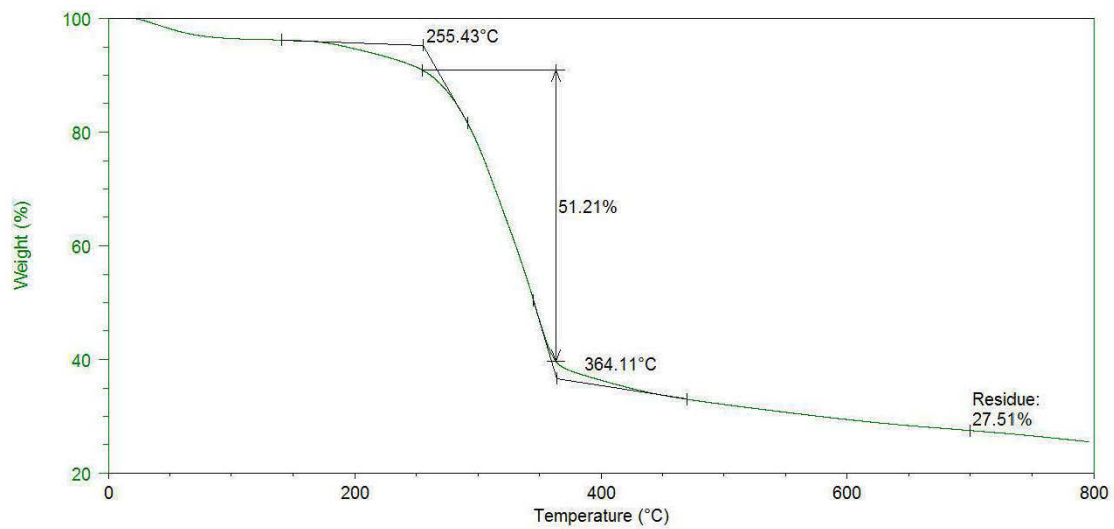


Figure X.13 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 25% de revêtement C.

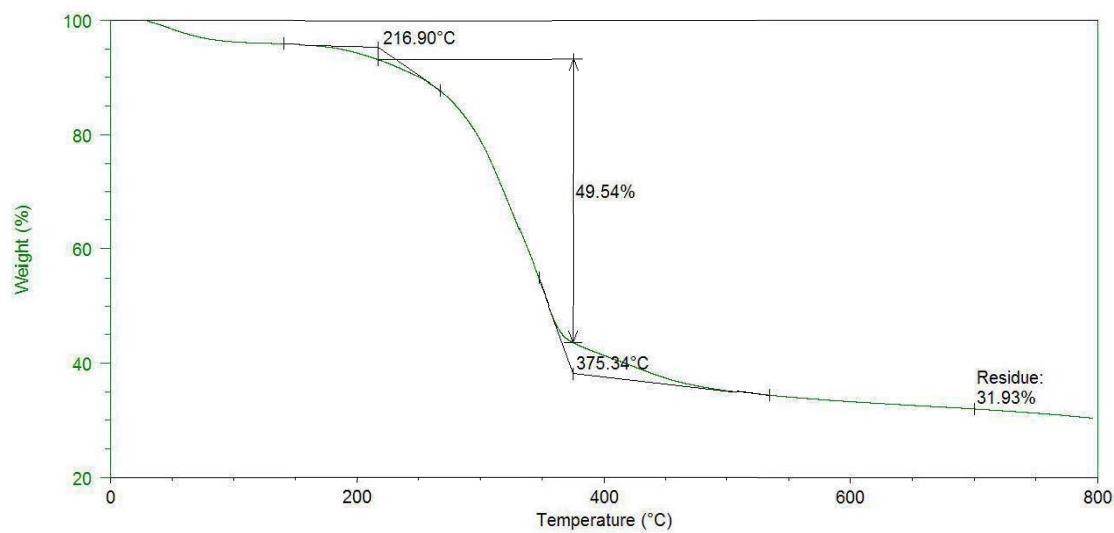


Figure X.14 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 40% de revêtement C.

