

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ESSAIS DE FABRICATION DE PANNEAUX DE PARTICULES À BASE DE
BOIS DE CRD ET LEUR INSPECTION PAR IMAGERIE À ULTRASON

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES ET GÉNIE DES MATÉRIAUX
LIGNOCELLULOSIQUES

PAR
MOHAMED JEBRI

DECEMBRE 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAITRISE EN SCIENCES ET GÉNIE DES MATÉRIAUX
LIGNOCELLULOSIQUES (M.Sc.A.)

Direction de recherche :

Simon Barnabé, Ph. D.	UQTR
Prénom et nom	directeur de recherche

Aziz Laghdir, Ph. D.	SEREX
Prénom et nom	codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Simon Barnabé, Ph. D.	UQTR
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

Kokou Adjallé, Ph. D.	INRS-ETE
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

Papa Niokhor Diouf, Ph. D.	SEREX
Prénom et nom	Fonction du membre de jury

Avant-propos

Quel bon vent peut-il amener un ingénieur industriel à suivre un programme de maîtrise en sciences et génie des matériaux lignocellulosiques ? La question qui n'est pas anodine suppose sans doute une réponse tout aussi incongrue : la curiosité. Résultat d'un improbable concours de circonstances, mon cheminement professionnel m'a entraîné dans l'univers du recyclage du bois, avec toutes les propriétés subtiles que recèle ce matériau naturel, vivant et renouvelable.

Effectuer des études supérieures en sciences appliquées est une étape exigeante et chronophage. Elle prend toutefois des allures d'une véritable expérience lorsqu'elle est réalisée en parallèle à un emploi à temps plein. De ce point de vue, ce projet incarne bien l'opportunité de donner une rigueur scientifique à ses idées pour mieux les structurer et juger de leur validité. J'ose alors croire que cette étude exploratoire puisse servir à changer le prisme à travers lequel le bois résiduel est considéré. J'ose également espérer, avoir apporté par l'entremise de cette modeste contribution, ma pierre à l'édifice pour que ce noble matériau regagne ses lettres de noblesse, même à l'état recyclé.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à MM. Simon Barnabé, Ph. D et Aziz Laghdir, Ph. D, respectivement, directeur et co-directeur de ce projet de maîtrise, pour leurs conseils judicieux, leur encadrement continu ainsi que leur disponibilité à répondre à mes interrogations durant la réalisation de ce travail. Un vif remerciement est également adressé à M. Robert Lanouette, Ph. D, qui n'a pas lésiné sur le temps, ni sur la lucidité dans le support qu'il m'avait offert au niveau de l'interprétation statistique des résultats.

L'exécution des expériences de ce projet n'aurait pas été possible sans le concours du personnel du Serex et d'Innofibre, que j'aimerais sincèrement remercier pour leur amabilité et l'accueil qu'ils m'ont réservé. Merci Jean-Philippe, Suzhou, Pape, Bruno, Tommy de votre précieuse collaboration et pour tout le soutien que vous m'avez prodigué.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes très chers collègues et néanmoins amis, Adil Zerhouni et Benoit Bideau de m'avoir orienté au cours de la rédaction de ce mémoire, en gribouillant mes notes de leurs annotations et en posant un œil critique, mais ô combien bienveillant sur toutes les sections de ce document.

Ce projet prend son origine dans la volonté d'une PME trifluvienne spécialisée dans le recyclage et la valorisation des résidus de CRD, qui, dans l'optique de développer son marché, n'a pas manqué de prendre le chemin inusité de la R&D. J'ai nommé BRQ et son audacieux propriétaire, Marc Tremblay qui n'a pas cessé de m'encourager depuis le début du projet. Merci Marc, Merci Nathalie et Merci Line pour votre formidable appui.

L'ajout d'une partie consacrée aux caractérisations par imagerie à ultrasons m'a été suggéré par un anti-conformiste débordant d'imagination. Je voudrais profiter de ces lignes pour le remercier de m'avoir soufflé cette brillante idée. Merci Jean-Pierre Lafond.

Je n'oublierai pas de remercier tous les membres de ma famille, et plus particulièrement mes parents et mon épouse pour leur soutien indéfectible, leur patience et surtout leur grande générosité. Voilà enfin que je vous le reconnais...

Août 2020

Résumé

L'évolution technologique des méthodes de conditionnement et de valorisation du bois recyclé issu du secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) via la spectrométrie proche infrarouge (Near Infra-Red) a permis d'atteindre des niveaux de pureté élevés. Dès lors, un éventail de débouchés à haute valeur ajoutée devient accessible aux déchets de bois de CRD, qui se voient autrement déclasser pour servir de combustible, au même titre que l'écorce, dans les installations de cogénération. Les applications multiples qu'offrent les matériaux obtenus par thermopressage présentent une avenue potentiellement intéressante pour l'emploi des particules de bois recyclé. Cette voie de valorisation peut cibler des marchés de niche où la personnalisation et la fabrication par lots s'érigent en attributs de taille en matière d'éco-responsabilité. Le but étant de prolonger le cycle de vie des ressources lignocellulosiques renouvelables en évitant la voie facile et bon marché de la filière bois-énergie.

Le présent projet de maîtrise se propose alors d'explorer l'aptitude des particules de bois recyclé à être utilisées dans un procédé de mise en forme s'appuyant sur le pressage à chaud. L'idée étant de déterminer l'effet des différents paramètres du programme de pressage sur les propriétés du produit fini. La mise en œuvre de 3 plans d'expérience identiques a permis de statuer sur les facteurs influents pour deux systèmes de résine synthétique, soit la résine phénol-formaldéhyde (PF) et la résine mélamine-urée-formaldéhyde (MUF), ainsi qu'une résine biosourcée à base de tannins.

Dans une optique de contrôle qualité sur une ligne de production à grande échelle, la technique de détection des défauts de délamination par imagerie à ultrasons sans contact a été évaluée pour s'assurer de l'intégrité physique des panneaux sans recourir à des tests destructifs.

Mots Clés : bois de CRD, panneaux de particules, pressage à chaud, résines synthétiques, résines biosourcées, PF, MUF, Tannins, imagerie à ultrasons.

Table des Matières

Avant-propos.....	iii
Remerciements.....	iv
Résumé	v
Table des Matières	vi
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux.....	xvi
Liste des Équations	xviii
Liste des Abréviations.....	xix
Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 - Revue de la littérature	4
2.1 Généralités sur le bois.....	4
2.1.1 Les parties constituantes de l'arbre.....	4
2.1.1.1 Tissus végétaux.....	5
2.1.1.2 Structure du bois	6
2.1.1.2.1 Feuillus.....	6
2.1.1.2.2 Résineux.....	7
2.1.1.3 Constitution chimique du bois	8
2.1.1.4 Structure des fibres du bois.....	9
2.1.1.5 Point de saturation des fibres	10
2.1.2 L'utilisation du bois dans la construction	10
2.1.3 Le bois de CRD.....	11
2.2 Les Centres de tri	12
2.2.1 Centres de tri de première génération	12
2.2.2 Centres de tri de deuxième génération.....	13

2.2.3 Centres de tri de troisième génération	14
2.2.4 Le bois de CRD face aux enjeux du bannissement de l'enfouissement	15
2.2.4.1 Type et intensité de la rivalité entre les firmes du secteur	17
2.2.4.2 Pouvoir de négociation des fournisseurs.....	18
2.2.4.3 Présence de produits substituts	19
2.2.4.4 Menace de nouveaux arrivants.....	20
2.2.4.5 Pouvoir de négociation des clients.....	21
2.2.5 État des lieux sur les volumes et la composition des résidus de CRD au Québec.....	23
2.2.6 Perspectives de valorisation du bois de CRD	26
2.3 Les panneaux de particules	28
2.3.1 Portrait et tendances du marché des panneaux de particules	28
2.3.2 Aperçu général sur les produits composites à base de bois	31
2.3.3 Procédé de fabrication des panneaux de particules :	33
2.3.3.1 Broyage	33
2.3.3.2 Tamisage	34
2.3.3.3 Séchage	35
2.3.3.4 Encollage.....	36
2.3.3.5 Formation de l'ébauche (Feutrage).....	36
2.3.3.6 Pressage.....	37
2.3.3.7 Refroidissement et finition.....	38
2.3.4 Effets des matières premières et des conditions de pressage sur les propriétés des panneaux	39
2.3.4.1 Géométrie des particules.....	40
2.3.4.2 Masse volumique des particules	41
2.3.4.3 Masse volumique du panneau	41
2.3.4.4 Les liants et leur proportion	42
2.3.4.4.1 Urée Formaldéhyde (UF).....	42
2.3.4.4.2 Mélamine-Urée Formaldéhyde (MUF).....	43
2.3.4.4.3 Phénol-Formaldéhyde	44
2.3.4.4.4 Tannins.....	44
2.3.4.5 Proportion de liant dans les panneaux de particules	46
2.3.4.6 Cycle de pressage.....	47

2.3.4.7	La norme ANSI 208.1-2016	51
2.3.4.8	Détection de défauts par imagerie à ultrasons	52
Chapitre 3 - Objectifs		55
Chapitre 4 - Matériels et méthodes		56
4.1	Matériels	56
4.1.1	Particules de bois de CRD	56
4.1.2	Résines, durcisseurs et paraffine.....	57
4.1.2.1	Résine Phénol-Formaldéhyde (PF).....	57
4.1.2.2	Résine Mélamine-Urée-Formaldéhyde (MUF).....	57
4.1.2.3	Résine de Tannins	58
4.1.2.4	Paraffine	58
4.2	Méthodes.....	59
4.2.1	Caractérisation des particules de bois	59
4.2.1.1	Teneur en humidité	59
4.2.1.2	Teneur en cendres	60
4.2.1.3	Distribution granulométrique.....	60
4.2.1.4	Coefficient d'élancement	61
4.2.1.5	Densité apparente après conditionnement thermique	61
4.2.2	Caractérisation des résines	62
4.2.2.1	Viscosité.....	62
4.2.2.2	Temps de gel	62
4.2.3	Caractérisation des durcisseurs et de la paraffine	63
4.2.4	Méthode de calcul des constituants des panneaux	63
4.2.5	Méthode de fabrication des panneaux	66
4.2.5.1	Séchage des particules	66
4.2.5.2	Formulation des résines et encollage	67
4.2.5.3	Feutrage.....	68
4.2.5.4	Pressage.....	69
4.2.5.5	Refroidissement et découpage	69
4.2.6	Méthodes de caractérisation.....	70
4.2.6.1	Balayage par imagerie à ultrasons	70

4.2.6.2	Caractérisation des propriétés mécaniques et physiques	71
4.2.6.3	Plan de découpage des panneaux	71
4.2.6.4	Appareils d'essais mécaniques et physiques.....	72
4.2.7	Plan d'expérience.....	73
Chapitre 5 - Résultats et discussion		76
5.1	Caractérisation physico-chimique des particules de bois	76
5.1.1	Teneurs en humidité et en cendres.....	76
5.1.2	Distribution granulométrique.....	76
5.1.3	Coefficient d'élanement.....	77
5.1.4	Densité apparente.....	78
5.2	Caractérisation des résines.....	78
5.2.1	Viscosité.....	78
5.2.2	Temps de gel.....	79
5.3	Impact des effets significatifs sur les propriétés mécaniques des panneaux	80
5.3.1	Effet des facteurs sur les propriétés mécaniques :	80
5.3.1.1	Modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR)	80
5.3.1.2	Cohésion interne (IB).....	85
5.3.1.3	Dureté Janka.....	87
5.3.2	Discussion sur le poids des effets en fonction des systèmes de résine	89
5.3.2.1	Effet des facteurs sur les propriétés mécaniques	89
5.3.2.2	Effet des facteurs sur les propriétés physiques	92
5.4	Comparaison des trois systèmes de résine au regard de l'ANSI 208.1	94
5.4.1	Panneaux de basse densité	94
5.4.2	Panneaux de moyenne densité	97
5.4.3	Panneaux de haute densité	99
5.4.4	Discussion des performances globales des résines	102
5.5	Résultats du balayage par imagerie à ultrasons sans contact.....	103
5.6	Conclusions partielles	106
Chapitre 6 - Conclusion		107
6.1	Conclusion générale.....	107
6.2	Recommandations.....	108

Chapitre 7 - Bibliographie.....	109
Annexe A – Plan d’expérience de la résine PF	124
Annexe B – Plan d’expérience de la résine MUF	133
Annexe C – Plan d’expérience de la résine tannin.....	142

Liste des Figures

Figure 1 : Parties constituantes de l'arbre [6].....	4
Figure 2 : Méristèmes secondaires du bois [9]	5
Figure 3 : Les plans ligneux [11]	6
Figure 4 : Structure du bois feuillu [12].....	7
Figure 5 : Structure du bois résineux [12].....	7
Figure 6 : Constitution chimique du bois [13]	8
Figure 7 : Composition de la paroi cellulaire [15]	9
Figure 8 : L'eau dans le bois [18].....	10
Figure 9 : Hiérarchie 3RV- E [23]	12
Figure 10 : Principe du tri manuel [25].....	13
Figure 11 : Réflectance et longueur d'ondes des résidus de CRD dans le spectre NIR [29]	15
Figure 12 : Analyse structurelle selon le modèle de Porter [26].....	17
Figure 13 : Capacité de traitement annuelle des centres de tri des résidus de CRD [1] .	24
Figure 14 : Proportions destinées à la valorisation énergétique vs. recyclage [1]	25
Figure 15 : Évolution de la demande des panneaux de particules et du MDF [4]	29
Figure 16 : Exportations de panneaux de particules fabriqués au Canada exportés au marché américain [4].....	29
Figure 17 : Coût de fabrication des panneaux de particules selon la région en Amérique du Nord [4].....	30
Figure 18 : Évolution des prix des panneaux de particules et du MDF [4]	30
Figure 19 : Types de produits de bois composite selon la géométrie de la fibre [41]	32
Figure 20 : Classification des panneaux agglomérés selon Suchsland et Woodson [43]32	

Figure 21 : Vue en coupe du mécanisme d'un broyeur à marteaux [44].....	34
Figure 22 : Systèmes de tamisage dans l'industrie des panneaux de particules [40]	34
Figure 23 : Types de séchoirs à biomasse utilisés dans l'industrie [45].....	35
Figure 24 : Mélangeur à colle à court temps de résidence [46]	36
Figure 25 : Exemple d'un système de feutrage en continu [47]	37
Figure 26 : Étapes du cycle de pressage à chaud [49].....	38
Figure 27 : Refroidisseur à étiole	39
Figure 28 Interactions entre les conditions de pressage, les propriétés des matières premières et les spécifications cibles des panneaux de particules [36].....	40
Figure 29 : Effet de la densité sur le module de rupture (MOR) [52].....	41
Figure 30 : Liaisons mécaniques entre les particules et le liant [56]	42
Figure 31 : Réseau tridimensionnel de l'Urée-Formaldéhyde [59]	43
Figure 32 : Structure des résols de la PF [63]	44
Figure 33 : Évolution chronologique des résines destinées à la fabrication des panneaux [65]	45
Figure 34 : Structure des tannins condensés [70]	45
Figure 35 : Mécanismes de transfert de chaleur au cours du pressage à chaud [80]	48
Figure 36 : Phénomènes de transfert de masse durant le pressage des panneaux [80] ...	50
Figure 37 : Inspection ultrasonore par immersion [90].....	53
Figure 38 : Les modes de lecture A-Scan, B-Scan et C-Scan [94]	54
Figure 39 : Analyse ultrasonore sans contact en mode C-Scan [97].....	54
Figure 40 : Produit fini de BRQ Fibre et Broyure Inc.	56
Figure 41 : Durcisseur de Sulfate d'ammonium utilisé avec la résine MUF.....	57
Figure 42 : Tannin Fintan 737.....	58

Figure 43 : Hexamine de Sigma-Aldrich	58
Figure 44 : Paraffine Norwax 527 de Walker Emulsions	59
Figure 45 : Tamis Ro-Tap	61
Figure 46 : Montage de détermination de la densité apparente	61
Figure 47 : Viscosimètre D-II+Pro (LV)	62
Figure 48 : Le gel mètre Sunshine 22A	63
Figure 49 : Particules de bois placées dans un rack mobile	67
Figure 50 Station de contrôle numérique du séchoir	67
Figure 51 : Préparation de la formulation de la résine à base de tannins – hexamine	67
Figure 52 : Système d'encollage.....	68
Figure 53 : Étapes de feutrage des ébauches.....	68
Figure 54 : Presse chauffante Dieffenbacher ARC-450.....	69
Figure 55 : Refroidissement et découpage des panneaux	69
Figure 56 : Analyseur à ultrasons Ultrason U710x-540i	70
Figure 57 : Étalon de calibration pour l'analyseur à ultrasons	70
Figure 58 : Plan de découpage des panneaux.....	71
Figure 59 : Le test de flexion 3 points pour déterminer le MOE et le MOR, le test de dureté Janka et le test de cohésion interne (IB).....	72
Figure 60 : Dispositif de test du gonflement en épaisseur	73
Figure 61 : Particules de calibre intermédiaire de BRQ	76
Figure 63 : Profil granulométrique des particules de BRQ.....	77
Figure 63 : Effets et interactions sur le MOE avec la résine PF	82
Figure 64 : Effet de la densité sur le MOE avec la résine MUF	82
Figure 65 : Effets de la densité et de la teneur en résine sur le MOE avec les Tannins .	83

Figure 66 : Effet de la densité sur le MOR avec la résine PF	84
Figure 67 : Effet de la densité et de la température sur le MOR avec la résine MUF	84
Figure 68 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le MOR avec la résine MUF	85
Figure 69 : Effets principaux sur la cohésion interne avec la résine PF	86
Figure 70 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le IB avec la résine MUF	86
Figure 71 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le IB avec les Tannins.....	87
Figure 72 : Effets principaux sur le module de dureté avec la résine PF.....	88
Figure 73 : Effet de la densité sur le module de dureté avec la résine MUF	88
Figure 74 : Effets principaux sur la dureté avec les Tannins	89
Figure 75 : Mauvaise répartition de la résine sur les panneaux encollés avec les tannins	92
Figure 76 : Comparaison du MOE des panneaux à basse densité avec la norme ANSI.	95
Figure 77 : Comparaison du MOR des panneaux à basse densité avec la norme ANSI	95
Figure 78 : Comparaison du IB des panneaux à basse densité avec la norme ANSI.....	96
Figure 79 : Comparaison de la dureté des panneaux à basse densité avec la norme ANSI.....	96
Figure 80 : Résultats de gonflement des panneaux de basse densité après 2 et 24h.....	96
Figure 81 : Comparaison du MOE des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI.....	97
Figure 82 : Comparaison du MOR des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI.....	98
Figure 83 : Comparaison du IB des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI.....	98
Figure 84 : Comparaison de la dureté des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI.....	98
Figure 85 : Résultats de gonflement des panneaux de moyenne densité après 2 et 24h.	99

Figure 86 : Comparaison du MOE des panneaux de haute densité avec la norme ANSI.....	100
Figure 87 : Comparaison du MOR des panneaux de haute densité avec la norme ANSI.....	100
Figure 88 : Comparaison du IB des panneaux à haute densité avec la norme ANSI....	100
Figure 89 : Comparaison de la dureté des panneaux de haute densité avec la norme ANSI.....	101
Figure 90 : Résultats de gonflement des panneaux de moyenne densité après 2 et 24h	101
Figure 91 : Balayage en C-Scan du sandwich de calibration.....	104
Figure 92 : Scan d'un panneau délaminé.....	105
Figure 93 : Scan d'un panneau homogène.....	105

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Composition chimique des bois feuillu et résineux [14].....	9
Tableau 2 : Propriétés mécaniques du groupe EPS en comparaison avec d'autres essences de bois [20].....	11
Tableau 3 : Modes de tri, avantages et inconvénients [26].....	14
Tableau 4 : Résumé de l'analyse structurelle [26].....	22
Tableau 5 : Taux d'acheminement des résidus de CRD vers un centre de tri [1].....	24
Tableau 6: Composition des résidus de CRD et emploi dans la valorisation énergétique de chaque matériau [1].....	26
Tableau 7 : Exigences du RAA par rapport aux limites d'émission de particules, de concentration en halogènes et en formaldéhyde [33].....	27
Tableau 8 : Marge de profit des producteurs de panneaux de particules et du MDF au Canada [4].....	31
Tableau 9 : Proportions de résine employées selon leur type dans l'industrie [77].....	46
Tableau 10 : Exigences des différents grades de panneaux de particules selon la norme ANSI 208.1-2016.....	51
Tableau 11 Tamis utilisés dans le Ro-Tap.....	61
Tableau 12 : Propriétés inspectées et normes utilisées.....	71
Tableau 13 : Nombre d'échantillons examinés par test et leurs dimensions.....	72
Tableau 14 : Facteurs et niveaux du plan d'expérience.....	74
Tableau 15 : Plan d'expérience à réaliser par système de résine.....	74
Tableau 16 : Conditions partagées pour toutes les expériences.....	75
Tableau 17 : Teneurs en humidité et en cendres moyennes.....	76
Tableau 18 : Distribution granulométrique des particules.....	77
Tableau 19 : Coefficient d'élancement des 3 sous classes granulométriques supérieures à 5 mm.....	78

Tableau 20 : Viscosité des trois systèmes de résines avant et après ajustement de propriétés.....	78
Tableau 21 : Ajustement des propriétés des résines.....	79
Tableau 22 : Temps de gel des trois systèmes de résine	79
Tableau 23 : Poids des effets sur le MOE avec les 3 systèmes de résine	81
Tableau 24 : Poids des effets sur le MOR avec les trois systèmes de résine	83
Tableau 25 : Poids des effets sur la cohésion interne avec les trois systèmes de résine	85
Tableau 26 : Poids des effets sur la dureté Janka avec les trois systèmes de résine	87
Tableau 27 : Résumé des effets en fonction des trois systèmes de résine sur les propriétés.....	90
Tableau 28 Configurations de pressage des panneaux de basse densité.....	95
Tableau 29 Configuration de pressage des panneaux de moyenne densité	97
Tableau 30 Configurations de pressage des panneaux de haute densité.....	99
Tableau 31 : Numéros d'expériences rencontrant les exigences de la norme ANSI.....	102
Tableau 32 : Configuration de l'analyseur à ultrasons après calibration.....	104

Liste des Équations

Eq 2.1 : <i>Coefficient d'élanement</i>	40
Eq 2.2 : <i>Ratio de compression</i>	41
Eq 2.3 : <i>Loi de Fourier</i>	47
Eq 2.4 : <i>Loi de Newton</i>	48
Eq 2.5 : <i>Loi de Darcy</i>	49
Eq 2.6 : <i>Loi de Fick's</i>	49
Eq 4.1 : <i>Teneur en humidité</i>	60
Eq 4.2 : <i>Teneur en cendres</i>	60
Eq 4.3 : <i>Masse humide panneau</i>	63
Eq 4.4 : <i>Masse humide panneau</i>	64
Eq 4.5 : <i>Humidité du panneau</i>	64
Eq 4.6 : <i>Humidité du panneau</i>	64
Eq 4.7 : <i>Humidité des particules</i>	65
Eq 4.8 : <i>Teneur en liant</i>	65
Eq 4.9 : <i>Teneur en cire</i>	65
Eq 4.10 : <i>Teneur en humidité du lian</i>	65
Eq 4.11 : <i>Masse totale</i>	66
Eq 4.12 : <i>Masse totale</i>	66
Eq 5.1 : <i>Modèle prédictif MOE PF</i>	81
Eq 5.2 : <i>Modèle prédictif MOE MUF</i>	81
Eq 5.3 : <i>Modèle prédictif MOE Tannins</i>	81

Liste des Abréviations

3RV-E	Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation – Élimination
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
CCTT	Centre Collégial de Transfert de Technologie
CRD	Construction, Rénovation, Démolition
CRIQ	Centre de Recherche Industrielle du Québec
EN	European Norm
EPS	Épinette – Pin – Sapin
GES	Gaz à Effet de Serre
IB	Internal Bond (cohésion interne)
ICI	Industries, Commerces et Institutions
LET	Lieu d'Enfouissement Technique
MDF	Medium Density Fiberboard
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MOE	Module d'élasticité
MOR	Module de rupture
MUF	Mélamine-Urée-Formaldéhyde
NIR	Near Infra-Red (proche infra-rouge)
PF	Phénol-Formaldéhyde
PSF	Point de Saturation des Fibres
QWEB	Quebec Wood Export Bureau (Bureau de promotion des produits du bois du Québec)
RAA	Règlement sur l'Assainissement de l'Atmosphère
Recyc-Qc	Société québécoise de récupération et de recyclage
REIMR	Règlement sur l'Enfouissement et l'Incinération de Matières Résiduelles
TOF	Time Of Flight (temps de vol)
TS	Thickness Swelling (gonflement en épaisseur)
VIS	Visible
XRF - XRT	X-Ray Fluorescence, X-Ray Transmission

Chapitre 1 - Introduction

Le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) génère chaque année d'importants volumes de résidus à l'échelle provinciale. Dans son Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles, Recyc-Québec estime à 2 986 000 tonnes les quantités de matières découlant de ce gisement. Or, le taux d'acheminement de ces résidus vers les centres de tri continue d'enregistrer en 2018 un niveau peu reluisant de 59.6 % alors même qu'il s'élevait à 63.1 % en 2015 [1]. Autant dire que l'option de l'élimination dans les lieux d'enfouissement technique (LET) est encore préférée à celle de la récupération pour pas moins de 1 205 000 tonnes à l'heure où les politiques gouvernementales n'ont jamais été aussi focalisées sur les questions de l'économie verte et du développement durable.

Les résidus de CRD sont essentiellement composés de bois (52.7%), d'agrégats (26.3 %), de métaux (8.1 %), de bardeaux d'asphalte (5.4 %) ainsi que d'autres matériaux divers utilisés dans la construction comme le gypse, le carton, le plastique, le polystyrène expansé et le verre à de plus faibles proportions [1]. Malgré son fort potentiel théorique de recyclage et de réemploi, le bois de CRD est utilisé principalement comme combustible dans les installations de cogénération. Ainsi, sur les 295 000 tonnes du bois issu des centres de tri, 211 000 tonnes, soit 71.52 % ont été destinés à la valorisation énergétique [1]. Cette situation confère aux papetières et aux utilisateurs de la biomasse résiduelle pour des fins énergétiques un pouvoir de monopsonne empêchant l'émergence d'une diversification créatrice de valeur.

De plus, le marché du bois de CRD au Québec, peu structuré, rencontre des difficultés endémiques à percer dans des débouchés à haute valeur ajoutée en raison du faible intérêt porté par les recycleurs à la notion de la qualité. Dans un rapport présenté par la firme-conseil SECOR à Recyc-Québec en 2011, le cabinet émet parmi ses recommandations l'idée d'engager une réflexion visant à étendre le champ d'utilisation du bois de CRD aux panneaux de particules, à l'ensemencement hydraulique, aux absorbants industriels et aux briquettes de biocharbon pour n'en citer que les plus éminentes applications en termes de valeur ajoutée [2].

Aujourd'hui, la modification du Règlement sur l'Assainissement de l'Atmosphère (RAA) entrée en vigueur à compter du 30 juin 2016 au regard de la combustion des résidus de bois a permis d'exercer un nivellement par le haut de la qualité du bois de CRD vis-à-vis de son débouché historique [3]. Le resserrement des écrous réglementaires conjugué à la maturité technologique des infrastructures de tri et de séparation portera invariablement l'industrie vers une nouvelle dynamique orientée sur la qualité du bois de CRD issu des centres de tri. Et permettra par le fait même d'emprunter des voies de valorisation novatrices, plus rentables et moins cycliques que la valorisation énergétique.

Le marché des panneaux de particules est relativement stable depuis 2016. Selon un rapport du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) publié en 2018, la consommation va enregistrer une progression annuelle de 1.5 % de 2022 à 2032 [4]. Le taux de change du dollar canadien favorise l'exportation des panneaux de particules aux États-Unis et cette tendance poursuivra son évolution à la hausse durant les prochaines années. Les prévisions indiquent que près de 0.8 milliards de pieds carrés seront exportés aux États-Unis en 2022 comparativement à un niveau d'exportation de 0.62 milliards de pieds carrés en 2018 [4].

Une étude sur les débouchés des rebuts de bois de CRD en dehors du Québec, réalisée en 2011 par le Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ). Celle-ci a recensé un certain nombre de voies de valorisation pratiquées actuellement aux États-Unis et dans les pays de l'Europe de l'Ouest [5]. Il en ressort une relation évidente entre le bois de CRD et l'industrie des panneaux de particules. L'un étant un résidu du secteur de la construction, et l'autre, un produit largement convoité par la même filière.

Toujours est-il que la validation du potentiel de valorisation du bois de CRD demeure tributaire de plusieurs préalables, à commencer par la conformité aux standards de la norme ANSI 208.1-2016 et l'identification des paramètres clés rattachés au procédé de pressage à chaud permettant l'atteinte de ses exigences. L'objectif de cette étude est de vérifier si le bois de CRD se prête adéquatement au procédé de fabrication des panneaux de particules, et d'identifier au moyen de trois plans d'expériences factoriels fractionnaires l'effet de la proportion de résine, la température et la durée de pressage ainsi que la densité sur les principales propriétés mécaniques et physiques, à savoir le module d'élasticité

(MOE), le module de rupture (MOR), la cohésion interne (IB), la dureté Janka et le gonflement en épaisseur (TS). Un banc d'essai comparatif des systèmes de résines commerciales de type Phénol-formaldéhyde (PF), Mélamine Urée-Formaldéhyde (MUF) et tannins a été mis en œuvre à travers les plans d'expérience pour mieux comprendre leur interaction avec le cycle de pressage. Enfin, la technique d'identification de défauts par imagerie à ultrasons sans contact a été testée pour évaluer sa capacité de détection des problèmes de délamination de façon non destructive.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Généralités sur le bois

2.1.1 Les parties constituantes de l'arbre

L'arbre comporte trois constituants essentiels, soit le tronc, les racines et le houppier (figure 1). Le tronc supporte mécaniquement l'arbre, stocke ses éléments nutritifs et véhicule l'eau des racines vers les feuilles. Quant aux racines, elles servent à absorber l'eau et les nutriments indispensables à la photosynthèse des carbohydrates. Enfin, le houppier comprend les feuilles (ou aiguilles dans le cas des conifères) qui produisent les éléments nutritifs nécessaires à la croissance de l'arbre par le mécanisme de la photosynthèse et les branches qui permettent de véhiculer ces nutriments [6].

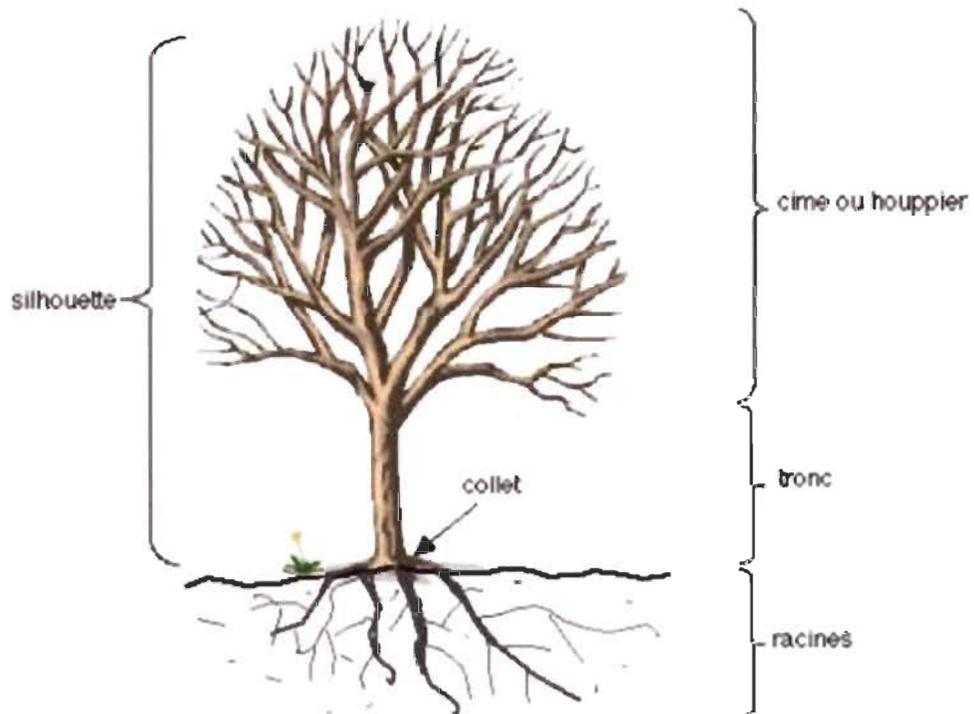


Figure 1 : Parties constituantes de l'arbre [6]

2.1.1.1 Tissus végétaux

Les tissus végétaux du bois se forment dans les méristèmes primaires et secondaires [7]. Le méristème primaire se situe aux axes de la partie souterraine et aérienne de l'arbre et aide à former le xylème et le phloème primaires [7]. Quant aux méristèmes secondaires, ils sont constitués de plusieurs couches dont la croissance aide à former des cernes annuels protégés par l'écorce (figure 2). Ils forment des tissus matures résultant des méristèmes primaires [7]. On peut les recenser comme suit :

- **Bois de cœur (Duramen) :** Il s'agit d'une couche de bois dur située dans la partie centrale du bois et incorpore des cellules mortes [7]. Sa couleur est foncée.
- **Aubier :** Cette partie comporte les cernes annuels récents, les cellules qu'elle contient sont en activité et servent à la circulation de la sève brute composée d'eau et de minéraux nutritifs vers les feuilles via des tissus conducteurs [7]. Sa couleur est plus claire que celle du duramen.
- **Cambium :** Le cambium est une assise génératrice libéro-ligneuse [7]. Il est à l'origine de la formation du liber et de l'aubier ce qui fait de lui un tissu de croissance qui transporte la sève brute dans l'arbre et accroît son diamètre.
- **Liber :** Le liber est formé de tissus conducteurs séparant l'écorce du cambium. Il permet la conduction de la sève depuis les feuilles vers l'intérieur de l'arbre [7].
- **Écorce :** Composée de tissus protecteurs, l'écorce enveloppe l'arbre et la protège des intempéries, insectes et champignons [8].

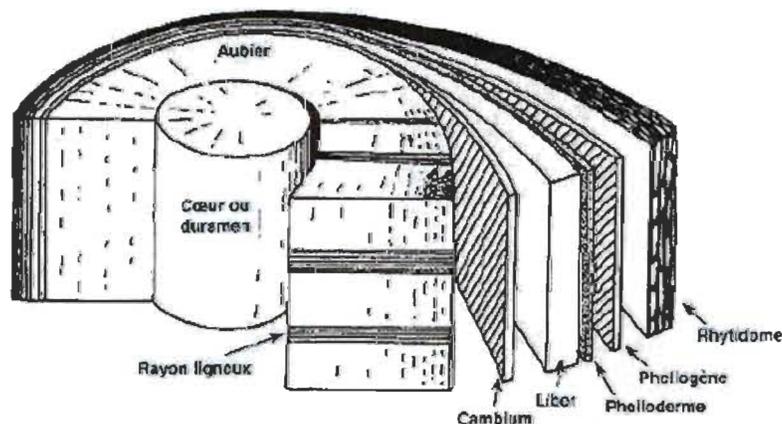


Figure 2 : Méristèmes secondaires du bois [9]

2.1.1.2 Structure du bois

Le bois est un matériau hétérogène et anisotrope. Ses propriétés et sa structure changent en fonction de l'axe de coupe et la direction des fibres [10]. On distingue les trois (3) sections du bois ainsi (figure 3):

- Section transversale : correspond à une coupe perpendiculaire à l'axe de l'arbre.
- Section radiale : la coupe est perpendiculaire aux cernes annuels.
- Section tangentielle : disposée parallèlement aux cernes annuels.

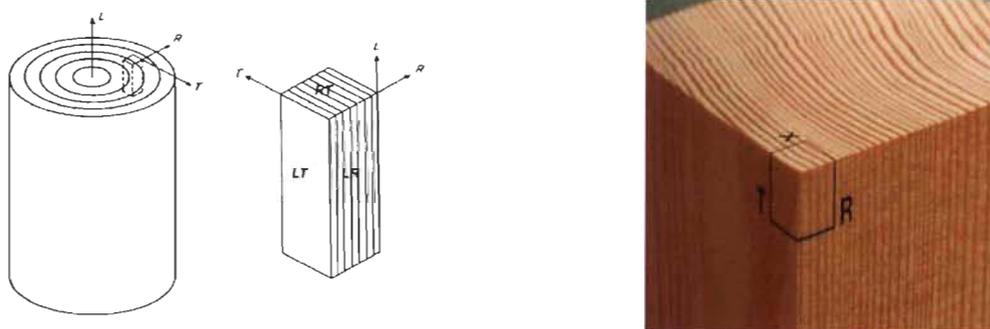


Figure 3 : Les plans ligneux [11]

On reconnaît deux familles de bois soit les feuillus et les résineux, également appelées conifères. Chaque type possède sa propre structure, celle des résineux est simple et se distingue par le fait qu'elle ne possède pas de cellules spécialisées pour la conduction de la sève brute, tandis que la structure des feuillus est plus complexe et comprend des éléments de vaisseaux destinés au transport de la sève brute [10]. Selon le plan de coupe voici les types de cellules que comprend chaque famille de bois et leur fonction :

2.1.1.2.1 Feuillus

Les cellules longitudinales des feuillus contiennent des éléments de vaisseaux pour la circulation de la sève brute, des fibres et des trachéides pour assurer le support mécanique ainsi que des parenchymes faisant office de réservoir des substances nutritives (figure 4). Quant aux cellules transversales, elles se composent essentiellement de rayons de parenchymes qui servent à conserver et distribuer les hydrates de carbone [10]. Les rayons prennent la forme de cellules couchées ou dressées.

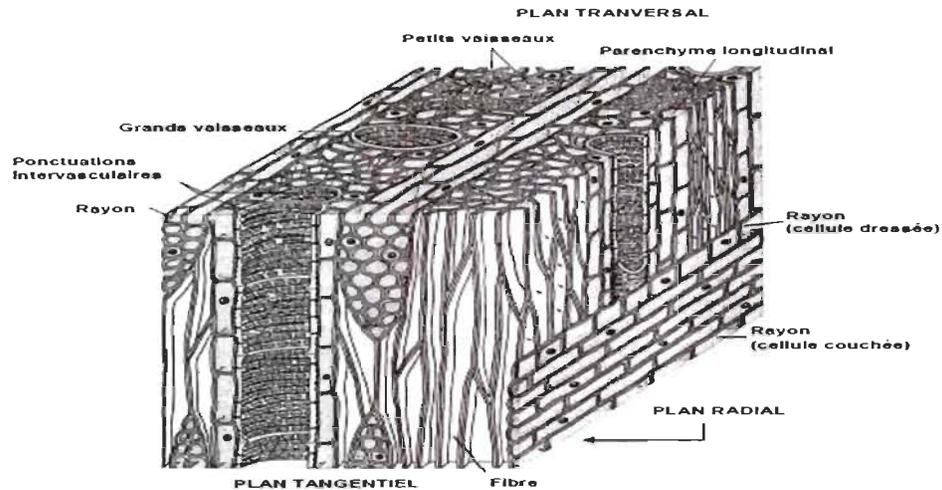


Figure 4 : Structure du bois feuillu [12]

2.1.1.2.2 Résineux

En direction longitudinale, les résineux contiennent des trachéides qui représentent plus de 90 % du volume du bois, elles ont deux principales fonctions, soit le support mécanique et le transport de la sève brute. Les parenchymes longitudinaux dans cette direction représentent des tissus de réserve. Sur le plan transversal, pour le cas de certaines espèces, on identifie des trachéides qui aident à la circulation de la sève [10]. Le bois résineux contient des canaux résinifères dans les directions longitudinale et transversale qui sont des cavités intercellulaires (figure 5).

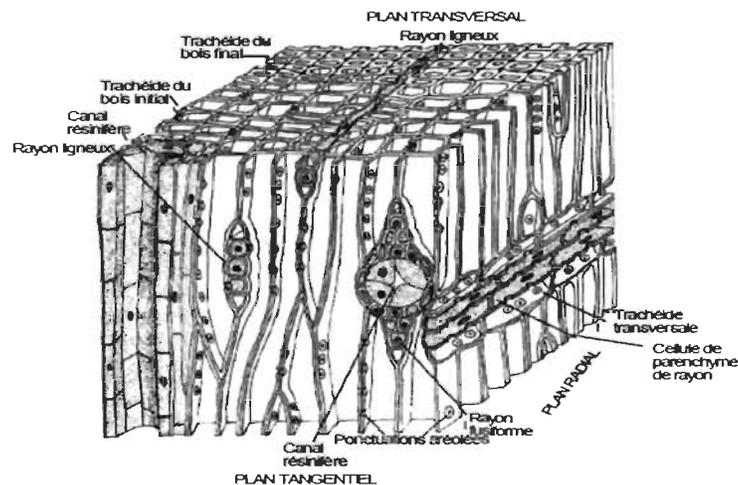


Figure 5 : Structure du bois résineux [12]

2.1.1.3 Constitution chimique du bois

Le bois est composé de quatre éléments principaux qui forment des macromolécules constituant ses parois cellulaires [7]. Les constituants élémentaires du bois sont :

- Le carbone à 50 %
- L'oxygène à 43 %
- L'hydrogène à 6 %
- L'azote à 0.5 %

Ces constituants varient selon les essences et sont complétés par des éléments minéraux comme le calcium, potassium, magnésium, carbonates, sulfates, silicates et phosphates.

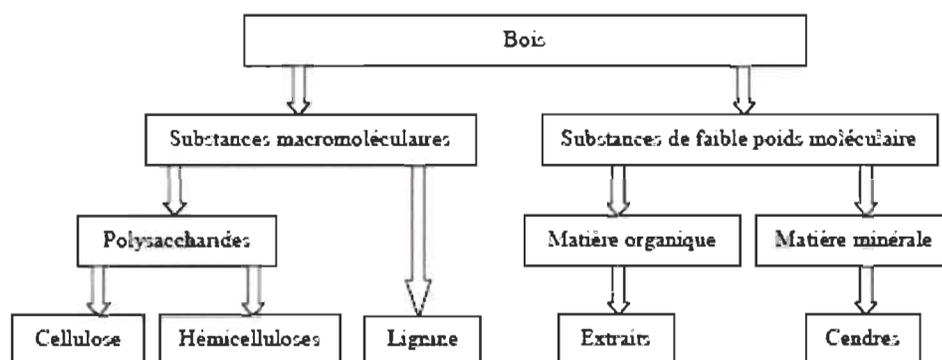


Figure 6 : Constitution chimique du bois [13]

Comme l'illustre la figure 6, les macromolécules qui forment la paroi cellulaire sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Elles représentent 97 à 99 % du poids du bois, contrairement aux minéraux et autres matières extractibles qui ne sont présentes qu'à de faibles proportions [7]. Le tableau 1 rapporte que la proportion de la cellulose est située en général entre 40 et 50 %, l'hémicellulose de 5 à 35 %, la lignine de 7 à 35 % alors que les extractibles culminent à 5 %.

Tableau 1 : Composition chimique des bois feuillu et résineux [14]

Essence	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Autres
Résineux	40-50	20	20-35	1-5
Feuillus	40-50	5-35	7-35	1-5

2.1.1.4 Structure des fibres du bois

Les fibres de bois se composent à l'échelle microscopique de plusieurs cellules structurées en nid d'abeilles sous forme de couches constituées d'une lamelle moyenne, une paroi primaire et une paroi secondaire subdivisée à son tour en une couche externe, une couche centrale et une couche interne [7]. La lamelle moyenne assure la liaison des cellules pour former des tissus et est constituée de lignine à 90 %, son épaisseur est de l'ordre de 1 à 4 μm [7]. En ce qui a trait à la paroi primaire, elle contient de la cellulose et de l'hémicellulose liées par des pectines, auxquelles s'ajoute de la lignine durant sa phase de développement. Son rôle consiste à renforcer la division cellulaire et à lui conférer de l'élasticité et de la plasticité pour assurer sa croissance [7]. Son épaisseur est estimée à 0.1 μm . Enfin, la paroi secondaire a la même composition de la paroi primaire et se forme quand cette dernière termine sa croissance (figure 7). Composée de trois couches, la première appelée couche externe est mince et a une épaisseur de 1 μm , la couche centrale est plus épaisse et mesure entre 1 à 10 μm , tandis que la couche interne est aussi mince que la couche externe avec une épaisseur de 1 μm .

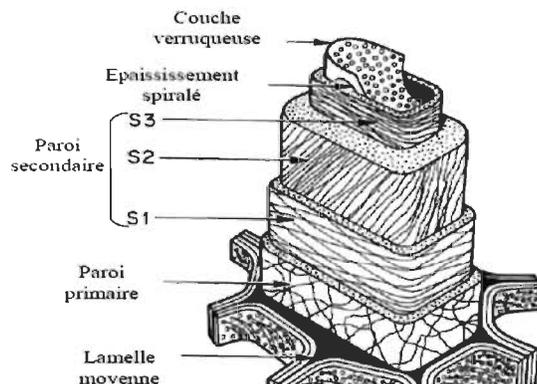


Figure 7 : Composition de la paroi cellulaire [15]

2.1.1.5 Point de saturation des fibres

Faisant partie d'une catégorie de matériaux dits hygroscopiques, le bois montre une certaine sensibilité aux conditions ambiantes de son milieu de croissance. Des facteurs comme l'humidité relative et la température ont ainsi un effet sur son état d'équilibre induit par le mécanisme de sorption. La littérature mentionne que le point de saturation des fibres (PSF) se situe autour de 25 – 30 % de teneur en humidité. L'eau contenue dans le bois se décline en deux principales formes [16] (figure 8):

- L'eau libre : Aussi appelée eau capillaire, elle se loge dans les parois cellulaires et les lumens. Facile à extraire du bois par le biais du ressuyage, son niveau est influencé par la pression de Laplace. Elle représente la proportion de teneur en eau excédant le point de saturation des fibres.
- L'eau liée : Elle représente la proportion d'eau inférieure au point de saturation des fibres. Présente à l'intérieur des parois cellulaires, elle prend place dans des sites de sorption situés sur les macromolécules d'hémicellulose, de cellulose et de lignine [17]. Son extraction, plus lente, conduit à une variation dimensionnelle du bois et n'est possible que sous forme de vapeur par le biais d'un procédé de séchage.

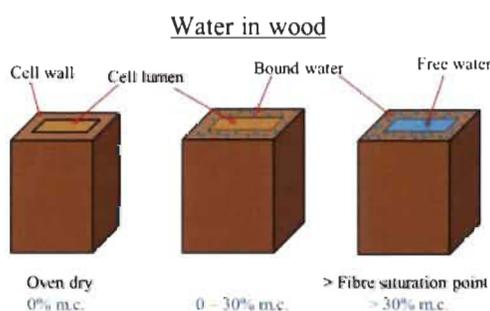


Figure 8 : L'eau dans le bois [18]

2.1.2 L'utilisation du bois dans la construction

L'affinité entre le matériau bois et le domaine de la construction est ancestrale. Que ce soit pour ses excellentes performances mécaniques, sa légèreté, son pouvoir isolant phonique et thermique ou encore la facilité de sa mise en forme, le recours au bois dans le

secteur du bâtiment présente une alternative écoresponsable et sans compromis au chapitre de la qualité comparativement aux matériaux analogues de sources minérales. De nos jours, on fait appel au bois dans les éléments de structure comme les charpentes, l'ossature, les fermes de toit (truss), les murs, les poutrelles mais aussi pour les articles d'ameublement (comptoir et caissons de cuisine, chaises, tables, portes etc.). Le bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB) précise que le bois utilisé dans les matériaux de construction provient d'essences résineuses du groupe estampillé EPS, faisant la part belle à l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier [19] (tableau 2).

Tableau 2 : Propriétés mécaniques du groupe EPS en comparaison avec d'autres essences de bois [20]

	Groupe EPS	Bois blanc européen	Bois rouge européen	Pin jaune du Sud	Sapin de Douglas	Pin Ponderosa	Peuplier faux-tremble
Densité (kg/m ³)	420 ¹	340 ³	420 ³	470 ³	450 ²	438 ²	380 ²
Résistance de flexion (séché au four) MOR (MPa)	78 ²	67 ³	84 ³	90 ³	88 ²	73 ²	68 ²
Module d'élasticité MOE (MPa)	10 500 ²	9500 ³	10 500 ³	12 000 ³	13 500 ²	9500 ²	11 200 ²
Dureté Janka (N)	2 430 ²	1 910 ³	2 780 ³	3 070 ³	2 990 ²	2 640 ²	2 140 ²
Retrati au séchage	11 % ²	11 % ³	12 % ³	12 % ³	12 % ²	10,5 % ²	12 % ²

2.1.3 Le bois de CRD

En pratique, la gestion des résidus de CRD répond à une hiérarchie axée, par ordre de priorité, sur la réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation et à défaut, l'élimination désignée par l'acronyme (3RV-E) (figure 9). Ce principe prend son origine de la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008* [21]. Précisément, la réduction à la source et le réemploi reposent sur des préceptes d'écogestion de chantiers plutôt liés à des règles comme l'écoconception et l'emploi d'écomatériaux durant les phases de planification, de construction et d'entretien des bâtiments ou encore le recours à la déconstruction sélective lorsque ces derniers atteignent la fin de leur cycle de vie [22].

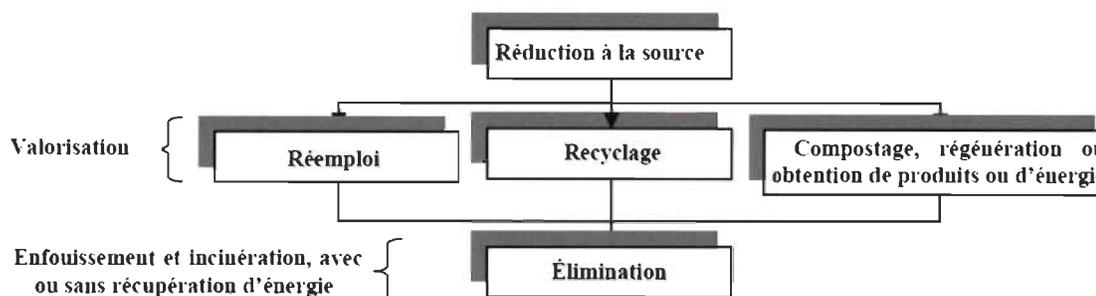


Figure 9 : Hiérarchie 3RV- E [23]

Le recyclage, quant à lui propose une voie de récupération autrement plus mécanisée, car nécessitant des étapes de conditionnement et de transformation destinées à réintroduire les résidus de CRD dans le circuit marchand. Les centres de tri disséminés dans la province s’inscrivent dans cette logique ayant pour but de conférer une valeur ajoutée aux différents matériaux récoltés en chantier. L’industrie du recyclage des débris de CRD a évolué en trois temps, balisant ainsi à chaque jalon un nouveau degré de maturité technologique et de sophistication opérationnelle toujours plus tournés sur la cadence de traitement et la qualité des extrants. Dès lors, on distingue trois générations de centres de tri de CRD pouvant être décrits comme suit :

2.2 Les Centres de tri

2.2.1 Centres de tri de première génération

Cette génération se caractérise par un faible niveau de mécanisation. Les sites appartenant à cette catégorie abritent des opérations s’appuyant sur un tri manuel sommaire, dont le but est limité à l’extraction des matériaux pouvant présenter une valeur de revente. Ainsi, les conteneurs reçus dans les aires d’entreposage généralement constituées de dalles en béton sont scrutés par des employés en charge de classer leur contenu dans d’autres conteneurs attribués en fonction des types de produits recherchés. Une fois séparées, les matières sélectionnées (bois, métaux ferreux et non ferreux, béton, etc.) prennent le chemin vers leurs utilisateurs potentiels (sites de concassage, fonderies, usines de cogénération etc.) pour subir d’autres étapes de transformation avant d’être réemployées [24]. La nature des opérations de cette génération de centres de tri est

marquée par un rendement limité (30 à 50 %). Leur niveau de mécanisation rudimentaire fait que leur modèle d'affaire s'apparente davantage à celui des postes de transbordement plutôt qu'à de véritables centres de tri [24]. Actuellement, les exigences du marché et la concurrence féroce dans le secteur ont mis en échec ce modèle de gestion. D'ailleurs, les acteurs de la filière sont obligés de moderniser leurs installations pour en assurer la survie.

2.2.2 Centres de tri de deuxième génération

La fin des années 1990 a marqué le début de mécanisation des centres de tri. Cette transition a permis d'augmenter leur capacité de traitement et de séparer un plus large éventail d'intrants [24]. L'ère de mécanisation s'est concrètement appuyée sur l'introduction d'un certain nombre de processus permettant le tri des résidus de CRD selon leurs caractéristiques physiques et intrinsèques (figure 10). Plusieurs étapes sont nécessaires à la production du bois de CRD. La séquence de traitement usuelle d'un centre de tri de deuxième génération se compose d'un enchaînement d'opérations tantôt intramuros, tantôt à ciel ouvert. Leur aboutissement s'en trouve donc fortement conditionné par les facteurs météorologiques ambiants.

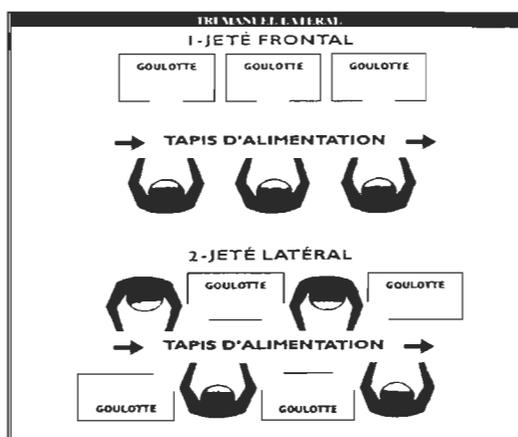


Figure 10 : Principe du tri manuel [25]

Les résidus de CRD d'abord entreposés sur une surface étanche sont alimentés par le biais d'une excavatrice dans un système de criblage primaire permettant de séquestrer la fraction fine inférieure à 2 pouces. Les fragments supérieurs à cette dimension sont ensuite dirigés vers une table de tri dévolue à l'identification et au retrait manuel des matériaux dans les goulottes qui leur sont assignées. Dans certains cas, un séparateur

magnétique est installé en amont de l'étape de tri pour capter les métaux ferreux. Enfin, le bois préalablement trié est acheminé vers un équipement de broyage pour subir un fractionnement mécanique à une granulométrie donnée. Selon les débouchés visés et la taille des volumes traités, les postes de tri peuvent être aménagés pour faire du tri positif ou négatif : le premier étant basé sur le retrait des matériaux valorisables présents dans le flux, alors que le deuxième principe consiste à prélever les impuretés de la ligne laissant les matériaux d'intérêt circuler sur la table de tri. Chaque modèle comporte des avantages et des inconvénients. Le tri positif sacrifie la cadence de traitement sur l'autel de la qualité alors que le tri négatif s'effectue selon la logique inverse (tableau 3).

Tableau 3 : Modes de tri, avantages et inconvénients [26]

Type	Vitesse	
	Basse	Rapide
Positif	Qualité +++ Productivité ++	Qualité +++ Productivité +
Négatif	Qualité ++ Productivité +	Qualité + Productivité ++

2.2.3 Centres de tri de troisième génération

L'émergence de solutions de tri automatisé et la commercialisation de procédés de séparation à la fine pointe de la technologie ont donné naissance à la troisième génération des centres de tri au milieu des années 2000 [24]. Plus exactement, des équipements de séparation basée sur la forme et la densité à l'instar des séparateurs aérauliques et balistiques ont permis de mieux ségréguer les matières inertes (brique, béton, roches, vitre) du flux, et les corps dits creux (boîtes de conserves, cannettes de boisson, etc.) des corps plats (planches de bois, carton, etc.) [27]. Ces opérations de conditionnement visent à optimiser la qualité de tri désormais effectuée par des têtes de lecture optique ayant la capacité d'identifier la signature spectrale des matériaux à valoriser. Plusieurs technologies de tri optique autrefois réservées à un usage en laboratoire sont maintenant maîtrisées et déployées en usine. A titre d'exemple, on peut citer les rayons X par transmission (XRT) qui permettent de distinguer les types de métaux, les rayons X par fluorescence (XRF) qui sur la base de la densité atomique des intrants, rendent possible l'identification des halogènes ainsi que des matières organiques [27], le proche infra-rouge

(NIR) dédié à la reconnaissance des matériaux plastiques et fibreux (figure 11) et enfin le visible (VIS) conçu pour la détection des couleurs [28].

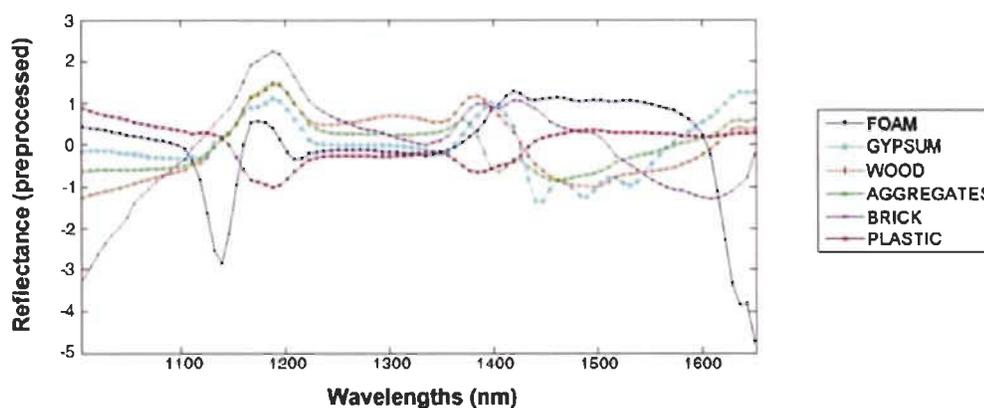


Figure 11 : Réflectance et longueur d'ondes des résidus de CRD dans le spectre NIR [29]

Le proche infra-rouge (NIR) est sans doute la technologie la plus largement répandue dans l'industrie des résidus de CRD, en raison de sa capacité à identifier la structure moléculaire des matériaux grâce à la réflexion d'un faisceau lumineux qui est décodé par un spectromètre pour en détecter la nature. Les matières cibles sont ensuite projetées par l'action d'une série de distributeurs pneumatiques. Plusieurs fabricants proposent la combinaison des capteurs de type NIR et VIS dans le même équipement afin de permettre le tri des matériaux selon leur nature et leur couleur au cours du même passage [28]. Cependant, cette technologie montre ses limites dans l'identification des corps noirs ainsi que les métaux [28]. L'avènement du tri optique a largement contribué à l'amélioration de la qualité du bois de CRD et à l'augmentation de la capacité de traitement des centres de tri. La barre symbolique des 100 000 tonnes métriques/ année a pu ainsi être dépassée [24].