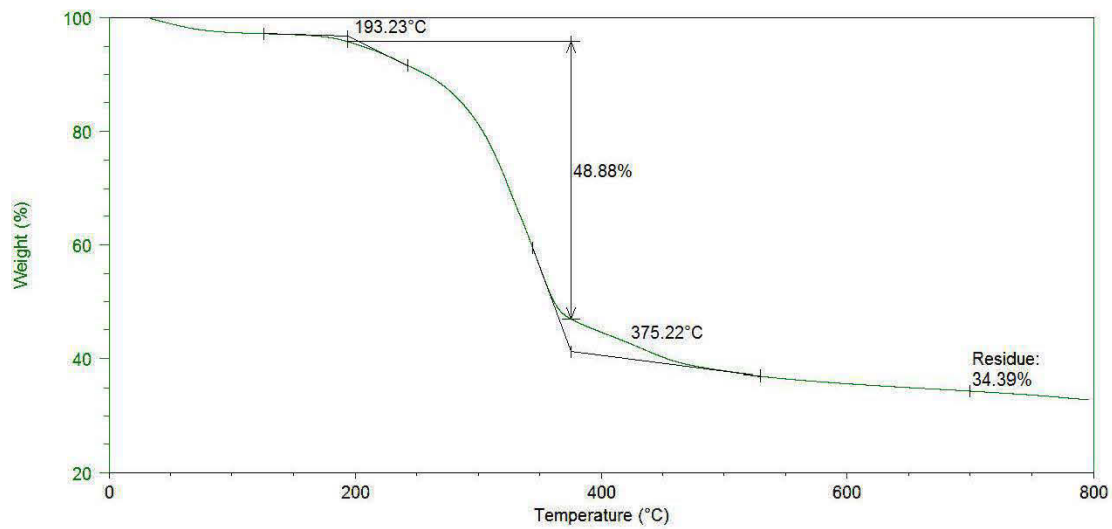


Figure X.15 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 50% de revêtement C.

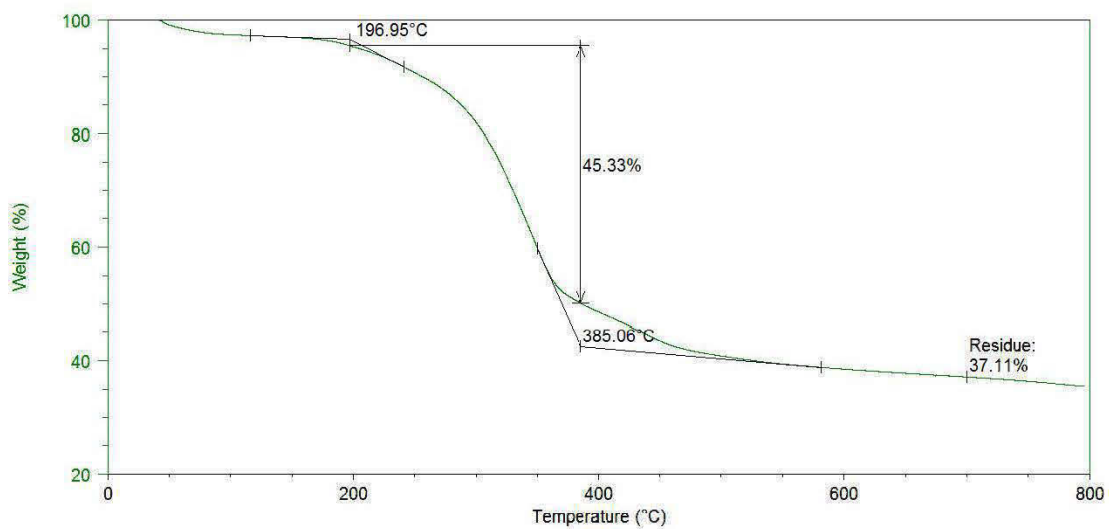


Figure X.16 : Courbe TGA du mélange bois-peinture à 68% de revêtement C.