2.2.4 Le bois de CRD face aux enjeux du bannissement de l'enfouissement

Le plan d'action 2011 - 2015 de la Politique québécoise de Gestion des Matières Résiduelles s'est fixé pour objectif de bannir l'enfouissement du bois en 2014 à travers la mise en œuvre de la 13^{ème} action [30]. L'application de cette mesure restait cependant

tributaire de la modification du Règlement sur l'Enfouissement et l'Incinération de Matières Résiduelles (REIMR). Or, dans un bilan mi-parcours du plan d'action 2011-2015 publié en 2014, le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) a repoussé la date d'échéance initiale en lien avec le bannissement de l'enfouissement du bois à 2015 en raison du retard accusé dans l'élaboration du projet de modification réglementaire du REIMR [31]. La révision dudit règlement est depuis lors restée lettre morte, à telle enseigne que le Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec (3R MCDQ) exhortait le MDDELCC dans un mémoire rendu public le 10 avril 2018 à accélérer les démarches visant à rendre effectif le bannissement de l'enfouissement du bois sans manquer de faire le constat que «les modifications réglementaires sont trop longues à être adoptées dans le cours normal des activités... et qu'il est primordial de profiter de cette importante mise à jour des règlements pour effectuer des ajouts attendus depuis plusieurs années tels que le bannissement du papier, carton, bois etc.» [32]. Jusqu'à présent, la modification du REIMR n'a pas encore été actée.

Pourtant, l'entrée en vigueur du bannissement de l'enfouissement du bois profiterait à tous les acteurs du secteur, tant sur le plan économique qu'environnemental. C'est que l'essor de l'industrie des récupérateurs des résidus de CRD, considérée comme étant jeune et titubante, en dépend. En effet, un rapport publié en septembre 2012 par Recyc-Québec dresse un pronostic plutôt sombre pour l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur positionnés dans la filière de la gestion du bois de CRD, au cas où l'interdiction de son élimination tardait à prendre effet [26]. Incisives et catégoriques, les conclusions dudit rapport réalisé selon une analyse structurelle inspirée du modèle de Porter (figure 12) prêchent pour une application immédiate des mesures de bannissement.

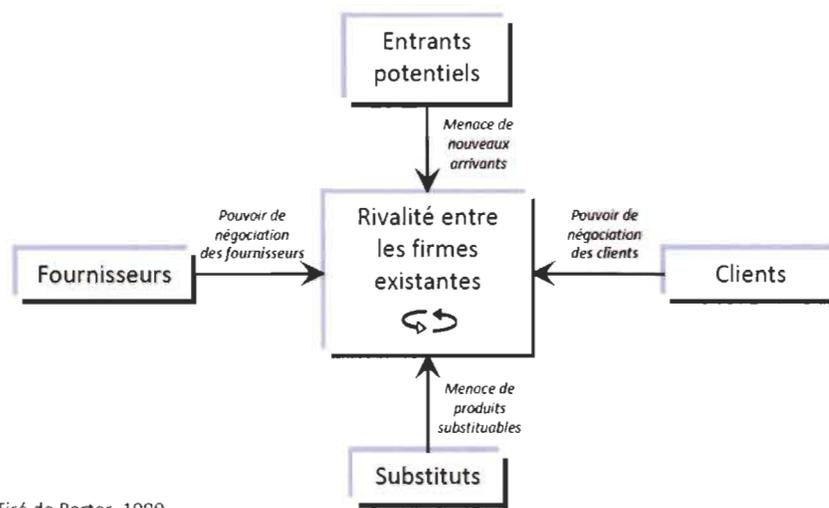


Figure 12 : Analyse structurelle selon le modèle de Porter [26]

Selon le modèle de Porter, la structure d'une industrie donnée est définie en fonction de cinq axes principaux. Ainsi, la viabilité économique de toute saine activité manufacturière doit invariablement garantir l'existence et l'interaction des forces suivantes :

- Le type et l'intensité de la rivalité entre les firmes du secteur;
- Le pouvoir de négociation des fournisseurs;
- La présence de produits substitués;
- La menace de nouveaux entrants;
- Le pouvoir de négociation des clients.

La section suivante est consacrée à l'impact de l'interdiction de l'élimination du bois dans le cas spécifique de l'industrie de récupération et du recyclage de la matière ligneuse. Les éléments susmentionnés y sont décrits selon l'état des lieux ayant cours en période de pré-bannissement et la situation projetée une fois que les mesures du bannissement auront été mises en œuvre.

2.2.4.1 Type et intensité de la rivalité entre les firmes du secteur

Peu ou pas de concurrence existe entre les entreprises du secteur de récupération de bois de CRD. D'abord en raison de leur faible nombre dans les territoires métropolitains

(ex : Montréal, Québec) où les volumes de ce gisement générés per capita justifient leur raison d'être. Le même constat est observé dans les régions où certains centres de tri qui occupent pourtant une position de monopole voient leur survie menacée à cause de l'attrait des LET pour les entrepreneurs qui continuent à y acheminer leurs débris de CRD [26]. L'instabilité des approvisionnements provoquée par cette réalité empêche les récupérateurs de proposer une offre pérenne de leurs produits sur le marché et régulière dans la durée.

Au niveau de la demande, la situation est viciée par une insuffisance presque chronique des débouchés destinés au bois de CRD et leur forte cyclicité (ex : filière énergétique). La précarité financière induite par la variation de la demande est en effet doublée d'un défi opérationnel rattaché à la gestion même de ces résidus dans les lignes de séparation [26]. Le flux hautement hétérogène des débris de CRD à leur réception par les récupérateurs devant du reste donner lieu, une fois traité, à des produits finis répondant à une classification ambivalente et évasive allant du « Grade 1 » au « Grade 3 ».

Le bannissement de l'enfouissement du bois de CRD va réduire la volatilité des volumes disponibles dans les centres de tri et permettra d'assainir le climat de concurrence entre les différents joueurs du secteur. Le gain en maturité de l'industrie de la récupération des résidus de bois se manifestera alors dans le positionnement que se donneront les acteurs de la filière au niveau de la qualité du service proposé par les sites de traitement aux entrepreneurs et à la différenciation des produits finis offerts aux clients. Le Bureau de Normalisation du Québec (BNQ) pourra ainsi établir de véritables standards de qualité moins équivoques que l'actuelle hiérarchie improvisée (grade 1, 2 et 3) [26]. L'entrée en vigueur du bannissement aura également pour effet de stimuler les investissements visant à moderniser les infrastructures de récupération existantes et l'apparition de nouveaux centres de tri dans les régions où la collecte des débris de CRD n'était assurée que par les LET.

2.2.4.2 Pouvoir de négociation des fournisseurs

Tant et aussi longtemps que les résidus de CRD seront acceptés dans les LET, les fournisseurs de ces débris demeureront insensibles aux besoins en volumes exprimés par

les récupérateurs. Leurs intérêts sont ainsi mus par des considérations strictement financières. Le coût de disposition pratiqué par les LET fait figure de plafond aux barrières à l'entrée tarifées par les récupérateurs aux entrepreneurs [26]. La situation actuelle est clairement favorable aux fournisseurs et limite la marge de manœuvre des centres de tri.

L'interdiction de l'élimination du bois de CRD libérera les forces du marché et permettra aux récupérateurs de revoir leurs tarifs de réception à la hausse de manière à couvrir et même rentabiliser leurs coûts d'opération. Les fournisseurs feront face à une sorte de « fait accompli » faute d'alternative aux centres de tri [26]. Plus loin encore, les entrepreneurs, dans leur quête de réduction des frais de disposition, seront tentés de déployer des efforts supplémentaires pour activer les leviers plus en amont de la hiérarchie des modes de gestion. Car certains gestionnaires de chantiers chercheront à détourner par le biais du réemploi et de la réduction à la source [26] une proportion des volumes autrefois acheminés vers les récupérateurs. Cette pratique a tout lieu d'amener sur le plus long terme les entrepreneurs à adopter d'autres bonnes pratiques telles que la déconstruction sélective, augmentant par le fait même la pureté des flux acheminés vers les récupérateurs.

2.2.4.3 Présence de produits substitués

Compte tenu de la double vocation des centres de tri, centrée d'une part sur la récupération des débris de CRD en amont et d'autre part, sur la fourniture de broyats de bois préalablement conditionnés en aval, la question des produits substitués sera abordée sous cet angle [26]. En amont, avant la mise en application de l'interdiction de l'enfouissement du bois, le substitut principal au service de collecte de débris de CRD proposé par les récupérateurs demeure le LET. Cette option, malgré l'attrait financier qu'elle peut susciter auprès des entrepreneurs présente une externalité, dont les coûts sont assumés indirectement par la communauté. L'activité de l'enfouissement est souvent associée à des risques environnementaux comme la pollution de l'air, la contamination de la nappe phréatique, l'émission d'effluents malodorants et de gaz à effets de serres (GES) [26]. L'entrée en vigueur des mesures de bannissement permettra à ce titre d'instaurer un lien univoque entre les entrepreneurs en construction et les récupérateurs de bois de CRD,

puisque'il s'agira désormais du seul moyen de disposition conforme à la loi. Pour prévenir l'apparition de dépotoirs sauvages, les régions à faible densité démographique ne comptant aucune installation de récupération de débris de CRD sur leur territoire mettront en place par l'entremise de leurs structures municipales des mesures de traçabilité des résidus de CRD générés par leurs citoyens particuliers et corporatifs [26].

Sur un autre registre, la disponibilité de produits substitués en aval n'obéira à aucun lien de cause à effet avec l'application du bannissement. Qu'ils soient de source forestière (écorces, copeaux de sciage, biomasse résiduelle) ou de source fossile (produits pétroliers, gaz naturel), ces substitués dépendent de l'intensité de l'activité d'autres secteurs indépendants de la filière de CRD [26]. En résumé, le coût de revient de ces produits, et le lien étroit de certains d'entre eux avec le secteur papetier (ex : coproduits forestiers), frappé de plein fouet par l'ère du tout-numérique ne font pas d'eux des alternatives crédibles aux broyats de bois de CRD sur le long terme [26].

2.2.4.4 Menace de nouveaux arrivants

L'industrie de récupération des débris de CRD ne présente presque pas d'attrait économique en période de pré-bannissement. Motivés par l'appât du gain et des intérêts pécuniaires, les investisseurs désireux de se lancer en affaires sont rapidement rebutés par les difficultés rencontrées par les joueurs du secteur au niveau de l'évolution erratique de l'approvisionnement et du peu de débouchés accessibles aux produits issus du bois de CRD [26]. Le secteur se morfond donc, dans un statu-quo réducteur où peu d'opportunités d'affaires peuvent être envisagées.

L'application du bannissement marquera le début d'une nouvelle phase de développement dans le secteur de récupération de recyclage des résidus de CRD. La levée des verrous tarifaires des « barrières à l'entrée » actuellement alignées artificiellement sur les coûts de disposition proposés par les LET permettra à l'industrie de se hisser à un palier autrement plus lucratif et attrayant aux capitaux qui voudraient y investir [26]. Ces investissements prendront d'abord place dans les centres de tri existants, sous forme de participations visant à moderniser les installations opérant dans le secteur de la récupération des débris de CRD. La création de nouveaux centres de tri dépendra

néanmoins de plusieurs facteurs, à commencer par la disponibilité d'un volume critique dans les régions ciblées à même de garantir leur rentabilité, mais aussi de l'obtention d'un certificat d'autorisation du MDDELCC, ce précieux sésame dont l'attribution n'est pas sans encombre, de l'aveux de tous les acteurs de la filière [26].

2.2.4.5 Pouvoir de négociation des clients

Le faible nombre de clients des récupérateurs de bois de CRD ainsi que les grands volumes de matières nécessaires aux procédés de combustion prédestinent cette filière à exercer un pouvoir de monopole sur les centres de tri en période de pré-bannissement [26]. Cette situation renforce leur capacité de négociation auprès des récupérateurs de bois résiduel, tant en termes de prix qu'au niveau de la qualité des produits convoités [26]. D'ailleurs, la qualité du bois issu du secteur de CRD présente une pierre d'achoppement dans les relations d'affaires entre les récupérateurs et leurs clients. La qualité du tri constitue le nerf de la guerre en matière de différenciation entre les récupérateurs. La faible maturité technologique et l'absence d'investissements dans les procédés de tri de pointe, faute de profits, maintient les rapports entre les centres de tri et leurs clients dans un cercle vicieux [26]. Les aspirations exprimées par les premiers dans le but d'augmenter le prix de leurs produits pour disposer des moyens financiers nécessaires à l'amélioration de leurs infrastructures et le besoin insistant des seconds de sécuriser un approvisionnement constant en volume et dépourvu de contaminants pour respecter les exigences environnementales s'apparentent jusqu'ici, hélas, à un dialogue de sourds.

Le bannissement de l'enfouissement du bois de CRD proposera une piste de solution à cette situation. L'intérêt des clients à la matière ligneuse produite par les récupérateurs demeurera identique à la période pré-bannissement. Conscients de l'occasion désormais ouverte aux récupérateurs d'engranger des profits à la réception des débris de CRD à l'état brut, les clients auront tendance à exercer plus de pression sur les centres de tri pour réduire les prix de leurs produits et augmenter leur qualité [26]. L'établissement de normes de qualité correspondant à une compréhension universelle de tous les acteurs du secteur se fera rapidement sentir et un climat de concurrence saine s'installera alors dans l'industrie de récupération des résidus de CRD. Ce changement de logique instaurera une nouvelle

appréciation basée sur les attributs qualitatifs des produits plutôt que sur la taille des volumes générés [26]. L'amélioration de la qualité augmentera leur captivité auprès de nouveaux clients provenant d'autres secteurs traditionnellement intéressés par le bois de source vierge (litière animale, bio-charbon, panneaux de particules, matelas fibreux, granules de chauffage, etc.). Il est ainsi prévu que l'industrie de récupération du bois de CRD soit entraînée dans une dynamique garante d'un véritable essor, après plusieurs années de morosité [26]. Les forces du marché pourront donc exprimer leur plein potentiel dans le but d'agrandir leurs parts de marché tout en s'appuyant sur un approvisionnement moins cyclique et plus lucratif [26]. La résultante aux cinq axes ci-haut analysés, soit la capacité des récupérateurs de résidus de CRD à générer et à maintenir des profits économiques restera donc nulle en période de pré-bannissement. Elle sera stimulée par la mise en œuvre de l'interdiction de l'élimination des matières issues de ce gisement [26] comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 : Résumé de l'analyse structurelle [26]

	Pré-bannissement	Post-bannissement
Rivalité entre les firmes du secteur	S.O.	+
Pouvoir de négociation des fournisseurs	---	++
Pouvoir de négociation des clients	--	-
Menace de nouveaux arrivants	+++	+
Présence de produits substitués en amont	---	+
Présence de produits substitués en aval	--	-
Capacité à générer et à maintenir des profits économique	Nulle pour tous	<ul style="list-style-type: none"> • Faible pour les entreprises à stratégie de coût. • Moyenne pour les entreprises à stratégie de différenciation

Légende : Un signe « - » signifie que la force diminue le pouvoir de générer des profits économiques pour les entreprises du secteur (les centres de tri). Un signe « + » signifie que la force contribue à l'obtention de profits économiques pour les entreprises du secteur.

Les entreprises œuvrant dans le secteur, fortes d'une réelle opportunité à générer des profits, vont adhérer à une stratégie de différenciation mettant l'accent sur les techniques du *lean management*, de la *supply chain* et de la *Total Quality Management* (TQM) comme toutes les industries classiques. Ce vent porteur de changement de paradigmes amènera l'ensemble des joueurs de la filière à s'intéresser à la recherche et développement (R&D) toujours dans le but de proposer des produits novateurs et respectueux de l'environnement. Le génie industriel sera mis à contribution dans ces

initiatives avec la boîte à outils à laquelle il donne accès. La cartographie de la chaîne de valeur (*Value Stream Mapping*), l'étude de temps (*Method Time Measurement*), l'ergonomie des postes de travail ainsi que les principes du modèle Toyota (6 σ , 5S, zéro gaspillage, etc.) profiteront à l'optimisation des procédés et des aménagements des centres de tri en vue d'y implémenter une culture managériale et opérationnelle centrées sur l'amélioration continue.

2.2.5 État des lieux sur les volumes et la composition des résidus de CRD au Québec

La société québécoise de récupération et de recyclage, Recyc-Québec publie à raison biennale un bilan de la gestion des matières résiduelles dans la belle province. Ce bilan qui brosse un portrait quantitatif des différents gisements des matières résiduelles (collecte sélective, matières organiques, textiles, résidus domestiques dangereux, résidus des industries, commerces et institutions dits ICI, résidus de CRD, etc.) fournit également des données sur la capacité de traitement des centres de tri et sur la composition (nomenclature) sous la forme d'un bilan massique des matières issues de chaque secteur d'activité. Le même document renseigne aussi sur les volumes acheminés à l'enfouissement.

Le dernier bilan en date a été publié en 2020 et porte sur les données recueillies pour l'année 2018. Le rapport révèle que le nombre de centres de tri de résidus de CRD en activité au Québec a augmenté entre 2015 et 2018, passant ainsi de 48 à 61 [1]. Malgré ce fait, 86 % des centres de tri qui ont répondu au sondage de Recyc-Québec déclarent traiter moins de 75 000 tonnes métriques par année [1]. Cette situation corrobore le constat précédemment stipulé par rapport à la faible maturité technologique de l'industrie des récupérateurs de résidus de CRD, puisque les installations de traitement de troisième génération rendent techniquement possible la gestion d'un volume annuel proche, sinon supérieur à 100 000 tonnes métriques [24]. Pis encore, le document indique que 60 % des installations de tri de CRD traitent moins de 25 000 tonnes par année (figure 13) [1].

RÉPARTITION DES CENTRES DE TRI DE RÉSIDUS DE CRD RÉPONDANTS SELON LE TONNAGE REÇU ANNUELLEMENT

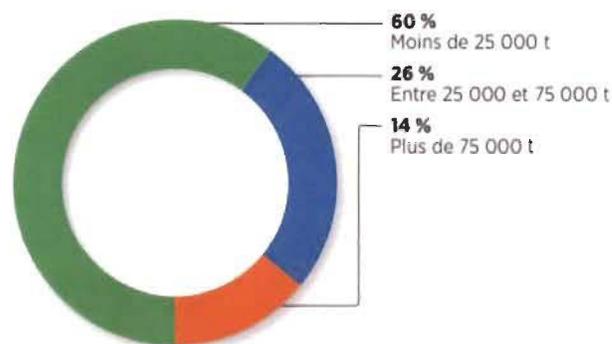


Figure 13 : Capacité de traitement annuelle des centres de tri des résidus de CRD [1]

Autre paradoxe, l'augmentation du nombre des installations de tri ne s'est pas accompagnée d'une progression en termes de taux de récupération. En effet, entre 2015 et 2018, les volumes récupérés par les centres de tri a baissé de 70 000 tonnes, et la quantité de résidus acheminés à l'élimination dans les LET a augmenté de 122 000 tonnes [1]. En résulte un taux de récupération global des résidus de CRD en baisse de 3,5 % (tableau 5).

Tableau 5 : Taux d'acheminement des résidus de CRD vers un centre de tri [1]

TAUX D'ACHEMINEMENT DES RÉSIDUS DE CRD VERS UN CENTRE DE TRI

(en tonnes)

	RÉSIDUS ACHÉMINÉS VERS UN CENTRE DE TRI	RÉSIDUS DIRECTEMENT ACHÉMINÉS À L'ÉLIMINATION ^a	QUANTITÉS DE RÉSIDUS GÉNÉRÉS	TAUX D'ACHEMINEMENT VERS UN CENTRE DE TRI
2018	1 781 000	1 205 000	2 986 000	59,6 %
2015	1 851 000	1 083 000 ^r	2 934 000 ^r	63,1 %

a Les tonnages présentés incluent, en plus des résidus de CRD déclarés directement éliminés dans les rapports des lieux d'élimination, les quantités estimées de ces matières qui se retrouvent dans les arrivages d'ordures ménagères et ICI, calculées à partir de taux déterminés lors de la caractérisation à l'élimination 2010-2011.

r Les quantités de résidus de CRD directement éliminés estimés en 2015 ont été révisées par rapport à celles déjà diffusées dans le Bilan 2015.

Les données exposées au tableau 5 montrent sans contredit la captivité des LET aux entrepreneurs qui génèrent les résidus de CRD. L'élimination demeure en effet la voie de prédilection empruntée par les gestionnaires de chantiers de démolition. Cette situation est d'autant plus marquée que la naissance de nouveaux récupérateurs n'a amélioré aucun indicateur de performance en termes de récupération à l'échelle provinciale, et ce, bien

que dans l'ensemble, le volume de résidus de CRD généré au Québec a augmenté de 52 000 tonnes de 2015 à 2018 [1].

En 2018, les résidus de CRD récupérés par les centres de tri ont été utilisés à des fins de recyclage à 55.4% et employés comme combustible de substitution à 44.2% comme le montre la figure 13 [1]. On notera une légère baisse de 2.8% en matière de recyclage de ces résidus entre 2015 et 2018 (figure 14).

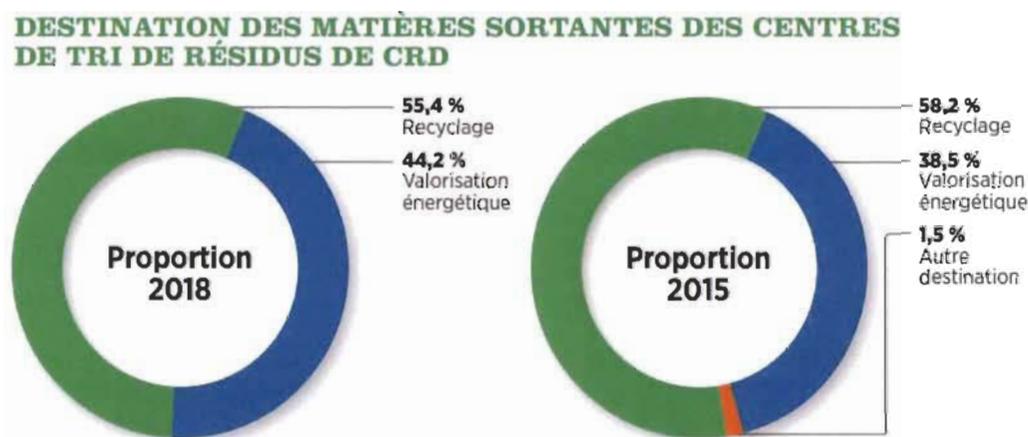


Figure 14 : Proportions destinées à la valorisation énergétique vs. recyclage [1]

La ventilation des matériaux composant les résidus de CRD présentée au tableau 6 révèle la domination du bois, estimé à 55.9 % en 2015 et 52.7 % en 2018. La matière ligneuse est talonnée par les agrégats (brique, béton, roche) à 21.8% en 2015 et à 26.3 % en 2018. A eux seuls, ces deux matériaux représentent plus de 75 % du volume de résidus de CRD aux deux périodes analysées [1]. Dans une moindre proportion, on notera que les métaux ferreux et non ferreux oscillent entre 6.6 et 8.1 % suivis du bardeau d'asphalte variant à la hausse entre 2015 et 2018 de 4 à 5.4 % [1]. Enfin, les matières mélangées évaluées à 7.2 % en 2015 enregistrent une baisse drastique à 0.3 % en 2018. Cet effet synonyme d'une meilleure ségrégation au niveau du tri, semble émaner d'une exigence imposée par le marché du chauffage dans les cimenteries. Pour le cas spécifique du bois, on remarque que sur les 295 000 tonnes traités dans les centres de tri, la valorisation énergétique se taille la part du lion en mettant le grappin sur un volume de 211 000 tonnes soit 71.5 % des matières disponibles [1]. Ces dernières prennent en effet le chemin vers

les installations de cogénération énergétique, connues pour leur forte demande en combustible alternatif aux résidus forestiers classiques (écorces, boues papetières, etc.).

Tableau 6: Composition des résidus de CRD et emploi dans la valorisation énergétique de chaque matériau [1]

RÉPARTITION DES MATIÈRES SORTANTES AUX FINS DE RECYCLAGE ET DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

MATIÈRES	RECYCLAGE	VALORISATION ÉNERGÉTIQUE	TOTAL	COMPOSITION 2018	COMPOSITION 2015
Agrégats ²	147 000	s.o.	147 000	26,3 %	21,8 %
Bois	84 000	211 000	295 000	52,7 %	55,9 %
Bardeaux	2 000	29 000	30 000	5,4 %	4,0 %
Gypse	6 000	s.o.	6 000	1,1 %	1,2 %
Carton	21 000	0	21 000	3,8 %	1,3 %
Métaux	45 000	s.o.	45 000	8,1 %	6,6 %
Plastique, verre et autres	5 000	1 000	6 000	1,4 %	0,1 %
Matières mélangées	s.o.	7 000	7 000	0,9 %	7,2 %
Total	311 000	247 000	558 000		
Hors Québec			1 500	0,3 %	1,9 %
Grand Total			560 000	100,0 %	100,0 %

² Agrégats ayant été traités par un centre de tri. Le Bilan ne prend pas en considération les agrégats qui ont pu être conditionnés et recyclés directement en chantier ou par les entrepreneurs concernés (ex. : les travaux d'infrastructures). Cette dernière activité regroupe la majorité des volumes de cette matière.

2.2.6 Perspectives de valorisation du bois de CRD

La combustion des résidus de bois à des fins énergétiques est encadrée par le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA), qui impose depuis le 31 juin 2016 de nouvelles limites en termes d'émission de particules, de la teneur en halogènes totaux au point d'alimentation et de la concentration de formaldéhyde en sortie de cheminée comme montré au tableau 7.

Tableau 7 : Exigences du RAA par rapport aux limites d'émission de particules, de concentration en halogènes et en formaldéhyde [33]

Puissance nominale	Combustible utilisé	Valeur limite applicable au regard de l'émission de particules (mg/m ³ R gaz sec) à 7 % d'oxygène		Poids maximal en halogènes totaux au point d'alimentation (%)	Valeur limite de la concentration de formaldéhyde dans l'atmosphère, sur une période de 15 minutes consécutives, en utilisant un modèle de dispersion atmosphérique conformément à l'annexe H (µg/m ³)
		Appareil existant 30 juin 2014	Nouvel appareil		
< 3 MW	Bois ou des résidus de bois qui contiennent ou qui sont imprégnés de colles à base de formaldéhyde et qui sont générés dans le cadre des activités de l'établissement de fabrication de meubles	180	150	0,05	37
≥ 3 MW	Bois ou des résidus de bois qui contiennent ou qui sont imprégnés de colles à base de formaldéhyde.	100	70		

La révision du RAA rend ainsi plus restrictive l'emploi du bois résiduel dans son débouché historique. Et sa mise en œuvre va, en tout état de cause, engendrer un nivellement par le haut en ce qui a trait à la qualité du bois de CRD désormais exigée par les clients traditionnels des centres de tri. En se rapportant aux données relatives aux volumes de bois de CRD utilisés dans la valorisation énergétique, on peut avancer le postulat soutenant que les centres de tri devaient redoubler d'efforts au niveau de la qualité de ségrégation des matériaux pour continuer à approvisionner les chaudières à biomasse autorisées à brûler les résidus de bois.

Dans un autre ordre d'idées, le faible taux de matières ligneuses résiduelles destinées au recyclage, estimé selon le bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles à 28.48 % témoigne de l'incapacité, devenue endémique à travers les années pour le bois de CRD à s'imposer dans la fabrication de produits à forte valeur ajoutée [1]. Un rapport réalisé par

la firme SECOR en 2011 pour le compte de Recyc-Québec, faisant suite à une série de rencontres entre les acteurs de la filière du bois récupéré du secteur CRD a relevé un certain nombre de problèmes structurels et conjoncturels qui s'érigent en frein à la diversification de vocations destinées à ce gisement [2].

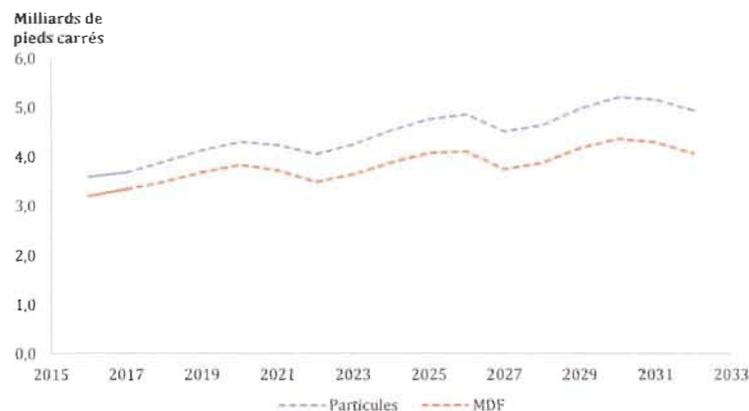
Un des commentaires récurrents soulevés par les acteurs du secteur fait référence à la qualité hétérogène du bois de CRD qui réduit fortement les possibilités d'écouler des volumes plus importants dans de nouveaux débouchés [2]. Pourtant, dans un rapport technique publié en 2011 où les débouchés accessibles au bois de CRD en dehors du Québec ont été recensés par le Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ), il s'en dégage plusieurs possibilités de valorisation autres que la filière de bois-énergie. En tête du peloton, on retrouve l'industrie des panneaux de particules, qui peut employer le bois de CRD dans la fabrication de ses produits [5]. Plusieurs attraits militent objectivement en faveur de l'utilisation du bois de CRD dans cette voie de valorisation, à commencer par son prix, largement en deçà de celui des coproduits de transformation du bois vierge et sa plus faible teneur en humidité (autour du point de saturation des fibres) comparée au bois vert (supérieure à 40 %). Cet avantage permet aux usines de fabrication des panneaux de particules de réduire le coût de séchage des broyats bruts, considérant le caractère onéreux et énergivore de cette étape de conditionnement thermique. Encore faudrait-il valider la conformité des panneaux de particules fabriqués à 100 % à partir de bois de CRD à la norme ANSI 208.1-2016.

2.3 Les panneaux de particules

2.3.1 Portrait et tendances du marché des panneaux de particules

Un rapport publié en 2018 par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) propose une vue d'ensemble sur les perspectives du marché nord-américain de l'industrie des panneaux composites à base de bois [4]. Le document décrit une évolution stable du marché entre 1990 et 2008. Les contrecoups de la crise des sub-primes ont fait plonger la consommation des panneaux de particules qui n'a repris qu'en 2016. Une

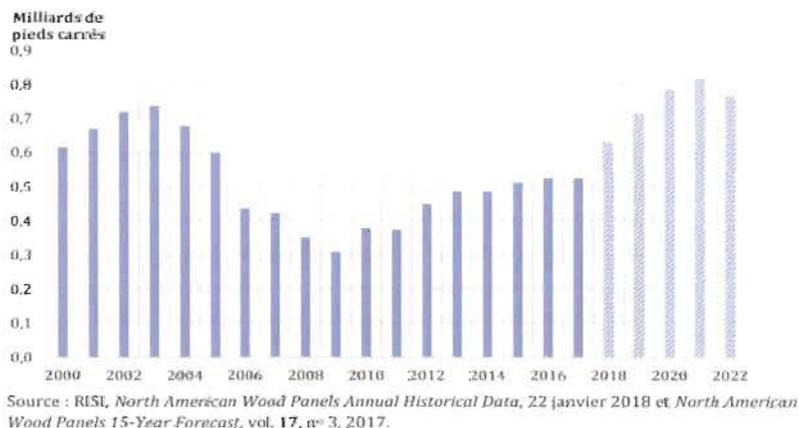
croissance de 2.5 % a été observée en 2017, suivie d'une progression annuelle de la demande estimée à 5.9 % entre 2018 et 2020 [4]. Sur le plus long terme, les modèles mathématiques prévisionnels projettent une tendance annuelle suivant une hausse moyenne de 1.5 % entre 2022 et 2032 comme le montre la figure 15.



Source : RISI, *North American Wood Panels 15-Year Forecast*, vol. 17, n° 3, 2017.

Figure 15 : Évolution de la demande des panneaux de particules et du MDF [4]

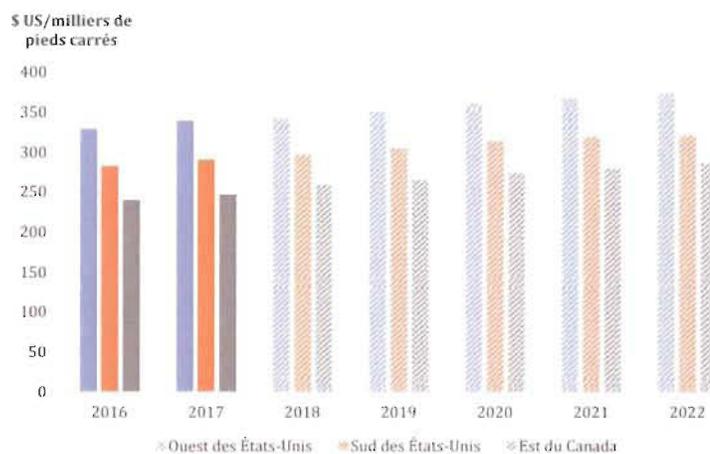
Les panneaux de particules fabriqués au Canada sont en majorité exportés aux États-Unis. Le regain de vigueur du secteur de la construction ainsi que le taux de change du huard sont des facteurs qui jouent en faveur de la croissance de l'exportation des panneaux de particules à destination des USA jusqu'en 2022. Une progression annuelle moyenne autour de 6.9 % devrait être enregistrée, consolidée par l'atteinte d'un pic historique en volume exporté avec un indice supérieur à 0.8 milliards de pieds carrés prévu pour 2021 [4]. La tendance des exportations est schématisée à la figure 16.



Source : RISI, *North American Wood Panels Annual Historical Data*, 22 janvier 2018 et *North American Wood Panels 15-Year Forecast*, vol. 17, n° 3, 2017.

Figure 16 : Exportations de panneaux de particules fabriqués au Canada exportés au marché américain [4]

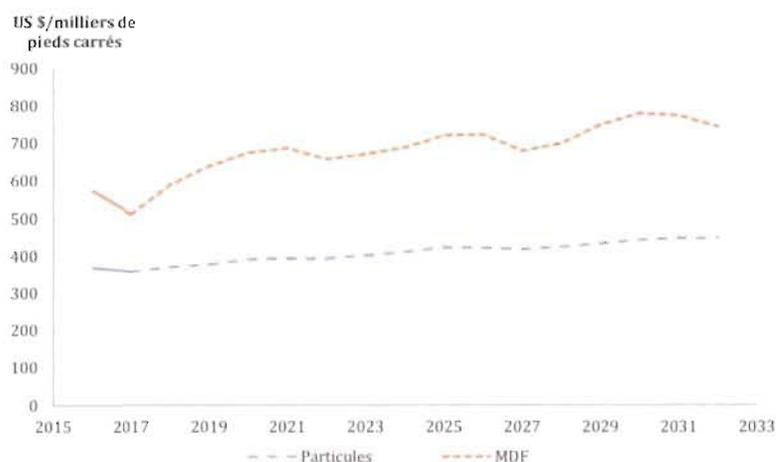
En ce qui a trait aux coûts de fabrication, bien qu’historiquement et jusqu’en 2009, fabriquer un panneau de particules au Canada coûtait plus cher que chez son voisin américain, la vapeur a été renversée en 2010 et la nouvelle donne s’est maintenue jusqu’à ce jour [4]. Comme l’illustre la figure 17, les modèles prévisionnels projettent que cet état de fait demeurera inchangé d’ici 2022 [4].



Source : RISI, *North American Wood Panels 15-Year Forecast*, vol. 17, n° 3, 2017.

Figure 17 : Coût de fabrication des panneaux de particules selon la région en Amérique du Nord [4]

Même si son prix de vente est inférieur à celui du panneau MDF, le panneau de particules est moins exposé à la volatilité des prix. En effet, lorsqu’une baisse de prix a été observée en 2017, les panneaux de particules ont fléchi de 2.7 % contre une décroissance de 10.8 % pour le MDF [4]. Les deux produits devaient toutefois reprendre une tendance haussière à compter de 2018 jusqu’en 2023 comme le montre la figure 18.



Source : RISI, *North American Wood Panels 15-Year Forecast*, vol. 17, n° 3, 2017.

Figure 18 : Évolution des prix des panneaux de particules et du MDF [4]

Côté marge bénéficiaire, les panneaux de particules affichent des perspectives stables à court terme. En Amérique du Nord, le Canada se classe deuxième en termes de marge bénéficiaire avec baisse de 2 % entre 2017 et 2019 comme montré au tableau 8, en comparaison avec l'Ouest des USA qui encaisse une perte de -5 % en 2018 et -2 % en 2019 [4]. La région du Sud des États-Unis s'en tire avec un profit qui oscille entre 19 % en 2017 et 21 % en 2019 [4].

Tableau 8 : Marge de profit des producteurs de panneaux de particules et du MDF au Canada [4]

Type de panneau	2017	2018	2019
Particules	21 %	18 %	19 %
MDF	23 %	33 %	38 %

Source : RISI, *North American Wood Panels 15-Year Forecast*, vol. 17, n° 3, 2017.

2.3.2 Aperçu général sur les produits composites à base de bois

Les panneaux composites à base de bois sont des produits de deuxième ou de troisième transformation destinés à des applications structurales ou non. Ils sont composés d'une fibre, agissant comme renfort et d'un liant, ayant le rôle d'une matrice. Plusieurs recherches ont porté sur le développement des panneaux composites à base de bois. Les plus éminentes références se rapportent aux travaux de Moslemi (1974), Schniewind et al. (1989), Maloney (1993), Youngquist (1999) et Walker (1993 et 2006) [34-39]. L'augmentation du prix des grumes et du bois d'œuvre a suscité l'intérêt de l'industrie de transformation du bois autour des agglomérés, dans la mesure où ces derniers peuvent incorporer des matières premières de moins bonne qualité, comme le bois rond tordu ou courbé [40]. De plus, le rendement des usines de sciage, estimé à 65 % rend en effet leurs résidus, sous forme de sciure, planures, rabotures ou copeaux très attractifs pour les produits composites à base de bois [40].

La matière ligneuse peut être employée sous différentes formes et géométries dans la fabrication des panneaux composites à base de bois. Allant des lamelles à la fibre en passant par les placages, les lattes et les particules, les types de produits à base de bois

sont largement dictés par l'aspect physique des fibres auxquelles ils font appel [41]. Ils sont montrés à la figure 19.

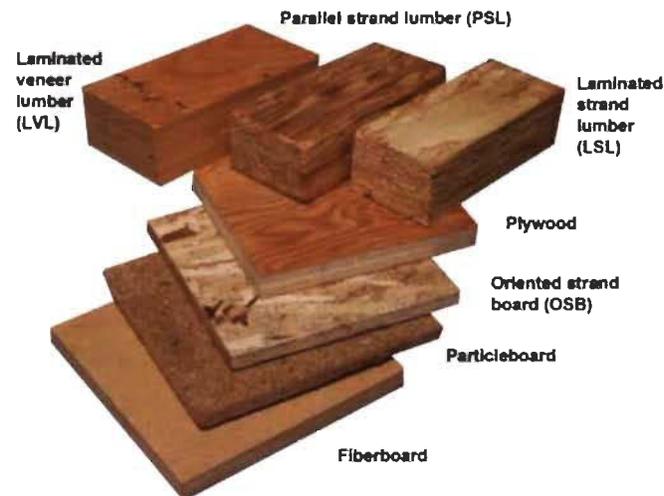


Figure 19 : Types de produits de bois composite selon la géométrie de la fibre [41]

Dans le cas spécifique des panneaux agglomérés, la norme ASTM D1554-10 établie par l'American Society for Testing of Materials suggère une terminologie universelle dédiée à la classification des catégories de panneaux, et au champs lexical technique se rapportant au domaine de la fabrication des composites à base de bois [42]. Suchsland et Woodson (1986) [43] ont classifié les différents grades de panneaux agglomérés en fonction du poids spécifique, de la granulométrie, de la densité cible et de la nature du procédé de leur fabrication comme le montre la figure 20.

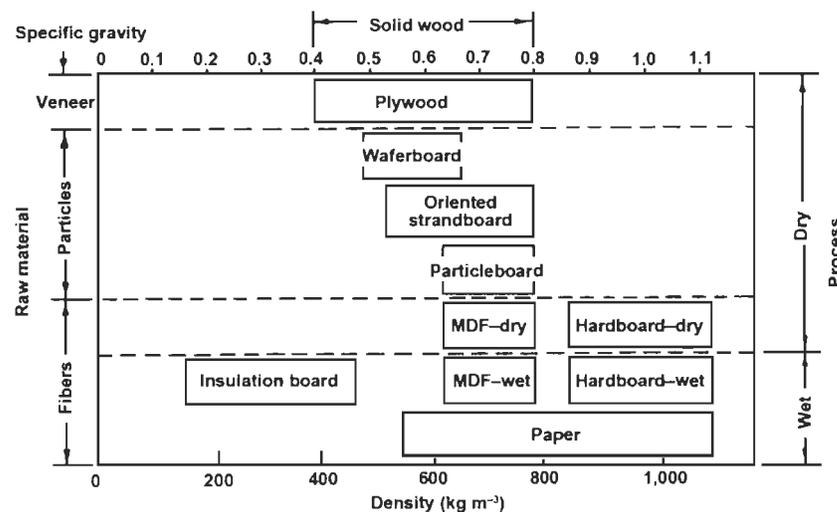


Figure 20 : Classification des panneaux agglomérés selon Suchsland et Woodson [43]

Malgré leurs propriétés mécaniques globalement plus faibles que celles du bois massif, les panneaux agglomérés se distinguent par une meilleure uniformité, ceci rend leur emploi sujet à l'utilisation de plus petits facteurs de sécurité dans les différentes applications [40]. Ils se démarquent également par leurs excellentes propriétés antifongiques et sont moins vulnérables aux attaques d'insectes. D'autres avantages permettent aux panneaux agglomérés de se différencier par rapport aux produits traditionnels de bois, comme la possibilité de les fabriquer selon des dimensions plus importantes que celles obtenues à partir des coupes de sciage, en plus de pouvoir améliorer leur résistance au feu, leur conductivité thermique et leur fini de surface [40].

2.3.3 Procédé de fabrication des panneaux de particules :

Les panneaux d'aggloméré sont fabriqués à partir d'un procédé de pressage à chaud de particules préalablement broyées, séchées et ensuite encollées selon une teneur donnée avec une résine thermodurcissable. Les étapes de fabrication peuvent être différentes d'une usine à une autre en fonction de l'état de la matière ligneuse récoltée. Cette section traitera de la séquence usuelle et générique de fabrication des panneaux de particules sans égards aux particularités pouvant se présenter dans certains types d'industrie.

2.3.3.1 Broyage

Selon la taille des matières brutes à transformer, le broyage du bois peut être effectué en un, deux ou même trois temps [40]. L'opération consiste à fractionner mécaniquement les fragments de bois à l'aide des forces d'impact et de cisaillement générées par une série de marteaux fixés sur un tambour rotatif tournant à une vitesse pouvant aller de 1750 à 3600 rpm. Le bois est éclaté par l'effet de la percussion et la friction en petites particules qui séjournent dans la chambre de broyage jusqu'à ce que leur taille soit réduite à la dimension des perforations de la grille de retenue, dont l'ouverture de mailles est ajustable selon la granulométrie désirée [44] (figure 21).

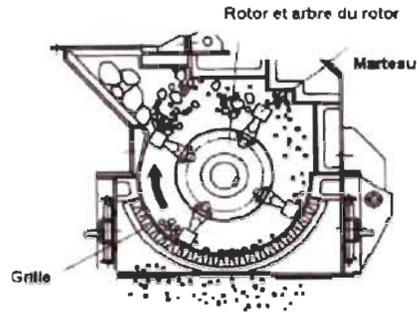


Figure 21 : Vue en coupe du mécanisme d'un broyeur à marteaux [44]

2.3.3.2 Tamisage

Le tamisage est réalisé pour classer les particules de bois en deux calibres granulométriques où les particules grossières sont disposées dans la couche médiane du panneau, et les particules fines forment ses couches couvrantes dans le cas des panneaux à 3 couches [40]. Les particules grossières ont généralement des dimensions allant de 10 à 20 mm de long, 3 à 5 mm de large et une épaisseur de 0.3 à 0.5 mm, tandis que les particules fines mesurent 1 à 3 mm de long, 0.5 à 1 mm de large et 0.1 à 0.3 mm d'épaisseur [117]. Cependant, même dans la fabrication des panneaux homogènes composés d'une seule couche, les particules de bois sont tamisées pour séquestrer les matières fines des broyats destinés au pressage, considérant leur tendance à consommer plus de résine en raison de leur surface spécifique élevée [40]. Tel que montré à la figure 22, la séparation des particules peut être effectuée par un tamis vibrant incliné, horizontal ou un tamis rotatif.

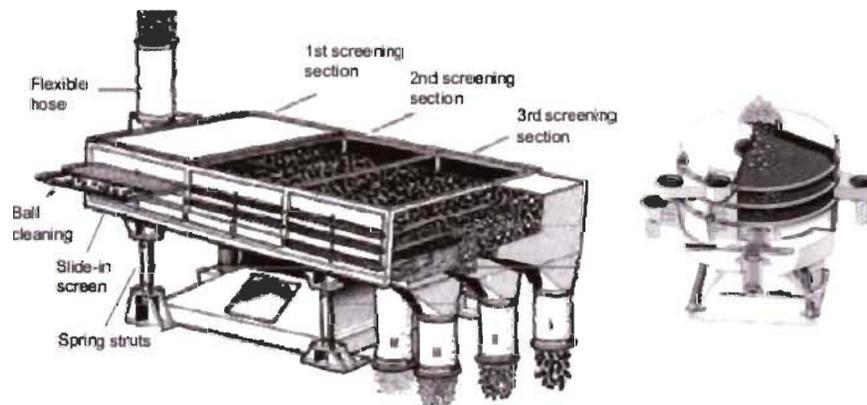


Figure 22 : Systèmes de tamisage dans l'industrie des panneaux de particules [40]

2.3.3.3 Séchage

En règle générale, les particules de bois doivent respecter une teneur en humidité comprise entre 2 et 8 % préalablement à l'étape de pressage à chaud, et ce, en fonction du système de résine employé [40]. Ce niveau de teneur en eau est nécessaire au processus de convection provoqué à l'intérieur de l'ébauche lors du pressage. Une teneur en humidité plus élevée peut entraîner le délaminage du panneau de particules au cours du cycle de décompression des plateaux chauffants [40]. Il existe plusieurs types de séchoirs dans l'industrie comme le montre la figure 23, les plus communs sont connus sous l'appellation « séchoir à trois passes » et se caractérisent par une température de chauffe dans le premier cylindre rotatif de séchage entre 250 et 400 °C, poussant un flux d'air à 8 m/s [40]. L'effet combiné de l'évaporation de l'eau et du volume du tambour occasionne la chute de la température et de la vitesse de circulation d'air, dont le flux est inversé au niveau du deuxième et du troisième cylindre. Pour cette raison, la température au troisième cylindre se situe généralement entre 60 et 100 °C. Tournant selon une vitesse nominale de 8 rpm, la chute répétée des particules favorise leur séchage rapide et efficace [40]. Un séchoir de ce type ayant 30 m de long et 4.5 m de diamètre peut atteindre une cadence de séchage de 25 tonnes métriques à l'heure [40]. L'humidité comprise dans la plage de l'eau libre baisse plus rapidement que celle de l'eau liée, étant donné que cette dernière fait partie intégrante de la structure cellulaire du bois.

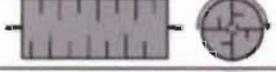
Dryer type	Scheme	Temp. range	Drying time	Drying capacity
Rotary bundle dryer		up to 200°C	≤ 20 min	1 ... 9 t/h
Tube bundle dryer		up to 160°C	n.a.	10 ... 18 t/h
Single-pass drum dryer		up to 450°C	20 - 30 min	≤ 40 t/h
Three-pass dryer		up to 400°C	5 - 7 min	≤ 25 t/h
Flash tube pre-dryer		up to 500°C	≈ 20 s	2 ... 14 t/h
Jet tube dryer		approx. 500°C	≈ 0,5 - 3 min	≤ 10 t/h

Figure 23 : Types de séchoirs à biomasse utilisés dans l'industrie [45]

2.3.3.4 Encollage

A cette étape, la résine sous forme liquide ou poudreuse doit être préparée par addition d'eau, d'agents réticulants et d'autres substances si besoin est (retardateurs de flamme, colorants, etc.). La quantité de résine est calculée sur une base sèche rapportée au poids anhydre des particules de bois selon un ratio donné. Les panneaux à 3 couches peuvent nécessiter une proportion de résine aux couches couvrantes différente du taux d'encollage à la couche médiane. De la paraffine (cire en émulsion) est généralement ajoutée à une dose pouvant varier entre 0.3 et 2 % pour améliorer la stabilité dimensionnelle des panneaux [40]. Les usines de production des agglomérés de bois sont généralement équipées de systèmes de dosage sophistiqués et automatisés qui fonctionnent par lot ou en continu et permettant le contrôle précis des quantités de résine atomisée par des buses pneumatiques sur les particules ligneuses [40]. Les mélangeurs à colle se déclinent en deux types, soit à court ou à long temps de rétention. Les premiers, dont un exemple est schématisé à la figure 24 sont largement préférés aux deuxièmes depuis les années 50 en raison de leur cadence de production plus élevée.

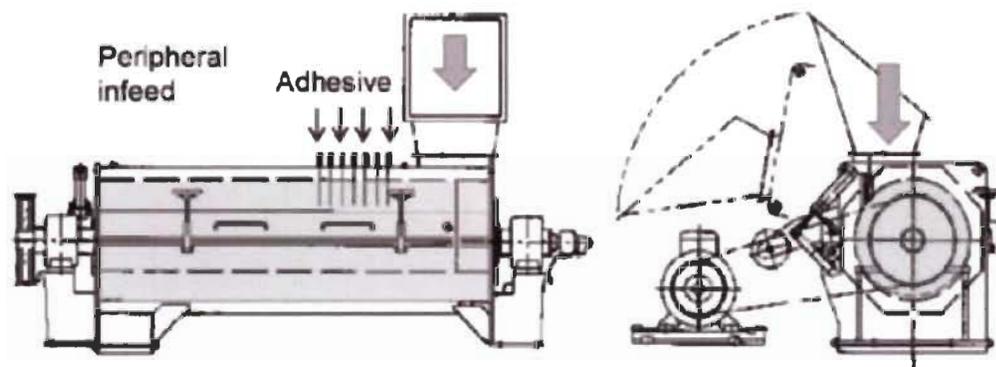


Figure 24 : Mélangeur à colle à court temps de résidence [46]

2.3.3.5 Formation de l'ébauche (Feutrage)

Le feutrage est une étape importante dans la mesure où la quantité de particules encollées par panneau est diamétralement liée à sa densité, et par conséquent, à l'ensemble de ses propriétés mécaniques [40]. Dans le cas des panneaux à trois couches, les particules fines préalablement tamisées sont dosées directement sur une bande transporteuse avant

et après les particules grossières destinées à la couche médiane, comme montré à la figure 25. Les panneaux monocouches sont composés d'un seul calibre de particules et sont donc préparés par un mécanisme d'étalement à une seule valve rotative.

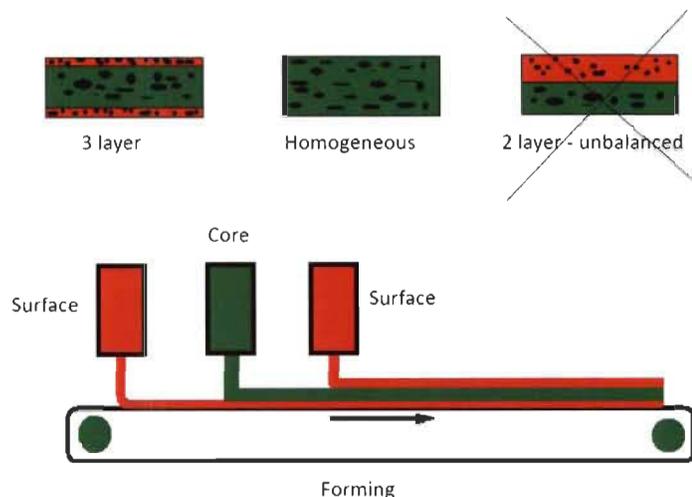


Figure 25 : Exemple d'un système de feutrage en continu [47]

2.3.3.6 Pressage

Le pressage à chaud enclenche une série de phénomènes de transfert de masse et de chaleur qui aboutissent à la polymérisation de la résine et à la densification de l'ébauche. Il s'agit d'une étape qui obéit à plusieurs paramètres tels que la température et la durée de la fermeture de la presse sur le matelas. Wolcott (1989) a scindé le processus de pressage à chaud en trois phases (figure 26) [48] :

- **Consolidation** : la fermeture du plateau est engagée à cette étape, engendrant un phénomène de radiation, dont l'effet est considéré comme négligeable jusqu'à l'atteinte des particules de surface, qui marque le début d'un autre mode de transfert de chaleur, soit la conduction. Cette phase prend fin quand la distance entre le plateau supérieur et inférieur équivaut à l'épaisseur cible du panneau. Une montée en pression est alors observée.
- **Relaxation transitive** : la pression décroît de façon graduelle, une fois que le pic est atteint lors de la phase précédente. La durée de la relaxation transitive permet la réticulation de la résine, qui se réalise lorsque celle-ci subit un transfert de phase, d'un état liquide à un état solide.

- **Relaxation asymptotique** : la chute de pression se poursuit durant cette phase à un rythme plus modéré, alors que l'ébauche est encore compressée entre les plateaux chauffants. La décompression, également appelée dégazage succède à cette phase et marque la fin du cycle de pressage. L'ébauche est alors libérée de tout contact avec le plateau supérieur.

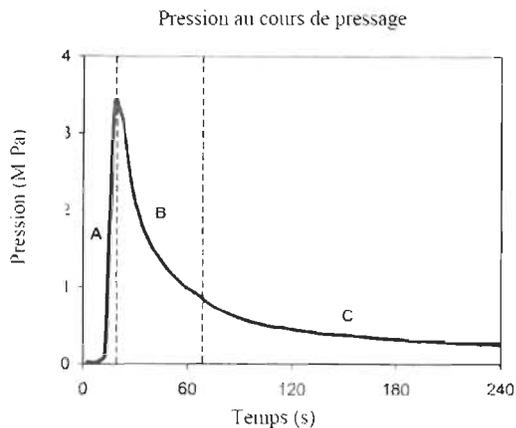


Figure 26 : Étapes du cycle de pressage à chaud [49]

2.3.3.7 Refroidissement et finition

Les panneaux de particules doivent subir une étape de refroidissement à la sortie de la presse chauffante. Cette étape est d'autant plus justifiée pour les panneaux incorporant des systèmes de résine à base d'Urée-Formaldéhyde (UF) et de Mélamine-Urée-Formaldéhyde (MUF). L'empilement de ces derniers provoque en effet une dégradation de la résine occasionnée par la chaleur résiduelle à l'intérieur des panneaux. Des systèmes de refroidisseurs à étoiles (figure 27) pouvant loger plusieurs panneaux sur des paliers rotatifs sont utilisés dans l'industrie pour faire baisser leur température à 40 °C. Les panneaux consolidés avec un système de résine à base de Phénol-Formaldéhyde (PF) peuvent toutefois être empilés à chaud durant le processus de refroidissement. Cette technique communément appelée « *hot stacking* » est même recommandée, et connue pour améliorer les propriétés mécaniques des panneaux en favorisant le durcissement de la résine phénolique [40].



Figure 27 : Refroidisseur à étoile [40]

La finition des panneaux de particules est réalisée par un procédé de sablage, conçu pour poncer les surfaces fibreuses et rugueuses, mais aussi pour uniformiser leur épaisseur afin de la conformer à l'intervalle de tolérance spécifique à un grade donné. Les ponceuses industrielles sont munies de rouleaux enveloppés de papier sablé, dont le frottement aux surfaces des panneaux permet d'améliorer la qualité de leur fini.

2.3.4 Effets des matières premières et des conditions de pressage sur les propriétés des panneaux

Plusieurs paramètres ont une incidence directe sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux de particules dont certains sont inhérents aux propriétés intrinsèques des matières premières (bois, résine, additifs), tandis que d'autres se rapportent au cycle de pressage (durée et température de cuisson) et aux propriétés cibles du produit fini (densité, monocouche ou à trois couches). Tous ces éléments interagissent ensemble comme on le verra dans cette section. Maloney (1993) a recensé les liens prédominants entre les différents paramètres mis en jeu dans la fabrication des panneaux de particules comme présenté à la figure 28 [36].

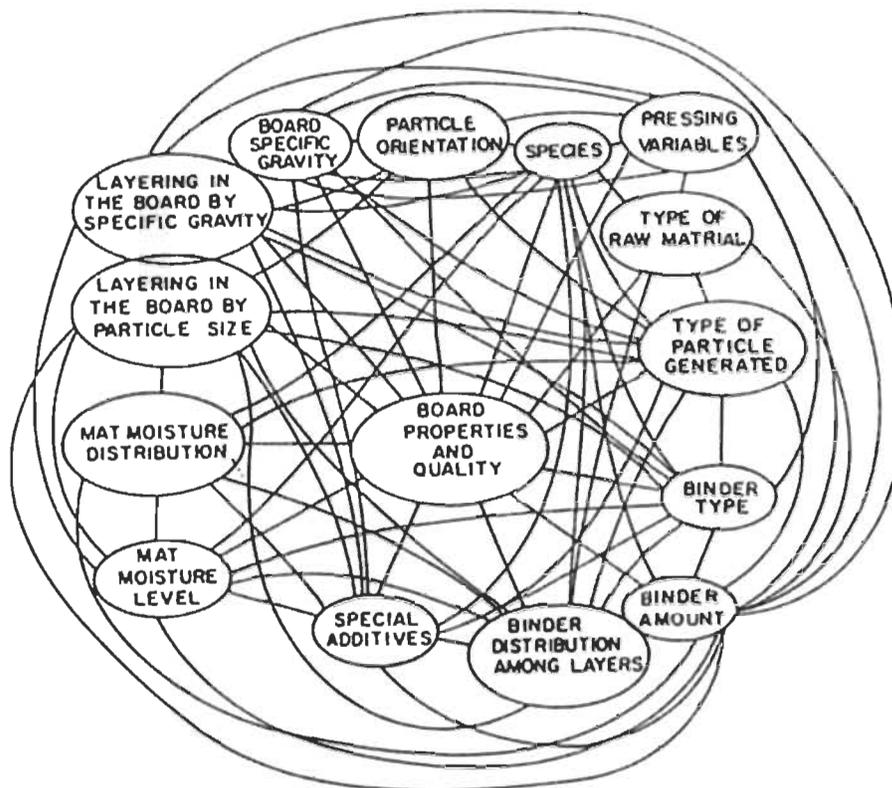


Figure 28 Interactions entre les conditions de pressage, les propriétés des matières premières et les spécifications cibles des panneaux de particules [36]

2.3.4.1 Géométrie des particules

La forme des particules de bois joue un rôle important dans les propriétés mécaniques des panneaux agglomérés. En règle générale, la présence de particules longues et minces tend à réunir des conditions favorables aux phénomènes de transfert thermique lors du pressage et améliore les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR). D'un autre côté, les particules de plus petite taille influencent positivement la qualité de fini de surface, la cohésion interne (IB) et la dureté (Janka) [50- 51] d'où l'utilité de les employer dans les couches couvrantes. La détermination de la géométrie des particules est définie par le coefficient d'élanement exprimé selon la formule 2.1 :

$$\text{Coefficient d'élanement } (C_e) = \frac{\text{Longueur}}{\text{épaisseur}} \quad [2.1]$$

2.3.4.2 Masse volumique des particules

Plus faible est la masse volumique des particules brutes, meilleures sont les propriétés physiques et mécanique du panneau. En effet, les espèces nord-américaines généralement utilisées dans l'industrie ont une densité allant de 300 kg/m³ à 500 kg/m³ [42]. Les particules ayant une faible densité se prêtent mieux au pressage et permettent la fabrication de panneaux de haute densité. Le rapport entre la masse volumique du panneau et celui des particules brutes qu'il incorpore est donné par le ratio de compression, appelé C_r , et exprimé par la formule 2.2 :

$$C_r = \frac{M_v \text{ panneau}}{M_v \text{ bois}} \quad [2.2]$$

2.3.4.3 Masse volumique du panneau

La relation entre la masse volumique des panneaux et leurs propriétés mécaniques a été étudiée dans plusieurs références de littérature. Les travaux de recherche de Hayashi et *al.* (2003) et Cravo et *al.* (2017) sont unanimes à l'idée que l'augmentation de la densité du panneau améliore ses modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) (figure 29) [52-53]. Lorsque la densité est élevée, le contact entre les particules s'en trouve amélioré et la quantité de liant inutilisée dans les pores est réduite [40].

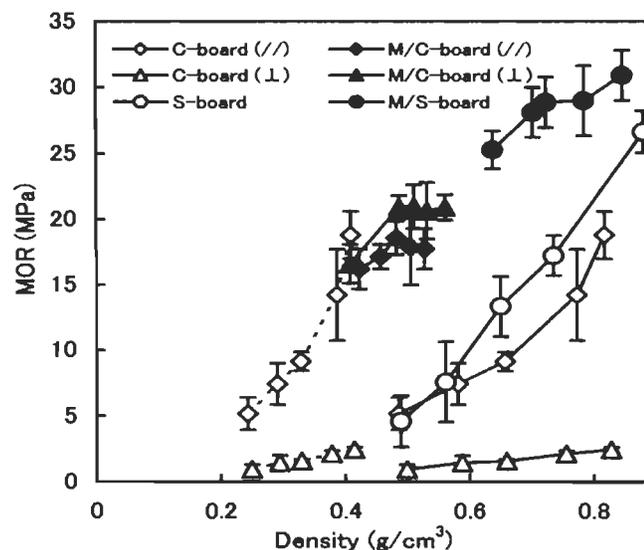


Figure 29 : Effet de la densité sur le module de rupture (MOR) [52]

2.3.4.4 Les liants et leur proportion

La formulation de l'ébauche d'un panneau de particules implique l'utilisation d'un adhésif jouant le rôle d'une matrice, qui, une fois réticulée crée plusieurs liaisons mécaniques, par un ancrage microscopique dans les pores des particules (figure 30). Heitler (1966) ainsi que Lewis et Forrestal (1969) ont démontré ce phénomène à l'échelle moléculaire [54-55].

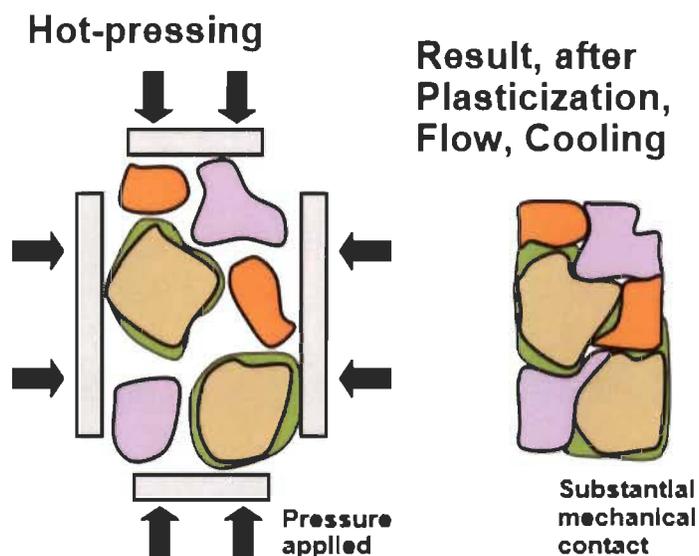


Figure 30 : Liaisons mécaniques entre les particules et le liant [56]

Les résines employées dans la fabrication des panneaux de particules sont de type thermodurcissable, dont le processus de polymérisation est dit irréversible, en raison du caractère insoluble et infusible de cette famille de résines conféré par le processus de durcissement. En règle générale, la réticulation des thermodurcissables est favorisée par un agent réactif, agissant comme catalyseur pour accélérer leur transition de la phase liquide à la phase solide, aussi appelée, vitrification [57]. On présentera ci-après les principaux adhésifs utilisés dans les panneaux composites de bois :

2.3.4.4.1 Urée Formaldéhyde (UF)

L'urée-Formaldéhyde est un liant de type aminoplaste. Il s'agit de la résine la plus populaire de l'industrie en raison de sa faible valeur commerciale, son temps de réaction rapide (à compter de 4 secondes par millimètre d'épaisseur) et sa basse température de

polymérisation, qui commence à partir de 150 °C [58]. Elle est structurée selon un réseau tridimensionnel formé à la suite de son durcissement (figure 31), qui dépend des conditions de pressage.

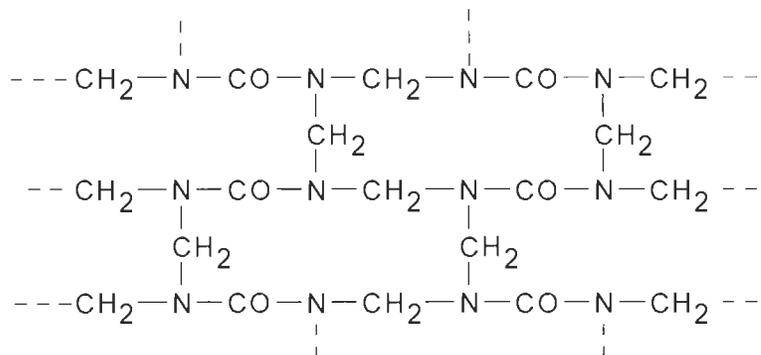


Figure 31 : Réseau tridimensionnel de l'Urée-Formaldéhyde [59]

La principale faiblesse de l'Urée-Formaldéhyde réside dans le fait qu'elle ne résiste pas à l'humidité, à cause de l'hydrolyse qui tend à rompre les liaisons chimiques des éléments qui gouvernent sa polymérisation, notamment les ponts méthylène-éther (-CH₂-O-CH₂) et les ponts méthylène (-CH₂-) [59]. L'autre inconvénient tient de son dégagement continu de formaldéhyde sur une longue période de temps après sa transformation.

2.3.4.4.2 Mélamine-Urée Formaldéhyde (MUF)

L'apparition de ce système de résine a été motivée par la montée des prix du pétrole et pour répondre au besoin de l'industrie des panneaux à employer des liants compatibles à des applications semi-extérieures, ayant donc une plus grande résistance à l'eau, bien que cette propriété demeure, pour le cas de la MUF, limitée dans le temps [60]. Basée sur une matrice Urée-Formaldéhyde, la structure de cette colle est améliorée par l'addition d'une proportion de mélamine par co-condensation pour fournir des groupements aminés réactifs sans introduire des groupements hydrolysables (CN=O) dans le réseau [60]. La durée nécessaire au durcissement de la résine MUF ainsi que la température de réticulation sont plus élevées que celle de l'UF [61]. Dépendamment de sa concentration en mélamine, la résine MUF peut coûter jusqu'à trois fois le prix d'une résine UF conventionnelle sans toutefois remédier au problème d'émission de formaldéhyde post-durcissement [40].

2.3.4.4.3 Phénol-Formaldéhyde

Les résines phénoliques de type PF sont connues pour les bonnes propriétés mécaniques qu'elles procurent aux panneaux de particules ainsi que pour une résistance à l'eau meilleure que celle de l'UF [62]. Cependant, une température de cuisson entre 170 et 230 °C est requise pour lui garantir une bonne réactivité et la durée de pressage doit être entre 12 et 18s / mm d'épaisseur pour qu'elle adhère adéquatement aux particules [63]. La seule variante commerciale de la PF pour la fabrication des panneaux de particules est de type résols dont la structure est présentée à la figure 32.

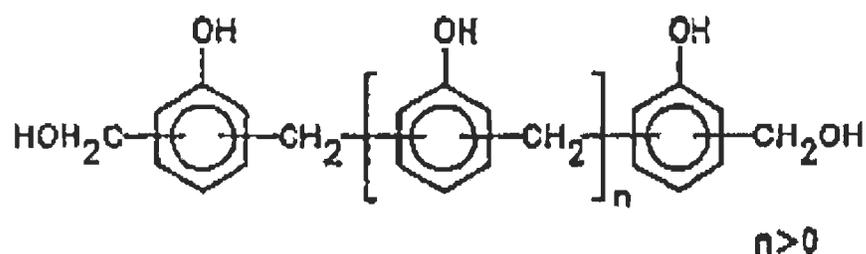


Figure 32 : Structure des résols de la PF [63]

La formation de résols, qui contiennent des groupements méthylol s'obtient avec une catalyse alcaline en présence d'un excès de formaldéhyde [64]. Ils s'activent à la suite d'une montée en température pour créer une structure macromoléculaire et leur polymérisation est due aux alcools phénoliques non condensés et au formaldéhyde libéré pour la création des ponts de type méthylène-éther et méthylène [64].

2.3.4.4.4 Tannins

Les tannins font partie d'une troisième génération de résines, succédant aux colles d'origine animale et synthétique (pétrochimique). Au même titre que la lignine et les carbohydrates, les tannins appartiennent à la famille de résines dites « biosourcées ». Plusieurs conditions objectives ont contribué à l'engouement de l'industrie pour leur développement, comme la montée en flèche du cours des carburants fossiles après le premier choc pétrolier de 1973 et le durcissement de la réglementation entourant l'émission de formaldéhyde. La figure 33 donne un aperçu de l'évolution chronologique des résines.

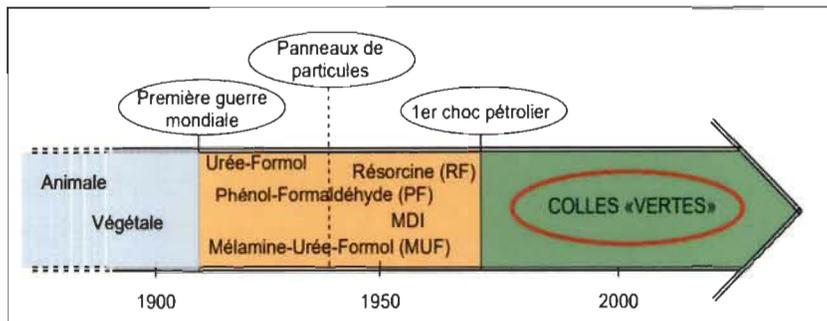


Figure 33 : Évolution chronologique des résines destinées à la fabrication des panneaux [65]

Hernes *et al.* (2000) et Kraus *et al.* (2003) soutiennent que les tannins représentent le quatrième constituant en importance dans la fibre lignocellulosique après la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [65-67]. Le phloème, situé dans la partie interne de l'écorce est reconnu pour être riche en tannins [68]. L'utilisation des tannins dans les panneaux de particules est articulée sur la substitution des phénols synthétiques avec les structures phénoliques polycycliques qu'elles renferment. Elles se distinguent également par une résistance à l'eau supérieure à celle des résines UF ainsi que par les bonnes propriétés mécaniques qu'elles permettent d'obtenir [69]. Les variantes commerciales de cette colle se présentent sous la forme de tannins condensés (figure 34) extraits pour la plupart de Mimosa et de Quebracho.

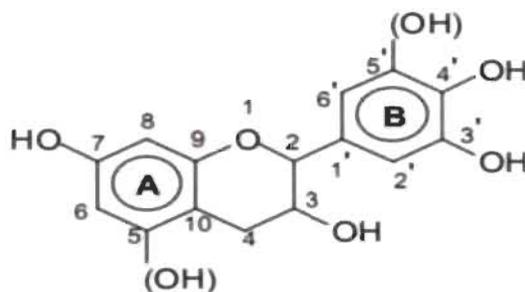


Figure 34 : Structure des tannins condensés [70]

Les recherches ont montré qu'à concentration égale, la viscosité des tannins est beaucoup plus élevée que celle des résines synthétiques à cause de leur poids moléculaire élevé, des liaisons d'hydrogène et des interactions électrostatiques entre ses éléments supramoléculaires [70]. Les tannins sont normalement formulés avec des résines synthétiques de type UF pour réduire leur potentiel d'émission de formaldéhyde, mais elles peuvent aussi réagir avec des réactifs organiques, communément appelés durcisseurs,

comme le paraformaldéhyde, la formurée ou l'hexaméthylènetétramine (ou hexamine $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) qui se décompose en formaldéhyde en milieu alcalin pour aboutir à des panneaux ayant des niveaux d'émission extrêmement bas [71]. Cependant, la résistance à l'eau des formulations tannins/ hexamine est limitée en comparaison aux durcisseurs de type paraformaldéhyde [72].

2.3.4.5 Proportion de liant dans les panneaux de particules

La proportion de résine dans les panneaux de particules fait partie des éléments qui peuvent avoir un impact sur leurs performances mécaniques et physiques. Lehman (1970), Maraghi et al. (2018) Bhadewad et al. (2018), et Wan Abd Rahman (2019) ont montré que l'augmentation de la teneur en liant améliore systématiquement les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) ainsi que sur la cohésion interne (IB) [73-76]. La quantité de résine disposée sur les surfaces des particules renforce en effet les liaisons par la multiplication des points d'ancrage avec la matière ligneuse. Le même constat est observé au niveau des propriétés physiques (absorption d'eau et gonflement en épaisseur). Les teneurs usuelles de résines employées en industrie sont présentées au tableau 9.

Tableau 9 : Proportions de résine employées selon leur type dans l'industrie [77]

Particle board	UF	4 % - 10 %	→ surface layer	8 % - 14 %
			→ core layer	4 % - 8 %
	PF	6 % - 8 %	→ surface layer	8 % - 12 %
			→ core layer	6 % - 9 %
	MDI	2 % - 6 %	→ surface layer	6 % - 8 %
			→ core layer	2 % - 4 %
OSB	PF	6 % - 8 %		
	MDI	2 % - 6 %		
MDF	UF	8 % - 14 %	→ in blow-line resin application	
	UF	6 % - 10 %	→ resin application to dry fibres	
	MUF	8 % - 12 %	→ for HDF as flooring quality	
	MDI	4 % - 10 %		
all panel types	wax	0.3 % - 2 %	applied as micro-crystalline wax emulsion or liquid paraffin	

A ce propos, il est important de mentionner que la résine représente de 40 à 60% du coût de revient des panneaux agglomérés [65]. Donc, bien que l'augmentation de la teneur en liant peut paraître une solution simple à emprunter pour améliorer les propriétés du

produit, elle risque de s'avérer plus coûteuse que la valeur ajoutée qu'elle peut lui procurer auprès de son utilisateur final.

2.3.4.6 Cycle de pressage

La configuration de pressage des panneaux de particules renvoie principalement à deux paramètres opératoires, soit la température de cuisson et la durée de fermeture de la presse chauffante sur le matelas. En réalité, durant cette étape de fabrication, l'ébauche formée de particules de bois préalablement encollées devient le siège d'un certain nombre de modes de transfert de masse et de chaleur, dont les conditions de déroulement portent une incidence directe sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux.

La température agit principalement sur la cinétique du transfert de chaleur du corps le plus chaud au corps le plus froid. La loi de Fourier (équation 2.3) met en évidence l'importante interaction entre la conductivité thermique du matériau et le gradient de température entre deux milieux adjacents en contact. Dans le cas des panneaux de particules, la faible conductivité thermique du bois exige qu'une température généralement plus élevée que celle requise à la polymérisation de la résine soit appliquée aux surfaces des plateaux chauffants. La conduction ainsi créée entre les parois métalliques de la presse et les particules aux surfaces de l'ébauche contribue, à accélérer l'élévation de la température au cœur du matelas.

$$\dot{q} = -k\nabla T \quad [2.3]$$

Où

\dot{q} : Flux de chaleur en W/m

k : Conductivité thermique du matériau en W/(mK)

T : Température en K

∇ : Gradient de température en m⁻¹

La durée de pressage prend toute son importance à partir du moment où l'eau liée des particules de bois et de la fraction liquide de la résine se transforme en vapeur et commence à migrer par filtration vers le centre du matelas, où la pression est moins élevée. Cet écoulement de chaleur est appelé convection et obéit à la loi de Newton (équation 2.4). Le déplacement de la vapeur d'eau véhicule la chaleur latente et la chaleur sensible qui vont faire poursuivre le processus d'extraction d'eau des particules du centre et sa conversion en vapeur (figure 35).

$$\dot{q} = hA(T_s - T_\infty) \quad [2.4]$$

Où

h : Coefficient de convection ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

A : Surface perpendiculaire à la direction du flux (m^2)

T_s : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du fluide (K)

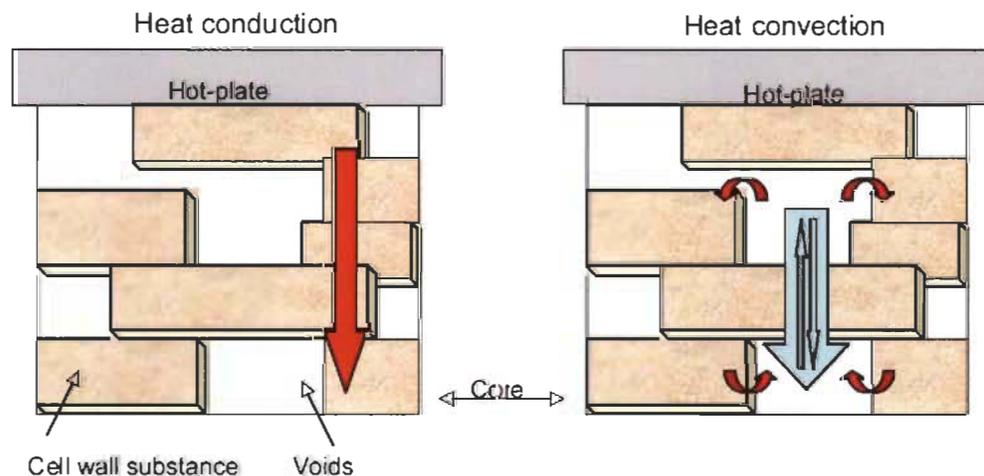


Figure 35 : Mécanismes de transfert de chaleur au cours du pressage à chaud [80]

Le transfert de la masse de vapeur d'eau et de l'air présent dans les cavités entre les particules est réalisé par convection en raison de la pression créée à l'intérieur du matelas par l'arrivée continue de la vapeur venant de la couche de surface. Le flux convectif est

donc transféré dans le milieu poreux de la matière ligneuse et obéit à la loi de Darcy (équation 2.5).

$$v = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad [2.5]$$

Où

V : Vitesse de déplacement du fluide en m/s

μ : Viscosité du fluide en Pa·s

K : perméabilité du milieu poreux au fluide en m^2

∇P : Gradient de pression en Pa

L'eau liée dans la phase adsorbée des particules de bois se déplace à travers l'ébauche par diffusion moléculaire grâce au gradient de la concentration chimique des molécules d'eau. Son mouvement est dicté par la loi de Fick's (équation 2.6). Malgré son occurrence, ce phénomène est considéré comme négligeable [78] et un équilibre isotherme de sorption est généralement assumé entre l'eau adsorbée à la surface des particules et la vapeur en déplacement [79]. La figure 36 expose les phénomènes de transfert de masse en jeu durant le pressage.

$$\dot{n}_v = -D_v \frac{d\varphi}{dx} = -D_v \nabla C \quad [2.6]$$

Où

\dot{n}_v : Flux de diffusion en $kg/(sm^2)$

D_v : Diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air en m^2/s

C : Concentration de la vapeur en kg/m^3 .

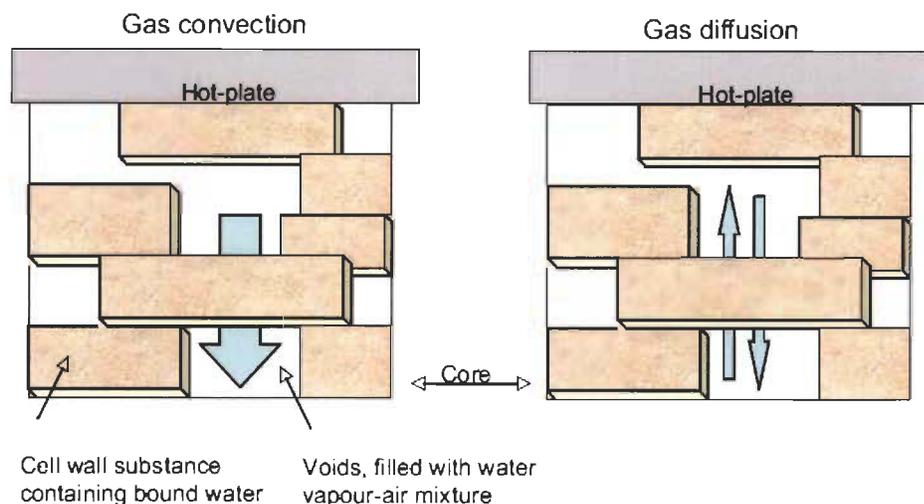


Figure 36 : Phénomènes de transfert de masse durant le pressage des panneaux [80]

Plusieurs expériences (USDA 1972, Moslemi 1974, Miyamoto et *al.* 2002) ont montré la relation entre la température et la durée de pressage [81, 82, 34]. L'augmentation de la température des plaques chauffantes accélère les transitions de phases liquide – vapeur de l'eau et liquide-gaz ensuite gaz – solide de la résine et permet de réduire la durée de pressage. Cette dernière peut d'ailleurs varier selon la teneur en humidité de l'ébauche, sa densité et la géométrie des particules [83]. Mais il est de pratique commune que la température maximale de pressage soit moins élevée que 230 °C, qui correspond au seuil à partir duquel la fibre de bois commence à se dégrader [84].

La teneur en humidité de l'ébauche est située en dessous du point de saturation des fibres [85-86]. Dans le cas des panneaux de particules, la matière ligneuse est généralement séchée à 2 jusqu'à 4% d'humidité, donnant lieu à une ébauche ayant une teneur en eau autour de 11% après encollage avec les résines synthétiques [40]. A ce titre, Sedano-Mendoza et *al.* (2010) ont démontré que les particules encollées avec une matrice de tannins ayant une teneur en humidité aussi élevée que 15% peuvent améliorer la cohésion interne des panneaux [118]. Avec les résines synthétiques, de tels niveaux d'humidité peuvent occasionner un excédent de vapeur au centre de l'ébauche durant le pressage, une augmentation surélevée de la pression et une polymérisation partielle de la résine. Ces conditions résultent à l'explosion du panneau ou son délaminage à l'étape de dégazage [87].

2.3.4.7 La norme ANSI 208.1-2016

La norme ANSI 208.1 est spécifiquement destinée aux panneaux de particules et a été publiée pour la première fois par l'American National Standards Institute (ANSI) en 1979 avec l'appui de la National Particleboard Association. Elle visait alors à actualiser son ancêtre développée par le département américain du commerce parue sous l'appellation CS236-66 et ayant cours depuis 1966. L'ANSI 208.1 a été révisée à plusieurs reprises, en 1987, 1989, 1993, 1999 et 2009. La fusion du National Particleboard Association et du Canadian Particleboard Association dans un seul organisme désigné Composite Panel Association en 1997 a conduit à la révision de 2009 de l'ANSI 208.1 pour uniformiser ses exigences avec les standards internationaux.

La principale nouveauté énoncée à la version de 2016 de la norme par rapport à l'édition de 2009 porte sur les émissions de formaldéhyde des panneaux de particules commercialisés aux États-Unis. Les spécifications techniques de la norme sont résumées au tableau 10.

Tableau 10 : Exigences des différents grades de panneaux de particules selon la norme ANSI 208.1-2016

<i>Grade</i>	<i>MOE (MPa)</i>	<i>MOR (MPa)</i>	<i>IB (MPa)</i>	<i>Dureté (N)</i>
<i>LD-1</i>	500	2,8	0,1	N.S
<i>LD-2</i>	500	2,8	0,14	N.S
<i>M-0</i>	1380	7,6	0,31	N.S
<i>M-1</i>	1550	10	0,36	N.S
<i>H-1</i>	2160	14,9	0,81	N.S
<i>PBU</i>	1725	11	0,4	2225

Les grades sont codifiés en fonction de leurs densité et type d'application :

- LD : Panneaux ayant une densité inférieure à 640 kg/ m^3
- M : Panneaux ayant une densité entre 640 kg/ m^3 et 800 kg/ m^3
- H : Panneaux ayant une densité supérieure à 800 kg/ m^3
- PBU : Panneaux de sous-couche de plancher (*flooring*)

2.3.4.8 Détection de défauts par imagerie à ultrasons

L'inspection non destructive des produits composites à base de bois est une discipline qui a fait l'objet de nombreux progrès durant les dernières années. Plusieurs techniques basées sur les rayons-X, la radiographie par rayons gamma (γ), la thermographie ou encore les ultrasons ont été mises à contribution pour détecter les défauts dans les agglomérés de bois. Le plus important problème de non-qualité rencontré dans les composites à base de bois est le délaminage [88]. Ce phénomène prend généralement la forme d'une fissure entre les couches ou les particules de bois occasionnée par une mauvaise adhésion de la résine et se produit dans la plupart des cas à l'intérieur du panneau, rendant ainsi plus ardue son identification à l'œil nu.

Parmi toutes les techniques de contrôle non destructif, les méthodes basées sur les ultrasons apparaissent comme étant les plus populaires, en raison de la facilité de leur intégration en usine et le coût abordable des instruments qu'elles requièrent [88]. Les ondes ultrasonores se situent au-dessus de la plage de fréquence audible par l'oreille humaine limitée à 20 kHz et se propagent dans l'échantillon examiné au moyen de capteurs piézo-électriques ou capacitifs qui jouent le rôle d'émetteur-récepteur pour déterminer les constantes ultrasonores comme le temps de vol (Time Of Flight) et l'atténuation [89].

La plus récente évolution en matière d'inspection ultrasonique des produits ligneux a été amenée par l'introduction de transducteurs sans contact, ayant la capacité de traverser l'air sans perturbation notable de l'onde. Ces capteurs ont rendu caduques l'immersion

dans l'eau des échantillons (figure 37) ou l'application d'un gel pour guider l'onde ultrasonore entre le capteur et l'objet à inspecter, altérant ainsi sa teneur en humidité.

Lynnworth et *al.* (1997) rapportent que la plage de fréquences applicable pour les transducteurs ultrasoniques utilisés dans l'industrie du bois se situe entre 50 et 500 kHz [91]. Les hautes fréquences permettent d'améliorer la résolution, mais augmentent aussi l'atténuation et réduisent la capacité de l'onde à traverser les matières denses et épaisses [92]. Les expériences de Bucur (2011) ont démontré l'intérêt de l'utilisation des basses fréquences pour identifier les défauts globaux dans les panneaux. La détection de petits défauts est quant à elle favorisée avec des capteurs à fréquences élevées [93].

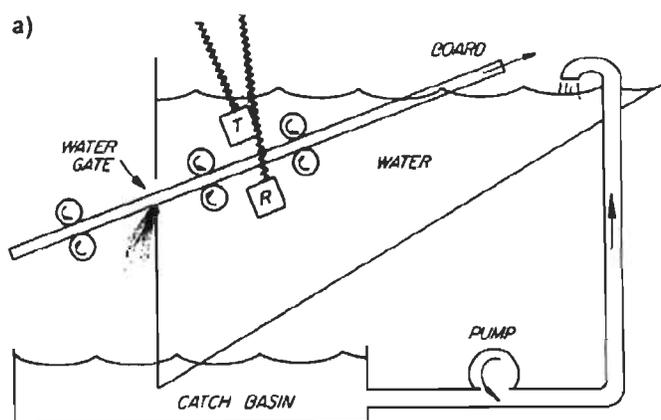


Figure 37 : Inspection ultrasonore par immersion [90]

L'échographie ultrasonore est réalisée selon trois modes de lecture : on parle de A-Scan, B-Scan et C-Scan (figure 38) [88]. La lecture en A-Scan permet de connaître l'amplitude du signal sur l'axe des ordonnées et le temps parcouru par l'onde sur l'axe des abscisses pour une position donnée de l'échantillon. Le mode B-Scan donne une vue en coupe verticale du matériau inspecté avec une palette de couleur dégradée selon l'amplitude du signal détecté. La lecture en C-Scan, donne une vue sur les défauts parallèles à la surface du matériau analysé, leur profondeur est indiquée selon l'amplitude du signal mesuré et est associée à une couleur d'affichage prédéfinie dans l'analyseur.

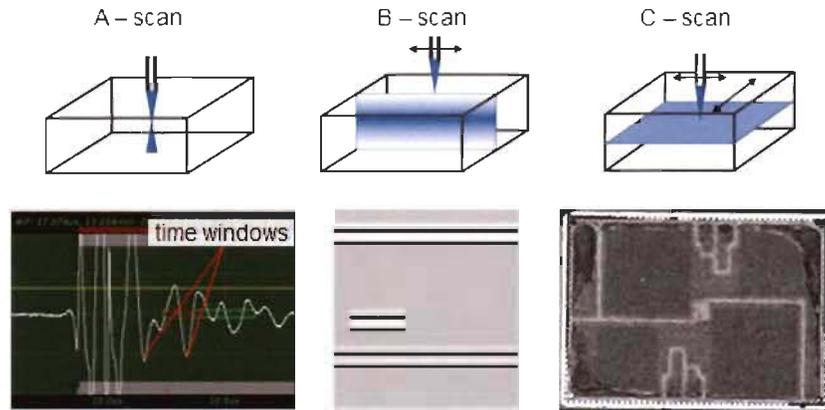


Figure 38 : Les modes de lecture A-Scan, B-Scan et C-Scan [94]

Les travaux de Blomme *et al.* (2010) ont démontré que les zones de délamination provoquent l'augmentation du temps de vol (TOF) et la réduction de l'atténuation de l'onde ultrasonore [95]. Les défauts engendrés par une polymérisation partielle de colle ou par une mauvaise compaction des particules sont donc détectables avec l'imagerie à ultrasons sans contact (figure 39) moyennant une bonne calibration de l'équipement et le choix de transducteurs ayant une fréquence capable, à la fois de révéler les fissures de délaminage et de traverser la section complète du spécimen analysé [96].

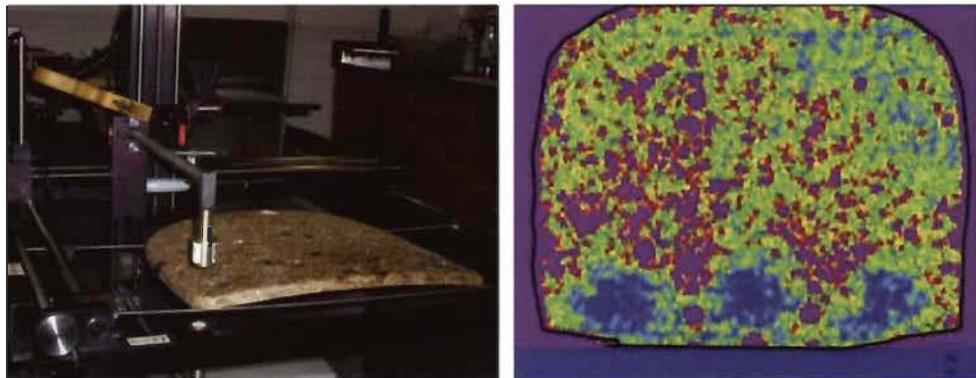


Figure 39 : Analyse ultrasonore sans contact en mode C-Scan [97]

Chapitre 3 - Objectifs

Ce projet vise à explorer le potentiel d'utilisation de broyats de bois de CRD générés par une installation de tri de troisième génération dans la fabrication des panneaux de particules. Cette voie de valorisation, non documentée dans la littérature pour les résidus issus de ce gisement, mérite que l'on s'y attarde pour répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- 1) Déterminer l'importance de l'effet de la densité, la teneur en résine, la durée de pressage et sa température sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux fabriqués à base de bois de CRD;
- 2) Comparer la réaction de trois systèmes de résines, dont deux de source pétrochimique (PF et MUF) et une de nature biosourcée (tannins – hexamine) et évaluer leur performance en comparaison avec la norme ANSI 208.1-2016;
- 3) Valider la possibilité d'utilisation de la méthode de détection de défauts par imagerie à ultrasons sans contact sur la base de l'atténuation de l'onde.

L'originalité de ce projet réside dans l'utilisation de 100% de particules de bois de CRD dans la fabrication des panneaux de particules en identifiant les conditions opératoires optimales visant à satisfaire les exigences normatives énoncées à l'ANSI-208.1-2016.

Chapitre 4 - Matériels et méthodes

4.1 Matériels

4.1.1 Particules de bois de CRD

Les particules de bois de CRD ont été récoltées auprès de l'entreprise *BRQ Fibre et Broyure Inc.*, basée au parc industriel des Hautes Forges à Trois-Rivières et spécialisée dans le conditionnement, le tri et la transformation des résidus de CRD. La ligne opérationnelle ultra-moderne de l'usine la hisse au rang des installations de tri de troisième génération pouvant traiter un volume annuel entre 80 000 et 100 000 tonnes de résidus de toute provenance (bois de CRD, résidus d'émondage, bois d'écocentres, palettes de manutention usagées, bois de calage et arbres infestés par l'agrile du frêne).

Les broyats produits par *BRQ* sont obtenus à partir d'un procédé alliant tri optique et manuel et combinant les modes de tri positif et négatif dans le but de produire des particules ligneuses de grande qualité et sans corps étrangers (figure 40).



Figure 40 : Produit fini de *BRQ Fibre et Broyure Inc.*

Les étapes de traitement de la ligne de *BRQ* sont réalisées selon cet ordre :

1. Criblage primaire et séparation par densité (Air Knife)
2. Tri optique et manuel du bois (positif et négatif)
3. Broyage avec un Rotochopper B66
4. Tamisage vibrant de finition avec un Terex Finlay 694+

Les particules utilisées dans le cadre de ce projet sont de calibre intermédiaire, tamisées dans la plage granulométrique suivante [1/4 po – 3/4 po], soit [6.35 mm – 19.05 mm].

4.1.2 Résines, durcisseurs et paraffine

4.1.2.1 Résine Phénol-Formaldéhyde (PF)

Une résine commerciale, fabriquée par *LRBG Chemicals*, portant la référence de produit PB-4557, destinée à la fabrication des panneaux de particules et MDF a été utilisée dans le cadre de ce projet. Cette colle est préalablement catalysée en usine et ne requiert aucune addition d'agent durcisseur. Il s'agit d'une solution liquide de couleur marron.

4.1.2.2 Résine Mélamine-Urée-Formaldéhyde (MUF)

La résine MUF utilisée dans le cadre de ce projet consiste en un produit commercial fabriqué par l'entreprise *Arclin* dont la concentration en mélamine est de 1.4 %. Cette résine, est conçue pour la fabrication de différents types de produits composites à base de bois et nécessite, selon la recommandation du fabricant, l'addition d'un agent réticulant, comme le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (figure 41) durant la préparation à hauteur de 1 %. La MUF fournie par Arclin est une solution liquide de couleur blanche.



Figure 41 : Durcisseur de Sulfate d'ammonium utilisé avec la résine MUF

Le sulfate d'ammonium utilisé dans le cadre de ce projet est produit par *Anachemia* et porte le code suivant : 7783-20-2.

4.1.2.3 Résine de Tannins

La résine de tannins utilisée est commercialisée par l'entreprise italienne *SilvaTeam* sous l'appellation Fintan 737. Le fabricant recommande l'addition de 4 à 6 % d'hexaméthylènetétramine (hexamine) à cette colle extraite du bois de quebracho pour favoriser sa polymérisation. Le Fintan 737 est une résine en poudre de couleur brune (figure 42).

La solution d'hexamine ($(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) (figure 43) formulée avec les tannins est un produit de la compagnie *Sigma-Aldrich* portant le code suivant : H11300.



Figure 43 : Hexamine de Sigma-Aldrich



Figure 42 : Tannin Fintan 737

4.1.2.4 Paraffine

La paraffine Norwax 527 fabriquée par *Walker Emulsions* a été utilisée dans la fabrication des panneaux fabriqués avec les trois systèmes de résine. Le produit Norwax 527 est spécifiquement destiné aux panneaux de particules et permet d'améliorer leur stabilité dimensionnelle et leur résistance à l'eau (figure 44). Elle doit être utilisée à de très faibles proportions (entre 0.3 et 2 %) pour ne pas altérer les propriétés mécaniques du produit fini.



Figure 44 : Paraffine Norwax 527 de Walker Emulsions

4.2 Méthodes

4.2.1 Caractérisation des particules de bois

Une série de caractérisations physicochimiques a été réalisée sur les particules de bois produites par BRQ préalablement échantillonnées par la méthode des quartages. Ces tests ont été réalisés aux laboratoires d'Innofibre, qui est un Centre collégial de transfert de technologie (CCTT) spécialisé dans le conditionnement et la transformation de la biomasse résiduelle et des procédés papetiers. L'objectif étant de déterminer les différentes propriétés selon les méthodes ci-après indiquées :

- Teneur en humidité (ASTM D 4442-92);
- Teneur en cendres (ASTM D1102-84);
- Distribution granulométrique (méthode interne);
- Coefficient d'élanement (méthode interne);
- Densité après conditionnement thermique (ASTM E873-82).

4.2.1.1 Teneur en humidité

Pour mesurer cette propriété, un échantillon brut de 150g a été séché dans un four à 105 °C +/- 5°C jusqu'à la stabilisation du poids du creuset. La teneur en eau est ensuite calculée selon la formule 4.1 :

$$H\% = \frac{M_h - M_0}{M_0} \times 100 \quad [4.1]$$

Où

H% : Teneur en humidité des particules en %

M_h : Masse du bois humide en g

M₀ : Masse du bois anhydre après séchage à 105 °C en g

4.2.1.2 Teneur en cendres

La caractérisation de la teneur en cendres se réalise après le broyage d'un échantillon de 20 g de matière brute à moins de 1 mm. L'échantillon est ensuite chauffé à 550 °C pendant plusieurs heures jusqu'à la stabilisation du poids du creuset. La teneur en cendre est calculée selon la formule 4.2 :

$$C\% = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad [4.2]$$

Où

C% : Teneur en cendres des particules en %

M₁ : Masse de la nacelle en g

M₂ : Masse de la nacelle et de l'échantillon en g

M₃ : Masse de la nacelle et des cendres en g

4.2.1.3 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique a été déterminée en tamisant un échantillon de 1 kg de particules pendant 10 min dans un équipement de laboratoire de type Ro-Tap (figure 45) avec 9 sous-classes granulométriques. Les diamètres de mailles utilisés sont indiqués au tableau 11.

Tableau 11 Tamis utilisés dans le Ro-Tap

<i>Diamètres de tamis</i>
<i>20 mm</i>
<i>14 mm</i>
<i>7 mm</i>
<i>5 mm</i>
<i>3 mm</i>
<i>1.68 mm</i>
<i>500 μm</i>
<i>150 μm</i>



Figure 45 : Tamis Ro-Tap

4.2.1.4 Coefficient d'élançement

Ce paramètre a été déterminé en mesurant à l'aide d'un pied à coulisse numérique la longueur et l'épaisseur de 20 particules choisies au hasard de chaque plage granulométrique supérieure à 5 mm.

4.2.1.5 Densité apparente après conditionnement thermique

La densité apparente a été mesurée après conditionnement thermique des particules de bois à une teneur en humidité de 3 à 5 % à l'aide d'un cube normalisé et préalablement taré ainsi qu'une balance numérique AND GX-6100 (figure 46).



Figure 46 : Montage de détermination de la densité apparente

4.2.2 Caractérisation des résines

Les résines ont été caractérisées après addition de durcisseur et ajustement de la teneur en eau à 50% pour déterminer les propriétés suivantes :

- Viscosité
- Temps de gel

4.2.2.1 Viscosité

La viscosité a été mesurée avec un viscosimètre Brookfield modèle DV-II+Pro (LV) à température ambiante de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ (figure 47). La tige utilisée et sa vitesse de rotation ont été ajustées pour assurer une bonne précision de mesure, donnée par une torsion $\geq 90\%$.



Figure 47 : Viscosimètre D-II+Pro (LV)

4.2.2.2 Temps de gel

Le temps de gel a été mesuré à l'aide d'un Sunshine Gel Time Meter 22A (figure 48) en utilisant de l'huile de silicone comme liquide chauffant selon la procédure suivante :

- Amener le bain chauffant à une température de 130°C ;
- Placer une quantité de 2 g de l'échantillon dans le tube à essai et insérer une tige de verre propre;
- Placer le tube à essai et son contenu dans le bain et alimenter l'unité de contrôle. Cette action permet d'enclencher le moteur et le chronomètre;

- Connecter la tige de verre à son support magnétique et ajuster l'alignement du tube à essai afin que la tige de verre se situe au milieu du tube à essai;
- Activer le bouton Test et attendre l'arrêt du moteur, du chrono et le signal sonore annonçant l'atteinte du temps de gel.



Figure 48 : Le gel mètre Sunshine 22A

4.2.3 Caractérisation des durcisseurs et de la paraffine

Les agents réticulants (durcisseurs) et la paraffine ont été caractérisés au niveau de leurs teneurs en humidité pour les besoins du calcul visant à déterminer la quantité de chaque constituant à incorporer dans la recette de fabrication du panneau.

4.2.4 Méthode de calcul des constituants des panneaux

Pour calculer la quantité de chaque constituant dans un panneau à fabriquer, il faut d'abord assumer que la masse finale d'un panneau soit définie comme étant la résultante des éléments présentés à la formule 4.3 :

$$M_{HP} = M_{OB} + M_{OL} + M_{eau} + M_{cire} + \dots + M_x \quad [4.3]$$

Où

M_{HP} : Masse humide du panneau (kg)

M_{OB} : Masse anhydre du bois (kg)

M_{OL} : Masse anhydre du liant (kg)

M_{eau} : Masse d'eau (kg)

M_{cire} : Masse de cire (paraffine) (kg)

M_x : Masse de toute autre composante (kg)

La masse du panneau après pressage peut s'exprimer aussi selon la formule 4.4

$$M_{HP} = D_{HP} \times V_{HP} \quad [4.4]$$

Où

D_{HP} : Densité du panneau à une teneur en humidité donnée H% en kg/m³

V_{HP} : Volume du panneau en m³

La teneur en humidité du panneau est exprimée selon la formule 4.5 :

$$H_P = \frac{M_{eau}}{M_0} \times 100 \quad [4.5]$$

En combinant les équations 4.3 et 4.5, on obtient alors l'équation 4.6 :

$$H_P = \frac{M_{eau}}{M_{OB} + M_{OL} + M_{eau} + M_{cire} + \dots + M_x} \times 100 \quad [4.6]$$

La quantité de chaque constituant entrant dans la fabrication des panneaux de particules est exprimée en fonction de la masse anhydre des particules de bois. La teneur en humidité des particules est donc exprimée selon la formule 4.7 :

$$H_{Bi} = \frac{M_{eau\ i}}{M_{0Bi}} \times 100 \quad [4.7]$$

Où

H_{Bi} : Teneur en humidité des particules de la couche i (%)

M_{0Bi} : Masse anhydre de particules dans la couche i (kg)

La teneur en liant est déterminée selon la formule 4.8 :

$$L_i = \frac{M_{OLi}}{M_{0Bi}} \times 100 \quad [4.8]$$

Où

L_i : Teneur en liant de la couche i (%)

M_{OLi} : Masse anhydre de liant dans la couche i (kg)

La teneur en cire est exprimée selon la formule 4.9 :

$$C_i = \frac{M_{Ci}}{M_{0Bi}} \times 100 \quad [4.9]$$

Où

C_i : Teneur en cire de la couche i (%)

M_{Ci} : Masse de cire dans la couche i (kg)

Lorsque le liant est sous forme de matrice liquide, son contenu en eau doit être considérée à l'aide de la formule 4.10 :

$$S_L = \frac{M_{OL}}{M_{HL}} \times 100 \quad [4.10]$$

Où

M_{0L} : Masse anhydre du liant (kg)

M_{HL} : Masse du liant liquide (kg)

Lors de l'encollage des particules, on considère généralement un excédent de chaque constituant du panneau pour contrebalancer l'effet des pertes dans le mélangeur à colle, par exemple, pour la préparation de N panneaux, quand on définit une perte de 10%, la masse totale des constituants à prévoir est calculée selon les formules 4.11 et 4.12 :

$$M_{Totale} = M \times N \times (1 + 10\%) \quad [4.11]$$

$$M_{Totale} = (M_{0B} + M_{0L} + M_{eau} + M_{cire} + \dots + M_x) \times N \times (1 + 10\%) \quad [4.12]$$

4.2.5 Méthode de fabrication des panneaux

Les étapes de fabrication des panneaux ont été réalisées aux laboratoires du Serex, qui est un centre collégial de transfert de technologie (CCTT) basé à Amqui et spécialisé dans la transformation des produits forestiers.

4.2.5.1 Séchage des particules

Les particules de bois de CRD ont été d'abord placées dans un séchoir à biomasse pour procéder à leur conditionnement thermique. L'équipement consiste en un séchoir conventionnel de type conteneur ayant une profondeur de 16 pi. La température de séchage est contrôlée par un ordinateur lié à une série de thermocouples placés à différents endroits du conteneur (figures 49 et 50).

- La durée de séchage a été fixée à 72 h;
- La température du séchoir a été définie à 160 °C;
- Les particules ont été retournées à toutes les 24 h.



*Figure 50 Station de contrôle numérique
du séchoir*



Figure 49 : Particules de bois

4.2.5.2 Formulation des résines et encollage

Les résines ont été mélangées aux durcisseurs selon les proportions prédéfinies et une addition d'eau a été effectuée afin que la teneur en humidité finale soit à 50% pour les trois systèmes d'adhésifs. L'addition d'eau avait également pour but de favoriser leur vaporisation par les buses pneumatiques de l'encolleuse. La formulation des résines avec le catalyseur, agent de durcissement et l'eau a été réalisée avec un agitateur motorisé selon une fréquence de rotation de 500 rpm (figure 51).



Figure 51 : Préparation de la formulation de la résine à base de tannins – hexamine

L'encollage a été effectué après la dispersion de la paraffine en émulsion dans un appareil à tambour rotatif muni d'un système d'atomisation de résine au moyen d'une pompe pneumatique et une série de buses (figure 52). La vitesse d'encollage a été ajustée pour vaporiser 120 g de résine par minute.



Figure 52 : Système d'encollage

4.2.5.3 Feutrage

Les ébauches ont été préparées dans un moule carré en bois ayant une dimension de 500 mm². Une plaque métallique et une feuille de papier de cuisson ont été posées de part et d'autre pour faciliter la manutention de l'ébauche vers la presse et empêcher le collage du panneau aux plaques chauffantes (figure 53).



Figure 53 : Étapes de feutrage des ébauches

4.2.5.4 Pressage

Le pressage des panneaux a été réalisé par une presse chauffante de marque *Dieffenbacher*, modèle ARC-450 pouvant appliquer une pression allant jusqu'à 4000 kN. L'équipement est contrôlé automatiquement par une interface numérique permettant d'ajuster l'épaisseur finale du panneau, la durée et la température de pressage (figure 54).



Figure 54 : Presse chauffante Dieffenbacher ARC-450

4.2.5.5 Refroidissement et découpage

Une fois pressés, les panneaux ont été entreposés à température ambiante $21 \pm 1^\circ\text{C}$ pendant 120 h avant d'être découpés à une dimension de 440 mm^2 (figure 55).



Figure 55 : Refroidissement et découpage des panneaux

4.2.6 Méthodes de caractérisation

4.2.6.1 Balayage par imagerie à ultrasons

Avant de procéder aux tests destructifs, les panneaux ont été scannés par un système d'imagerie à ultrasons Ultran U710x-540i disponible au Serex et présenté à la figure 56.



Figure 56 : Analyseur à ultrasons Ultran U710x-540i

La fréquence des transducteurs ainsi que les paramètres d'analyse ont été déterminés après la réalisation de plusieurs itérations de balayage avec un étalon de calibration fabriqué spécifiquement pour les besoins du projet, et comportant plusieurs perforations rondes et carrés selon le patron présenté à la figure 57. Le sandwich est formé par 4 planches de bois superposées et collées l'une sur l'autre donnant une masse volumique totale de 850 kg/ m^3 .

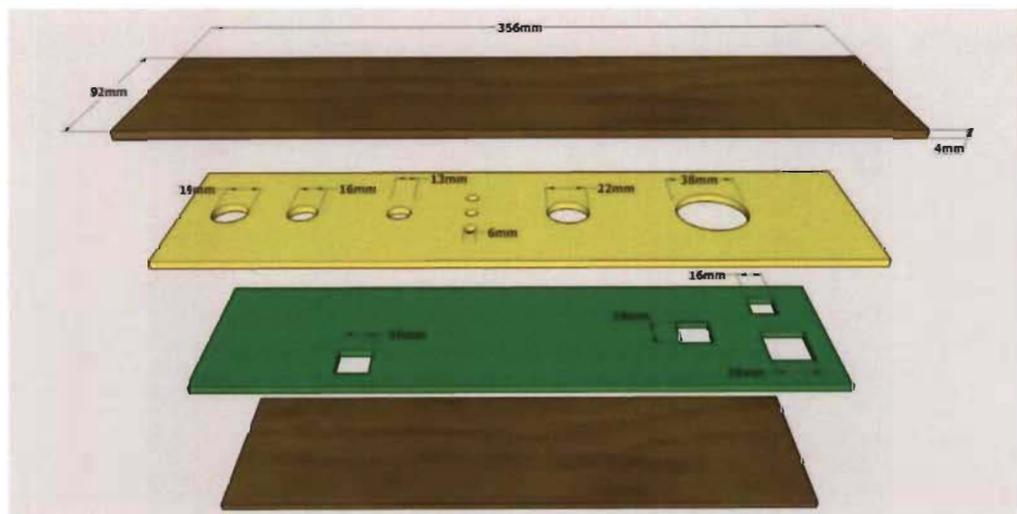


Figure 57 : Étalon de calibration pour l'analyseur à ultrasons

4.2.6.2 Caractérisation des propriétés mécaniques et physiques

La caractérisation des propriétés mécaniques et physiques des panneaux a été réalisée dans les laboratoires du Serex selon les normes ASTM et EN indiquées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Propriétés inspectées et normes utilisées

Propriété caractérisée	Norme employée
Module d'élasticité (MOE)	ASTM D1037-12 (section 9)
Module de rupture (MOR)	ASTM D1037-12 (section 9)
Dureté Janka	ASTM D1037-12 (section 17)
Cohésion interne (IB)	ASTM D1037-12 (section 11)
Gonflement en épaisseur (TS)	EN 317

4.2.6.3 Plan de découpage des panneaux

Le plan de découpage retenu pour réaliser les tests de caractérisation mécanique et physique est présenté à la figure 58.

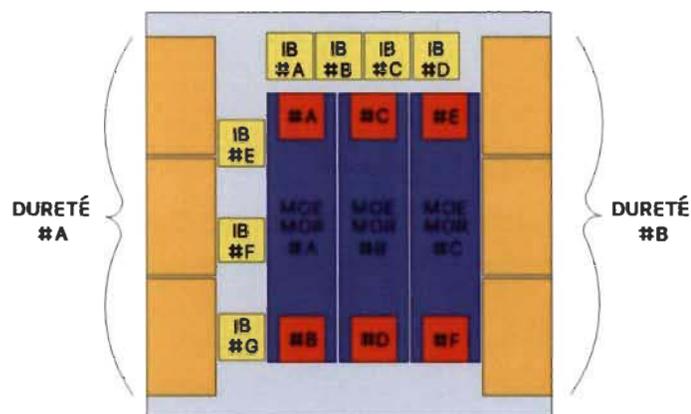


Figure 58 : Plan de découpage des panneaux

Le tableau 13 présente le nombre d'échantillons par type de test ainsi que leurs dimensions.

Tableau 13 : Nombre d'échantillons examinés par test et leurs dimensions

Propriété caractérisée	Nombre d'échantillons / panneau	Dimensions d'un échantillon
Module d'élasticité (MOE)	3	290 mm x 75 mm
Module de rupture (MOR)	3	290 mm x 75 mm
Dureté Janka	6 (3 par test)	127 mm x 75 mm
Cohésion interne (IB)	7	50 mm x 50 mm
Gonflement en épaisseur (TS)	6	50 mm x 50 mm

4.2.6.4 Appareils d'essais mécaniques et physiques

La caractérisation des modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) ainsi que la dureté Janka et la cohésion interne (IB) a été réalisée sur le même appareil universel de marque Instron, modèle 3366 ayant une capacité de cellule de charge équivalente à 10 kN. Les photos illustrant les différents tests sont présentées à la figure 59.



Figure 59 : Le test de flexion 3 points pour déterminer le MOE et le MOR, le test de dureté Janka et le test de cohésion interne (IB)

L'essai de gonflement en épaisseur (TS) a été réalisé dans un bassin en acier inoxydable, rempli d'eau à température ambiante 21 ± 1 °C où un porte échantillon est immergé. La mesure du gonflement en épaisseur est faite à trois reprises, la première correspond à l'épaisseur initiale tandis que la deuxième et la troisième sont effectuées respectivement après 2h et 24h d'immersion. Le dispositif de test est montré à la figure 60.



Figure 60 : Dispositif de test du gonflement en épaisseur

4.2.7 Plan d'expérience

Les plans d'expériences se définissent comme étant un outil statistique permettant d'organiser un nombre minimal d'essais pour découvrir l'effet de k facteurs à 2 niveaux ou plus. Les expériences réalisées dans le cadre de ce projet ont été conduites selon un design expérimental à 4 facteurs et deux niveaux, soit 2^4 . Avec les méthodes traditionnelles, il aurait normalement fallu réaliser 16 expériences par système de résine pour balayer toutes les combinaisons de facteurs nécessaires à l'identification de leurs effets. Le plan d'expérience de type factoriel fractionnel permet toutefois de dégager les mêmes renseignements pour les effets principaux et certaines interactions en réalisant uniquement 8 essais par système de résine. Pour les besoins du présent projet, il a été jugé utile d'ajouter 2 points centraux dans chaque plan expérimental afin de mieux cerner la plage de variation due à l'erreur expérimentale et à l'hétérogénéité du bois de CRD. Les niveaux haut et bas du plan expérimental ont été fixés à partir des informations consultées durant la préparation de la revue de littérature. Les facteurs étudiés ainsi que leurs niveaux haut et bas sont résumés au tableau 14.

Tableau 14 : Facteurs et niveaux du plan d'expérience

<i>Facteur</i>	<i>Niveau haut (+1)</i>	<i>Niveau bas (-1)</i>	<i>Point central (0)</i>
<i>Densité (kg/m³)</i>	900	600	750
<i>Teneur en résine (%)</i>	12	8	10
<i>Température de pressage (°C)</i>	220	180	200
<i>Durée de pressage (s/ mm d'épaisseur) *</i>	15	9	12

* Il est communément admis dans les milieux scientifiques et industriels que la durée de pressage des panneaux soit indiquée en s/ mm d'épaisseur des panneaux.

Les itérations du plan d'expérience selon les facteurs et les niveaux prédéfinis ont été générées et traitées statistiquement à l'aide du logiciel JMP[®] Pro version 15.1. Le plan factoriel fractionnel réalisé sur les systèmes de résine PF, MUF et tannins est présenté au tableau 15.

Tableau 15 : Plan d'expérience à réaliser par système de résine

<i>Numéro de config.</i>	<i>Densité (kg/ m³)</i>	<i>Teneur en résine (%)</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Durée (s/ mm)</i>
1	600	8	180	9
2	600	12	180	15
3	900	8	220	9
4	600	12	220	9
5	600	8	220	15
6	900	12	180	9
7	750	10	200	12
8	750	10	200	12
9	900	12	220	15
10	900	8	180	15

Enfin, les conditions communes à toutes les expériences sont indiquées au tableau 16.

Tableau 16 : Conditions partagées pour toutes les expériences

<i>Condition</i>	<i>Valeur</i>
<i>Temps de fermeture des plateaux</i>	20 secondes
<i>Temps de décompression</i>	40 secondes
<i>Nombre de couches / panneau</i>	1
<i>Teneur en humidité des particules</i>	3 – 5%
<i>Teneur en humidité des résines (après ajout de durcisseur et d'eau)</i>	50%
<i>Systèmes de résines (un type de résine par plan expérimental)</i>	PF tel que fournie MUF + 1% de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Tannins + 6% de $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$
<i>Teneur en paraffine</i>	0.4%
<i>Dimensions du panneau (Longueur x largeur x épaisseur)</i>	500 mm x 500 mm x 10 mm
<i>Humidité cible du panneau</i>	8%

Chapitre 5 - Résultats et discussion

5.1 Caractérisation physico-chimique des particules de bois

Les particules du produit fini de calibre intermédiaire fabriqué par *BRQ Fibre et Broyure Inc.* ont été caractérisées à l'état brut pour identifier leurs principales propriétés physico-chimiques. Le produit est présenté à la Figure 61.



Figure 61 : Particules de calibre intermédiaire de BRQ

5.1.1 Teneurs en humidité et en cendres

La teneur en humidité mesurée des particules se situe en dessous du point de saturation des fibres (25 – 30 %). Quant à leur teneur en cendres moyennes, le produit affiche un faible contenu en matière inorganique. Les résultats sont montrés au tableau 17.

Tableau 17 : Teneurs en humidité et en cendres moyennes

Propriété	Valeur
Teneur en humidité (%)	23.64
Teneur en cendres (%)	1.28

5.1.2 Distribution granulométrique

Selon le profil granulométrique exposé au tableau 18 et à la figure 63, on constate la présence de 14.06% de particules inférieures à 5mm. La plupart des particules analysées

se trouvent dans les plages [5mm ; 7mm], [7mm ; 14mm] et [14mm ; 20mm] avec respectivement 20.4 %, 31.9 % et 33.5 %.

Tableau 18 : Distribution granulométrique des particules

Plage (mm)	Passant (%)	Passant cumulatif (%)
> 20	0,000	100,00
[14 ; 20]	33,530	100,00
[7 ; 14]	31,980	66,47
[5 ; 7]	20,433	34,49
[3 ; 5]	8,140	14,06
[1.680 ; 3]	1,430	5,92
[0.500 ; 1.680]	2,677	4,49
[0.150 ; 0.500]	1,350	1,81
[0 ; 0.150]	0,460	0,46

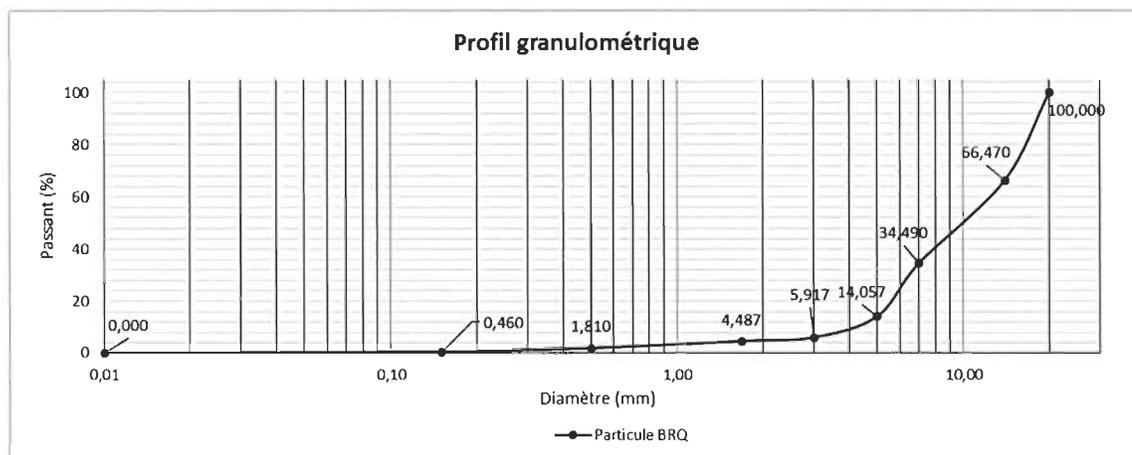


Figure 62 : Profil granulométrique des particules de BRQ

5.1.3 Coefficient d'élongement

Le coefficient d'élongement des plages granulométriques supérieures à 5 mm est présenté au tableau 19. Les résultats du coefficient d'élongement montrent une variation importante dans toutes les plages granulométriques. La sous-classe comprise entre 5 et 7 mm indique une valeur moyenne de 18.28 avec un écart-type de 7.98. Ce dernier se

recentre autour de 4 pour les plages allant de 7 à 14 mm et 14 à 20 mm avec des valeurs moyennes mesurées respectivement à 11.93 et 11.02.

Tableau 19 : Coefficient d'élanement des 3 sous classes granulométriques supérieures à 5 mm

Plage granulométrique	Moyenne du C_e	C_e Min	C_e Max	Écart-Type
[5mm ; 7mm]	18.28	8.34	37.36	7.98
[7mm ; 14mm]	11.93	4.17	20.45	4.16
[14mm ; 20mm]	11.02	6.08	20.81	4.09

5.1.4 Densité apparente

La mesure de la densité apparente des particules après conditionnement thermique donne une valeur de **164.42 kg/ m³**.

5.2 Caractérisation des résines

5.2.1 Viscosité

La mesure de la viscosité des trois résines avant et après ajout de durcisseur et ajustement de la teneur en humidité à 50 % est donnée au tableau 20.

Tableau 20 : Viscosité des trois systèmes de résines avant et après ajustement de propriétés

Système de résine	PF		MUF		Tannins	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Ajustement						
Température (°C)	22	21	21.5	21	22	21
Vitesse (rpm)	65	42	96	150	36	19
Réf. tige (spindle)	Sc4-31	Sc4-18	Sc4-31	Sc4-18	Sc4-31	Sc4-31
Torsion (%)	94.4	94.7	97.7	94.8	96.57	96.5
Viscosité (cP)	436.1	67.63	304.6	18.96	787.3	1522

Pour le cas des résines synthétiques (PF et MUF), on note que l'addition d'eau et du durcisseur (MUF) entraînent une baisse accentuée de la viscosité favorisant ainsi leur dispersion uniforme dans l'encolleuse. Ce n'est néanmoins pas le cas des tannins qui à 50 % de teneur en eau affiche une viscosité de 787.3 cP, et pour qui l'ajout de l'hexamine fait monter drastiquement la viscosité à 1522 cP. Moubarik et *al.* (2009) a observé une augmentation similaire de la viscosité d'une résine de tannins de quebracho et de mimosa par l'addition de 5 % d'hexamine [119]. Pour remédier à ce problème, une étude réalisée par Gonultas (2018) propose de baisser le contenu en solides des résines de tannins entre 40 % et 45 % dans le but d'atténuer leur viscosité et optimiser leurs propriétés d'adhésion [120].

5.2.2 Temps de gel

La mesure du temps de gel a été effectuée en duplicata sur les trois systèmes de résines ajustées selon les formulations et les doses indiquées au tableau 21.

Tableau 21 : Ajustement des propriétés des résines

Système de résine	Quantité initiale (g)	Teneur en eau initiale (%)	Eau ajoutée (g)	Qté de durcisseur (g)
PF	20.8	60.2	4.18	Non applicable
MUF	20.1	70.0	8.06	1.4 de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Tannins	20.03	95	18.02	3.82 de $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$

Le tableau 22 expose les résultats de temps de gel pour les trois systèmes de résine.

Tableau 22 : Temps de gel des trois systèmes de résine

Donnée	PF	MUF	Tannins
Température (°C)	130		
Temps de gel (s)	525	141	270

A partir des résultats du temps de gel, on remarque que la réactivité de la résine MUF est la plus élevée avec 141 s contre 270 s pour les tannins et 525 s pour la PF. Ces données corroborent les informations énoncées à la revue de littérature.

5.3 Impact des effets significatifs sur les propriétés mécaniques des panneaux

Cette section présente les résultats du traitement statistique réalisé avec JMP[®] Pro 15.1 permettant de construire des modèles mathématiques pour chaque variable de réponse. Il est à noter que l'analyse statistique a été menée selon une approche pas-à-pas en retenant pour chaque réponse les facteurs ayant un seuil de p-value < 0.05 et permettant d'obtenir un modèle dont l'analyse de la variance est significative à 95 %. Les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté sont jugés robustes lorsqu'ils sont supérieurs à 70 % [116]. Les rapports statistiques correspondant à toutes les réponses pour lesquelles la construction d'un modèle mathématique n'a pas été possible sont disponibles en annexe.

Dans la section suivante, le poids des effets, ainsi que leur seuil de significativité statistique seront présentés pour chaque réponse. Un tableau regroupant les modèles mathématiques prédictifs de chaque propriété sera présenté pour les trois systèmes de résine en indiquant le R^2 , le R^2 ajusté selon le nombre de variables retenues et l'erreur pure ainsi que le P- value du modèle selon son analyse de la variance. Une mention (n.s) apparaîtra dans les cases correspondant aux facteurs n'ayant pas d'effet significatif sur la propriété étudiée. Les tableaux seront suivis d'une série de figures pour illustrer l'effet de chaque facteur sur la variable de réponse. Une interprétation complètera la présentation de chaque catégorie de propriétés (mécaniques et physiques) avec un survol des références de littérature appuyant les observations tirées des résultats.

5.3.1 Effet des facteurs sur les propriétés mécaniques :

5.3.1.1 Modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR)

Le modèle statistique associé à l'essai de flexion trois points permettant de déterminer les modules d'élasticité et de rupture (MOE) des 3 systèmes de résines est présenté au tableau 23. Le système d'équation du modèle mathématique prédictif sera présenté uniquement dans le cas du MOE pour en comprendre la construction selon les résultats présentés au tableau. Le même raisonnement s'applique pour toutes les réponses subséquentement modélisées.

Tableau 23 : Poids des effets sur le MOE avec les 3 systèmes de résine

	PF		MUF		Tannins	
	Effet	P.> t	Effet	P.> t	Effet	P.> t
Constante	2635.1	<.0001	2467.5	<.0001	2211.9	<.0001
Densité	952	0.0001	1116.125	<.0001	737.75	0.0008
Température	334.5	0.0209	n.s.	n.s	n.s	n.s
Durée	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
% Résine	n.s	n.s	n.s	n.s	429.25	0.0133
Température x densité	315	0.0264	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
R ²	0.94		0.97		0.86	
R ² ajusté	0.91		0.97		0.82	
Analyse de la variance	0.0004		<.0001		0.0010	

Selon les résultats du tableau 23, les modèles mathématiques de prédiction du MOE avec les 3 résines sont présentés aux équations 5.1 à 5.3 :

$$MOE_{PF} = 2635.1 + 952 \times \text{Densité} + 334.5 \times \text{Température} + 315 \times \text{Température} \times \text{densité} \quad [5.1]$$

$$MOE_{MUF} = 2467.5 + 1116.125 \times \text{Densité} \quad [5.2]$$

$$MOE_{Tannins} = 2211.9 + 737.75 \times \text{Densité} + 429.25 \times \% \text{ Résine} \quad [5.3]$$

On note un effet important induit par la densité dans le module d'élasticité obtenu avec les trois systèmes de résine. Les panneaux fabriqués avec un système de résine PF montrent toutefois une sensibilité à la température qui améliore le module d'élasticité lorsqu'elle est augmentée. Une interaction entre la température et la densité se dégage également du modèle statistique prédictif. L'ensemble des effets et des interactions sont résumés aux figures 63 à 65.

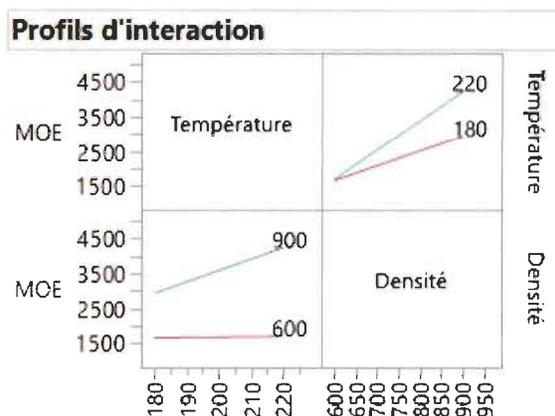


Figure 63 : Effets et interactions sur le MOE avec la résine PF

On remarque que la montée de la température de 180 à 220 °C entraîne un changement de pente pour la courbe de réponse du MOE dans la plage de densité située entre 600 et 900 kg/ m³. Cette évolution nous renseigne sur l'importance d'ajuster la température à la hausse lorsqu'on vise la fabrication de panneaux à haute densité pour améliorer leur module d'élasticité.

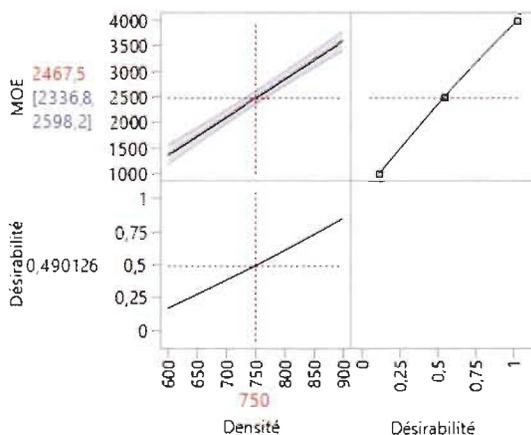


Figure 64 : Effet de la densité sur le MOE avec la résine MUF

Dans le cas de la résine MUF, la densité apparaît comme le seul facteur ayant une incidence significative sur le MOE. L'augmentation de la densité de 50 %, entre 600 et 900 kg/ m³ permet de faire passer le MOE du simple au triple.

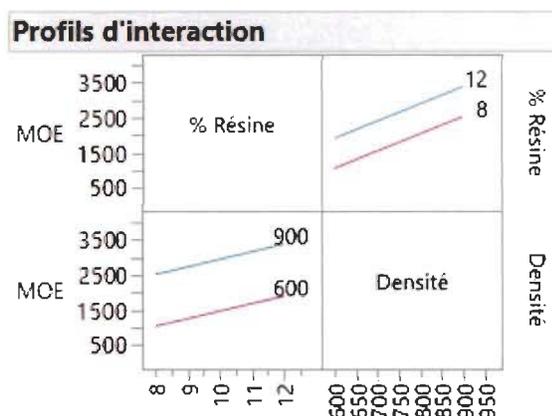


Figure 65 : Effets de la densité et de la teneur en résine sur le MOE avec les tannins

Les panneaux fabriqués avec une matrice de tannins montrent une sensibilité à la densité et à la teneur en résine. Le parallélisme des courbes de réponse du MOE indique l'absence d'une interaction entre les deux facteurs. L'augmentation de la résine et de la densité contribuent à améliorer la réponse du module d'élasticité pour cette résine biosourcée.

Le résumé des effets ayant un impact sur le MOR avec les trois systèmes de résine est présenté au tableau 24.

Tableau 24 : Poids des effets sur le MOR avec les trois systèmes de résine

	PF		MUF		Tannins	
	Effet	P.> t	Effet	P.> t	Effet	P.> t
Constante	12.612	<.0001	10.426	<.0001	9.372	<.0001
Densité	5.78	<.0001	4.56	.0005	4.435	0.0005
Température	n.s	n.s	-1.6	0.071*	n.s	n.s
Durée	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
% Résine	n.s	n.s	n.s	n.s	1.805	0.0406
Température x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
R ²	0.93		0.85		0.86	
R ² ajusté	0.92		0.81		0.82	
Analyse de la variance	<.0001		0.0012		0.0009	

* Facteur retenu malgré un p-value supérieur à 0.05 mais inférieur à 0.1 pour montrer son effet négatif sur le MOR.

Les figures 66 à 68 illustrent l'influence des facteurs sur la réponse du MOR avec les trois matrices d'encollage.

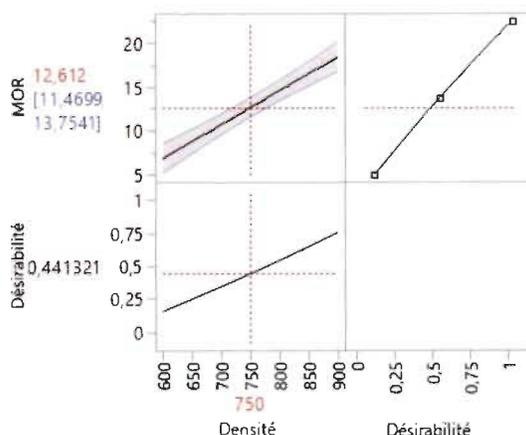


Figure 66 : Effet de la densité sur le MOR avec la résine PF

Le module de rupture est fortement corrélé à la densité des panneaux formulés avec la résine PF. Le passage de 600 à 900 kg/ m³ permet d'augmenter le MOR de 6.8 à 18.4 MPa comme le montre la courbe de la figure 68.

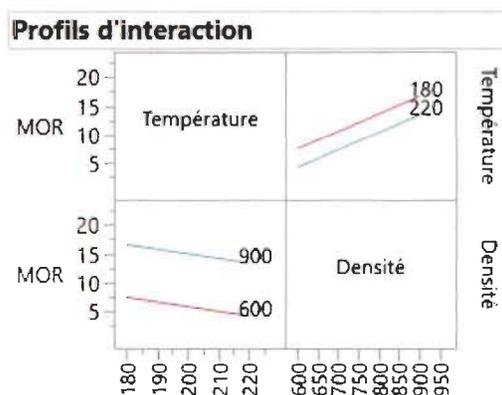


Figure 67 : Effet de la densité et de la température sur le MOR avec la résine MUF

Le comportement de la résine MUF met en jeu la densité et la température comme étant les facteurs les plus importants pour la détermination du MOR. Mais si l'augmentation de la densité induit une amélioration pour cette réponse, l'effet de la température se révèle inversement proportionnel au MOR. Ce facteur doit être tenu en compte dans la fabrication des panneaux encollés avec la MUF, d'autant plus que l'augmentation de la température implique des coûts de production plus élevés.

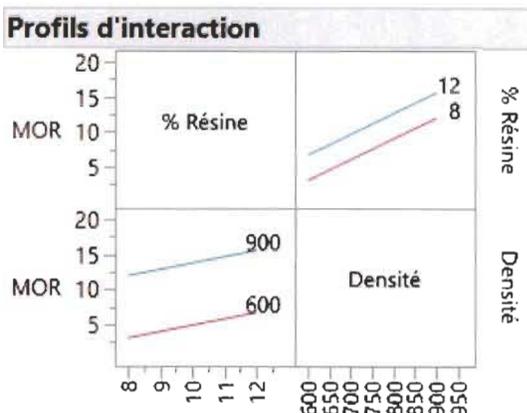


Figure 68 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le MOR avec la résine MUF

Les effets ayant une influence sur le MOE le sont aussi pour le MOR dans les panneaux fabriqués avec la résine de tannins. L'augmentation de la densité et de la teneur en liant, dans une moindre proportion, contribue donc, sans interaction visible entre les deux facteurs, à améliorer la propriété de la résistance à la rupture.

5.3.1.2 Cohésion interne (IB)

Le résumé des effets ayant un impact sur la cohésion interne (IB) avec les trois systèmes de résine est présenté au tableau 25.

Tableau 25 : Poids des effets sur la cohésion interne avec les trois systèmes de résine

	PF		MUF		Tannins	
	Effet	P.> t	Effet	P.> t	Effet	P.> t
Constante	0.56	0.0001	0.68	<.0001	0.38	<.0001
Densité	0.25	0.0110	0.195	0.0044	0.23	0.0029
Température	0.18	0.0406	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée	0.228	0.0168	n.s	n.s	n.s	n.s
% Résine	n.s	n.s	0.12	0.0395	0.1	0.0914*
Température x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
R ²	0.83		0.77		0.77	
R ² ajusté	0.75		0.70		0.70	
Analyse de la variance	0.0090		0.0058		0.0056	

* Facteur retenu malgré un p-value supérieur à 0.05 mais inférieur à 0.1 pour montrer son effet positif sur la cohésion interne.

Les figures 69 à 71 illustrent l'influence des facteurs sur la cohésion interne (IB) avec les trois matrices d'encollage.

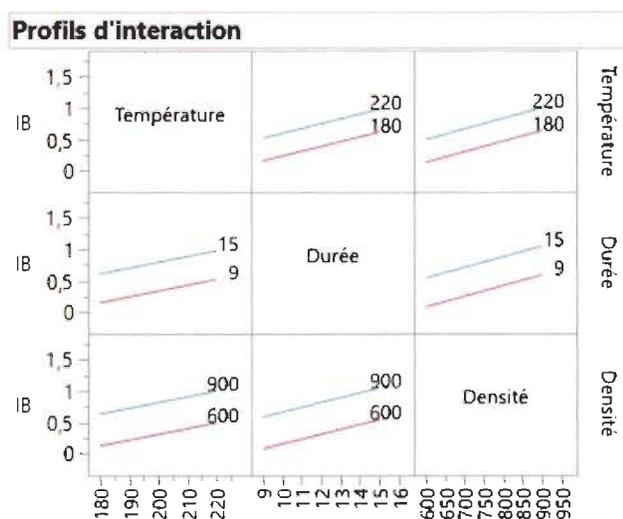


Figure 69 : Effets principaux sur la cohésion interne avec la résine PF

La cohésion interne (IB) est une propriété étroitement liée à la qualité d'encollage et au niveau de la polymérisation de la résine entre les particules. Avec la résine PF, on remarque par ordre d'importance, un effet significatif de la densité, suivi de la durée et la température de pressage sur la cohésion interne des panneaux. Aucune interaction entre ces facteurs n'a été cependant observée.

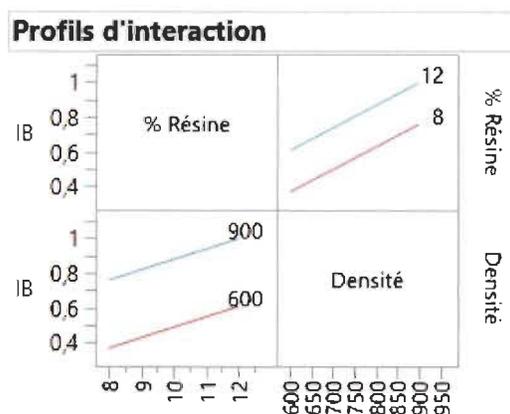


Figure 70 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le IB avec la résine MUF

Avec la résine MUF, les deux facteurs ayant un effet significatif sur la cohésion interne sont la densité et la teneur en liant. L'effet de la densité est toutefois plus important

que celui de la quantité de résine dans l'amélioration du IB comme le montre l'estimation du poids des effets indiqué dans le modèle statistique.

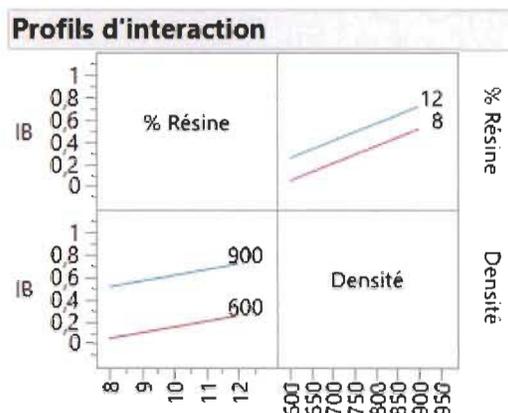


Figure 71 : Effet de la densité et de la teneur en colle sur le IB avec les tannins

Les panneaux encollés avec les tannins sont influencés d'abord par la densité et par le taux d'encollage quant à leurs résultats de cohésion interne. Dans cet aspect, ils montrent un comportement similaire à celui des panneaux formulés avec la résine MUF.

5.3.1.3 Dureté Janka

Le résumé des effets ayant un impact sur le module de dureté Janka avec les trois systèmes de résine est présenté au tableau 26.

Tableau 26 : Poids des effets sur la dureté Janka avec les trois systèmes de résine

	PF		MUF		Tannins	
	Effet	P.> t	Effet	P.> t	Effet	P.> t
Constante	3850.7	<.0001	3858.6	<.0001	3454.3	<.0001
Densité	1799.5	0.0004	1717.375	<.0001	1650.25	<.0001
Température	834.5	0.0112	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée	653.25	0.0278	n.s	n.s	403	0.0232
% Résine	n.s	n.s	n.s	n.s	394.5	0.0250
Température x densité	703.5	0.0213	n.s	n.s	n.s	n.s
Durée x densité	n.s	n.s	n.s	n.s	348.5	0.0382
R ²	0.95		0.96		0.98	
R ² ajusté	0.92		0.95		0.96	
Analyse de la variance	0.0014		<0.0001		0.0003	

Les figures 72 à 74 illustrent l'influence des facteurs sur la dureté (Janka) avec les trois matrices d'encollage.

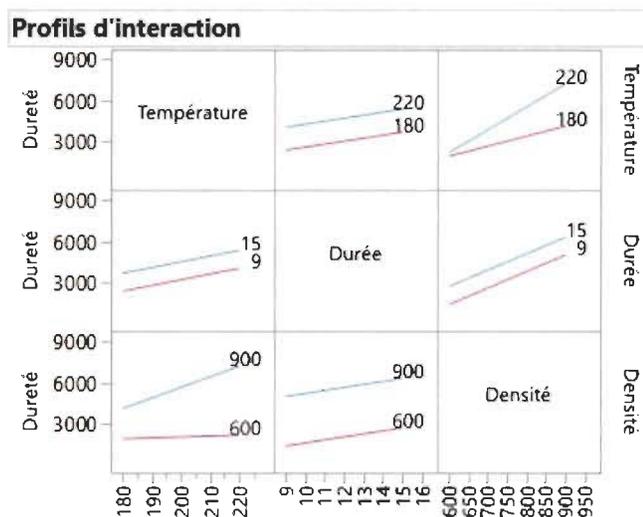


Figure 72 : Effets principaux sur le module de dureté avec la résine PF

On note que la dureté Janka des panneaux fabriqués avec la résine PF est influencée par l'effet de la densité, la température, suivie d'une interaction entre ces dernières et enfin, par la durée de pressage des panneaux. Tous ces effets ont un impact positif sur le module de dureté. L'interaction entre la densité et la température de pressage montre que cette dernière, lorsqu'elle est élevée, améliore davantage le module de dureté des panneaux pressés à haute densité (900 kg/m³).

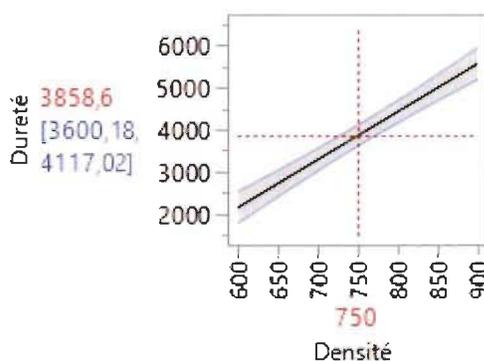


Figure 73 : Effet de la densité sur le module de dureté avec la résine MUF

La dureté des panneaux employant la résine MUF ne font ressortir qu'un facteur ayant un effet significatif sur le module de dureté, soit la densité. Les panneaux ayant une

densité de 600 kg/ m^3 donnent une réponse autour de 2141 N alors que ceux pressés à haute densité peuvent atteindre 5575 N selon le modèle mathématique obtenu.

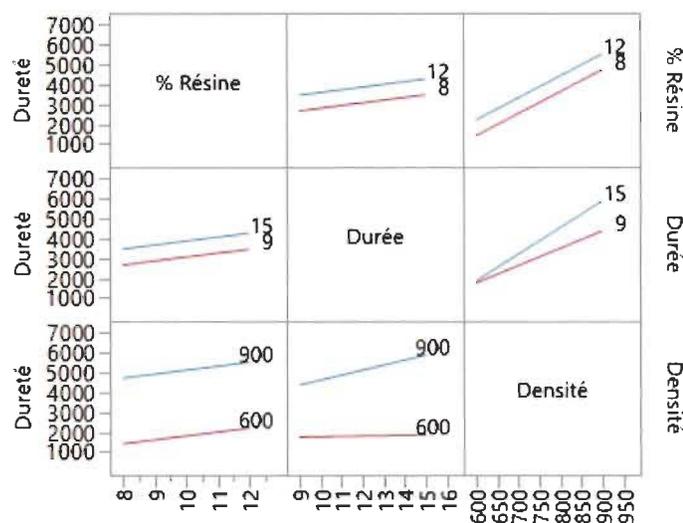


Figure 74 : Effets principaux sur la dureté avec les tannins

Les effets ayant un impact sur le module de dureté des panneaux encollés avec les tannins comportent la densité, la durée, leur interaction ainsi que la teneur en résine. L'augmentation de chaque facteur induit une amélioration de la dureté. L'interaction entre la densité et la durée montre que pour les panneaux de haute densité, l'augmentation de la durée de pressage tend à renforcer le comportement des panneaux au niveau de la dureté.

5.3.2 Discussion sur le poids des effets en fonction des systèmes de résine

5.3.2.1 Effet des facteurs sur les propriétés mécaniques

Après avoir passé en revue les effets principaux ayant une incidence sur les propriétés mécaniques des panneaux de particules fabriqués avec les trois systèmes de résine, cette section sera dédiée à la discussion et à l'interprétation des résultats obtenus à travers la modélisation statistique des effets sur les réponses.

Avant d'aborder la discussion sur les facteurs et de leur influence sur les propriétés des panneaux, le tableau 27 présente une synthèse des résultats obtenus pour les trois plans

d'expérience. Les propriétés influencées y sont indiquées pour chaque facteur listé sur les lignes en fonction des systèmes de résine mentionnés au-dessus des colonnes. La colonne intitulée « sens » renseigne sur la nature de l'impact induit par chaque effet. Un signe (+) correspond à une incidence positive tandis que le signe (-) décrit une influence négative, une case vide indique l'absence d'effet.

Tableau 27 : Résumé des effets en fonction des trois systèmes de résine sur les propriétés

<i>Facteur</i>	<i>PF</i>		<i>MUF</i>		<i>Tannins</i>	
	Propriété	Sens	Propriété	Sens	Propriété	Sens
<i>Densité</i>	MOE	+	MOE	+	MOE	+
	MOR	+	MOR	+	MOR	+
	IB	+	IB	+	IB	+
	Dureté	+	Dureté	+	Dureté	+
<i>Température</i>	MOE	+	MOR	-		
	IB	+				
	Dureté	+				
<i>Durée</i>	IB	+			Dureté	+
	Dureté	+				
<i>% Résine</i>			IB	+	MOE	+
					MOR	+
					IB	+
					Dureté	+
<i>Température x densité</i>	MOE	+				
	Dureté	+				
<i>Durée x densité</i>					Dureté	+

D'abord, il y a lieu de remarquer que l'augmentation de la densité a un impact positif sur toutes les propriétés mécaniques quel que soit le système d'encollage. Cette observation trouve en effet son explication dans les mécanismes qui régissent les phénomènes de transfert de masse et de chaleur. Plusieurs études ont confirmé ce constat. On peut citer les travaux conduits par Cai et *al.* (2006), Dai et *al.* (2007) et Belley (2009) ont noté que l'augmentation de la masse volumique réduit la perméabilité au gaz

(porosité), augmente la pression et accélère par le fait même la montée en température au cœur de l'ébauche [98-100]. La compression d'un plus grand nombre de particules dans le même volume réduit également les cavités entre les particules, augmente leur coefficient de transfert thermique et favorise le transfert de chaleur par conduction. Dans le cas de la résine PF, nécessitant des températures de polymérisation plus élevées que les autres résines, l'interaction entre la température et la densité montre l'effet positif combiné apporté par l'augmentation de ces facteurs, car ayant tous les deux un effet très significatif sur la conductivité thermique [100]. D'autres études comme celles menées par Eslah *et al.* (2012), Lias *et al.* (2014) et Maraghi *et al.* (2018) confirment l'incidence positive de la densité sur toutes les propriétés mécaniques des panneaux de particules [101, 102, 74].

L'importance de l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des panneaux encollés avec la résine PF est expliqué par le processus de réticulation de ce type d'adhésif. Dans une étude comparative entre la résine PF et MUF, Lin *et al.* (2017) ont montré que la PF réagit à des températures plus élevées que la MUF [103]. La même étude indique une dégradation de la résine MUF à de hautes températures, ce constat est confirmé par l'effet négatif de la température observé dans le module de rupture avec les panneaux encollés avec une résine MUF dans le présent projet.

Les résines PF sont également connues pour leurs temps de polymérisation plus longs [63]. Ceci est confirmé par les tests de temps de gel effectués durant la caractérisation des résines utilisés pour ce projet. En effet, les données indiquent un temps de gel pour la résine PF 4 fois plus élevé que celui de la MUF et 2 fois plus que celui des tannins. Ces indications confortent les résultats des essais montrant l'importance de la durée de pressage dans le cas de la résine PF et celles des tannins, alors que le même facteur n'a eu aucun effet sur la MUF.

Le taux d'encollage fait également partie des paramètres importants dans la fabrication des panneaux. En règle générale, il est admis que l'augmentation de la teneur en résine améliore toutes les propriétés mécaniques des panneaux (MOE, MOR, IB et dureté). Les travaux de Ashori *et al.* (2008) et Kwon *et al.* (2012) montrent bien cet aspect dans le cas des panneaux de particules [104-105]. Dans ce projet, il semble que la plage de variation de la teneur en résine n'a pas été suffisamment étendue pour valider son

importance avec la matrice PF. Cependant les panneaux formulés avec la MUF au niveau du IB et avec les tannins, pour toutes les propriétés, montrent bien une sensibilité pour le taux d'encollage. En réalité, le cas des panneaux fabriqués avec les tannins est assez particulier. Bien que certaines études comme celle menée par Abd El-Sayed et *al.* (2019) ont démontré l'effet positif induit par l'augmentation du taux d'encollage [106], il semble dans notre cas que la viscosité élevée de cette résine (1522 cP après ajout de l'hexamine) a accentué son importance sur les propriétés mécaniques des panneaux. En effet, ces derniers étaient entachés de plusieurs spots de couleur noire à la surface, signe manifeste d'une mauvaise répartition de la résine sur l'ensemble des particules (figure 75).



Figure 75 : Mauvaise répartition de la résine sur les panneaux encollés avec les tannins

5.3.2.2 Effet des facteurs sur les propriétés physiques

L'analyse statistique de l'effet des facteurs étudiés sur le gonflement en épaisseur après 2 et 24h n'a pas permis de construire un modèle mathématique ayant une analyse de variance significative. Le comportement des panneaux fabriqués avec les trois systèmes de résines ne montre aucune cohérence attribuable à l'un ou l'autre des facteurs analysés. Cette section sera donc consacrée à la discussion des raisons pouvant être à l'origine de l'impossibilité de construction d'un modèle statistique pour cette propriété avec les facteurs étudiés.

En premier lieu, l'aspect hétéroclite du bois de CRD au niveau des essences de bois qu'il contient, de la géométrie des particules et des différents types de traitements qu'il aurait subi durant son premier cycle de vie (peinture, traitement thermique ou chimique, etc.) peuvent expliquer en partie ce résultat. Dans une étude portant sur les facteurs pouvant influencer le gonflement en épaisseur, Halligan (1970) a recensé le coefficient d'élanement (C_e) des particules ainsi que les espèces de bois parmi les principaux facteurs ayant un impact sur le gonflement [107]. He et *al.* (2000) a démontré l'effet induit par la peinture sur la résistance à l'eau des panneaux [108]. Or, les particules de bois de CRD, à cause de leurs diverses provenances, observent peu, voire pas d'uniformité dans ces aspects.

De plus, le gonflement en épaisseur n'obéit pas aussi clairement que les propriétés mécaniques (MOE, MOR, IB, Dureté) aux spécifications physiques des panneaux, comme leur densité. Les travaux de Chen et *al.* (2009) et Rofii et *al.* (2013) ont montré la complexité de corrélérer le gonflement à la masse volumique des panneaux [109-110]. Les deux études mentionnent l'existence de nombreuses contradictions dans la littérature scientifique à ce sujet. Certaines expériences concluent que le gonflement est atténué lorsque la densité des panneaux est élevée, alors que dans d'autres cas, c'est l'effet inverse qui est démontré.

Par ailleurs, la structure anatomique et chimique du bois, déterminée par son essence a une grande influence sur son comportement en gonflement. Baharoğlu et *al.* (2013) ont conduit une série d'expériences en formulant plusieurs mélanges d'essences de bois composés de pin, chêne, hêtre et peuplier dans la fabrication de panneaux de particules [111]. Les résultats ont montré que les plus bas niveaux de gonflement ont été obtenus avec une composition majoritaire de pin en raison de sa forte teneur en lignine et son faible contenu en hémicellulose. En effet, le caractère hydrophobe de la lignine et la faible disponibilité de groupements OH expliquent cette performance. Le niveau de gonflement après 2 h d'immersion a été 2.5 fois moins élevé avec une recette contenant 85 % de pin comparée à celle composée de 85 % de chêne. C'est dire l'importance du choix des essences de bois pour optimiser le comportement des panneaux de particules dans un milieu humide.

En ce qui a trait à la géométrie des particules, Farrokhpayam *et al.* (2016) et Li *et al.* (2010) ont montré l'effet significatif provoqué par la dimension de la matière ligneuse au niveau du gonflement [112-113]. D'autres études, comme celles de Mottet (1967) et Brumbaugh (1960) ont statué que l'épaisseur des particules a un impact sur leur retour élastique. Ainsi, les longues particules à faible épaisseur donnent un meilleur comportement en gonflement que les particules courtes et épaisses [114-115]. L'écart-type élevé des coefficients d'élancement ainsi que la largeur de la plage granulométrique mesurés sur les particules de bois de CRD récolté chez BRQ peuvent alors expliquer les raisons du non-aboutissement de la modélisation mathématique de la propriété de gonflement en épaisseur après 2 et 24 h d'immersion.

5.4 Comparaison des trois systèmes de résine au regard de l'ANSI 208.1

La mise en œuvre du plan d'expérience pour chaque type de résine a nécessité la fabrication de 4 panneaux à basse densité (600 kg/ m^3), 4 panneaux à haute densité (900 kg/ m^3), ainsi qu'un point central à moyenne densité (750 kg/ m^3). Les grades de panneaux (H, M et LD) de la norme ANSI 208.1-2016 sont spécifiés en fonction de leur masse volumique. La comparaison des résultats obtenus pour les trois colles avec les exigences de la norme a été donc réalisée en fonction de la densité. Compte tenu de la non-indication de la densité s'appliquant au grade PBU destiné aux sous-couches de plancher, les spécifications de ce grade ont été comparés à tous les panneaux fabriqués dans le cadre de ce projet. A noter que la norme ANSI n'énonce aucun critère pour le gonflement.

5.4.1 Panneaux de basse densité

Un rappel des configurations de pressage des panneaux de basse densité est présenté au tableau 28 alors que les résultats de comparaison (MOE, MOR, IB, dureté, gonflement) avec les spécifications de la norme ANSI sont illustrés dans les figures 76 à 80.

Tableau 28 : Configurations de pressage des panneaux de basse densité

Numéro de config.	Densité (kg/m ³)	Teneur en résine (%)	Température (°C)	Durée (s/mm)
1	600	8	180	9
2	600	12	180	15
4	600	12	220	9
5	600	8	220	15

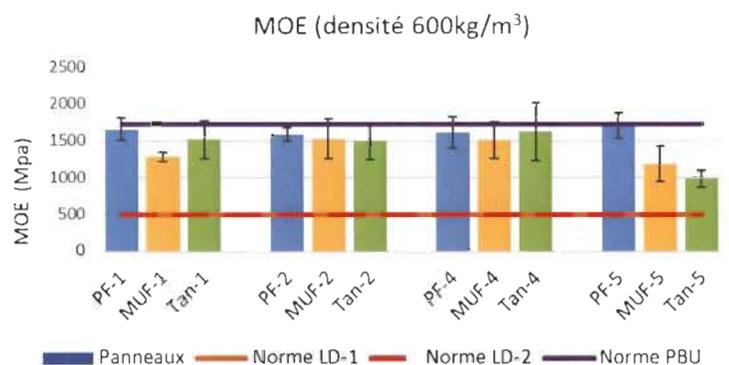


Figure 76 : Comparaison du MOE des panneaux à basse densité avec la norme ANSI

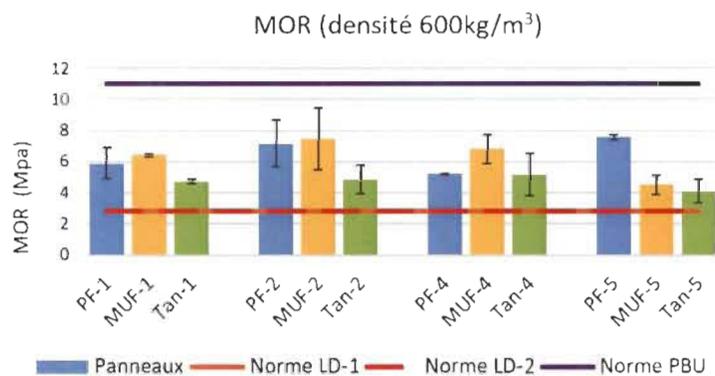


Figure 77 : Comparaison du MOR des panneaux à basse densité avec la norme ANSI

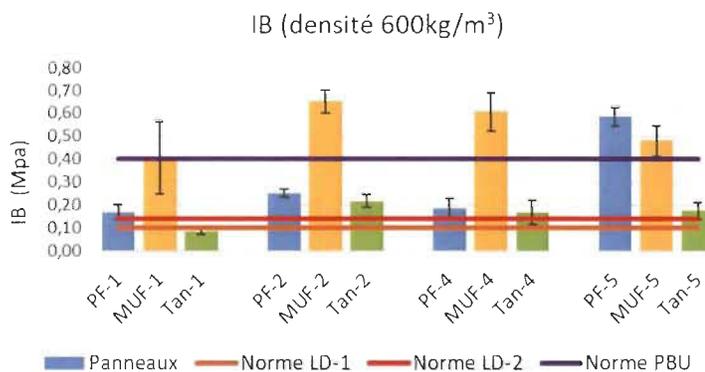


Figure 78 : Comparaison du IB des panneaux à basse densité avec la norme ANSI

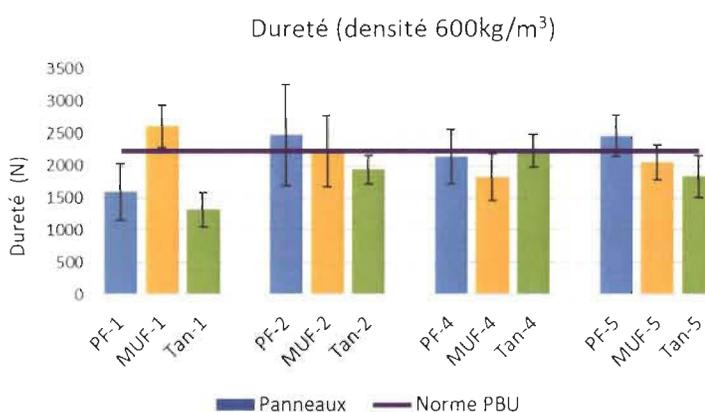


Figure 79 : Comparaison de la dureté des panneaux à basse densité avec la norme ANSI

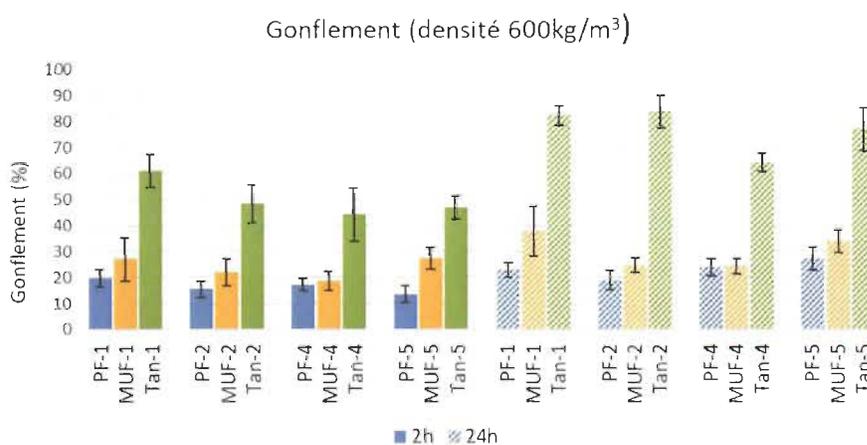


Figure 80 : Résultats de gonflement des panneaux de basse densité après 2 et 24h

A basse densité, tous les panneaux dépassent l'exigence des grades LD-1 et LD-2 au niveau des modules d'élasticité et de rupture. En revanche, les propriétés en flexion du

grade PBU n'ont été satisfaites par aucun panneau. En ce qui concerne la cohésion interne, tous les panneaux dépassent la norme LD-1 à l'exception de la première configuration de pressage réalisée avec les tannins. Les panneaux de la quatrième et la cinquième configuration du même type de résine échouent également à franchir le grade LD-2 de la norme. Tous les autres panneaux avec celui de la deuxième configuration des tannins franchissent le seuil de 0.14 MPa. En termes de gonflement en épaisseur, les panneaux fabriqués avec la résine PF montrent les meilleures performances, suivis de près des panneaux encollés avec la MUF. Les tannins affichent des résultats non concluants pour ce test.

5.4.2 Panneaux de moyenne densité

Un rappel de la configuration de pressage des panneaux de moyenne densité est présenté au tableau 29 alors que les résultats de comparaison (MOE, MOR, IB, dureté, gonflement) avec les spécifications de la norme sont illustrés dans les figures 81 à 85.

Tableau 29 : Configuration de pressage des panneaux de moyenne densité

Numéro de config.	Densité (kg/ m ³)	Teneur en résine (%)	Température (°C)	Durée (s/ mm)
7-8	750	10	200	12

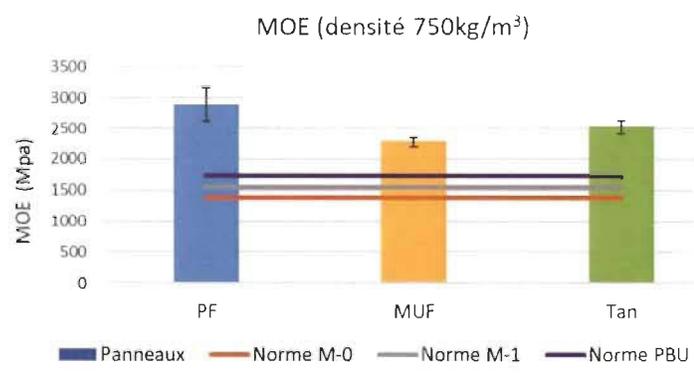


Figure 81 : Comparaison du MOE des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI

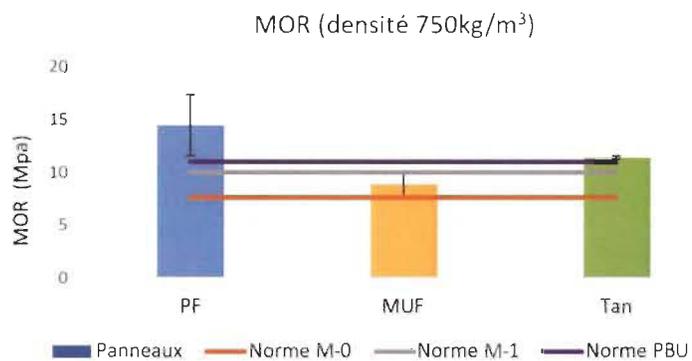


Figure 82 : Comparaison du MOR des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI

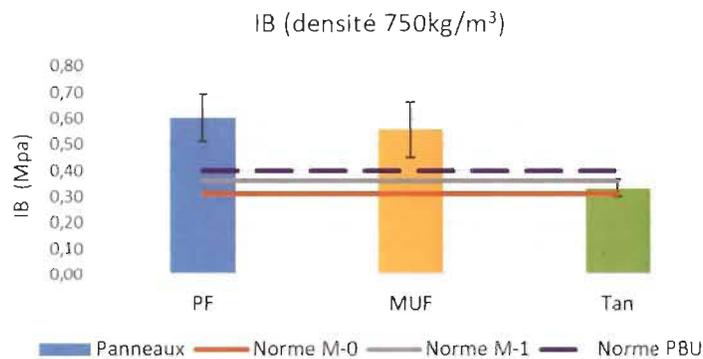


Figure 83 : Comparaison du IB des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI

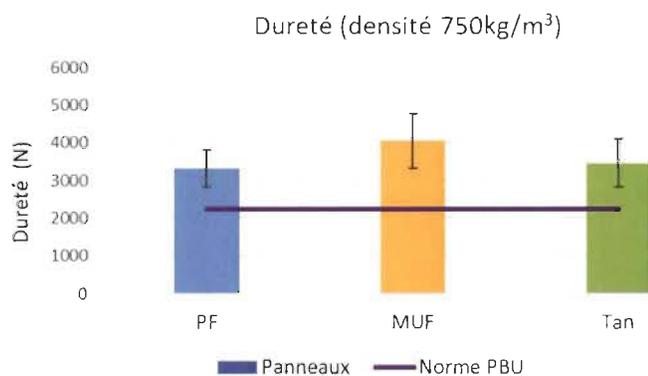


Figure 84 : Comparaison de la dureté des panneaux de moyenne densité avec la norme ANSI

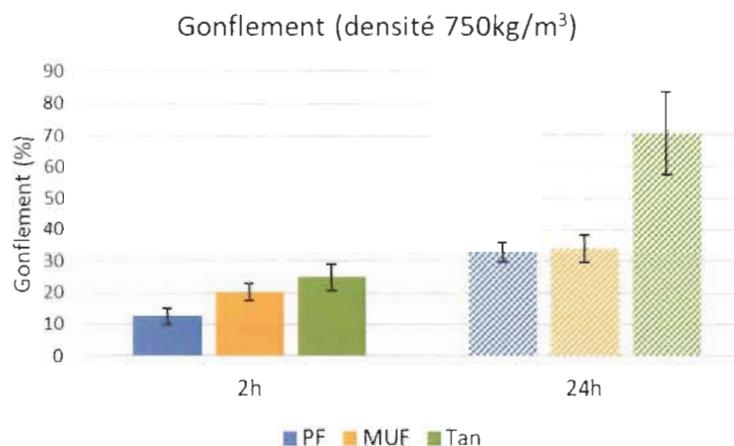


Figure 85 : Résultats de gonflement des panneaux de moyenne densité après 2 et 24h

Tous les panneaux satisfont aux grades M0, M1 et PBU au niveau du MOE. Idem pour le MOR sauf dans le cas du panneau encollé avec la MUF qui satisfait uniquement le grade M0. Le panneau de moyenne densité, fabriqué avec les tannins rencontre uniquement l'exigence de cohésion interne de la norme M0 alors que les panneaux fabriqués avec la PF et la MUF dépassent tous les grades, PBU y compris. Ce même grade est satisfait au niveau de la dureté par tous les panneaux. Les tendances en gonflement sont maintenues de la même façon que pour les panneaux de basse densité. La PF paraît légèrement plus performante que la MUF, alors que les tannins montrent une faiblesse, surtout après 24h d'immersion avec un gonflement de 70%.

5.4.3 Panneaux de haute densité

Un rappel des configurations de pressage des panneaux de haute densité est présenté au tableau 30 alors que les résultats de comparaison (MOE, MOR, IB, dureté, gonflement) avec les spécifications de la norme sont illustrés dans les figures 86 à 90.

Tableau 30 : Configurations de pressage des panneaux de haute densité

Numéro de config.	Densité (kg/ m ³)	Teneur en résine (%)	Température (°C)	Durée (s/ mm)
3	900	8	220	9
6	900	12	180	9
9	900	12	220	15
10	900	8	180	15

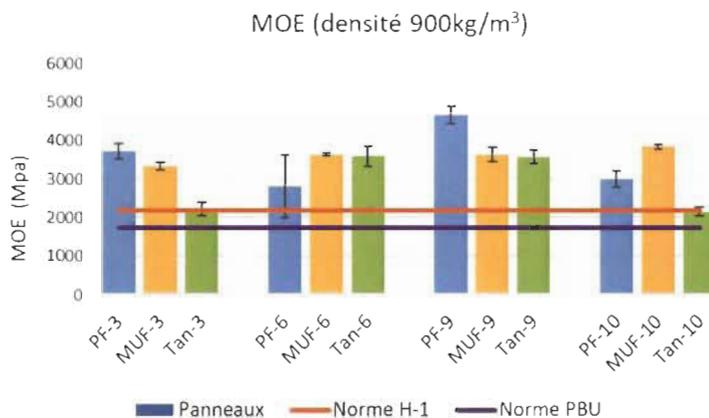


Figure 86 : Comparaison du MOE des panneaux de haute densité avec la norme ANSI

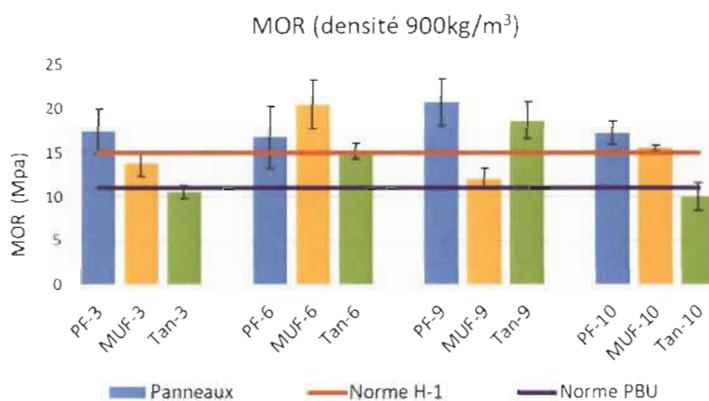


Figure 87 : Comparaison du MOR des panneaux de haute densité avec la norme ANSI

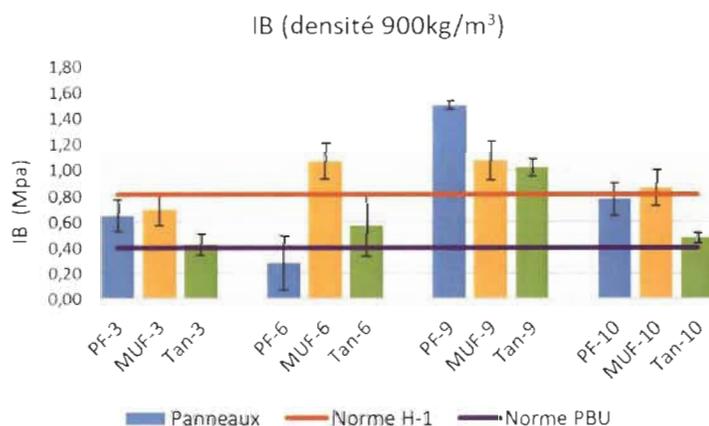


Figure 88 : Comparaison du IB des panneaux à haute densité avec la norme ANSI

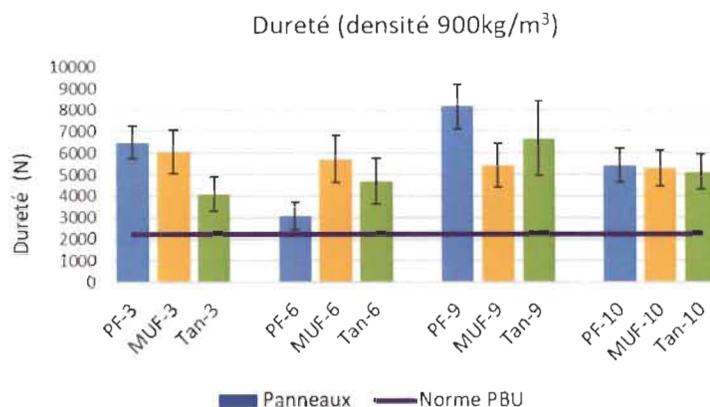


Figure 89 : Comparaison de la dureté des panneaux de haute densité avec la norme ANSI

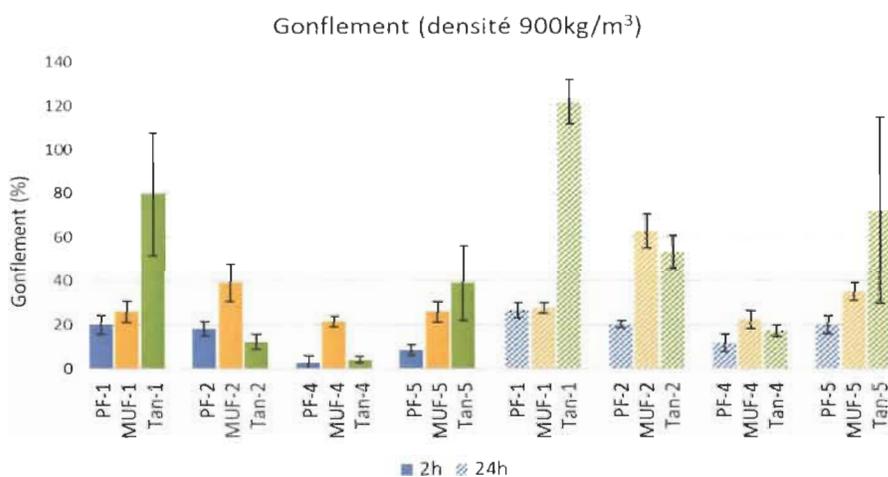


Figure 90 : Résultats de gonflement des panneaux de moyenne densité après 2 et 24h

Le grade PBU est rencontré au niveau du MOE avec tous les panneaux. La même exigence est satisfaite par tous les panneaux pour les grades H-1 sauf la troisième et la dixième configuration avec les tannins ainsi que la 6^{ème} configuration avec la PF. Le MOR du grade PBU est dépassé par tous les panneaux hormis la 9^{ème} configuration avec la MUF ainsi que la 3^{ème} et la dixième configuration avec les tannins. Le grade H-1 est satisfait au niveau du MOR par la troisième configuration avec la PF, la sixième configuration avec la MUF, la neuvième configuration avec la PF et les tannins, et enfin la 10^{ème} itération avec la PF et la MUF. La cohésion interne du grade PBU est satisfaite par la plupart des panneaux sauf le troisième et le sixième programme de pressage avec les tannins ainsi que

la sixième expérience avec la résine PF. Le grade H-1 est satisfait par tous les panneaux issus de la 9^{ème} expérience ainsi que la sixième configuration avec la résine MUF au niveau de la cohésion interne. Au niveau de la dureté, tous les panneaux dépassent le grade PBU. Le test de gonflement garde à peu d'exceptions près le même classement des résines. La PF, considérée comme étant une colle structurale à usage extérieur se maintient ainsi en pôle position devant la MUF qui convient mieux à des applications intérieures en environnement relativement humide. Les deux résines sythétiques sont suivies par les tannins qui sont autrement plus sensibles à l'humidité, probablement à cause du mauvais encollage. Ces derniers se montrent toutefois plus résistants à l'eau que la MUF dans les panneaux issus de la 2^{ème} et la 4^{ème} expérience.

Le tableau 31 résume les expériences qui respectent toutes les exigences de la norme ANSI.

Tableau 31 : Numéros d'expériences rencontrant les exigences de la norme ANSI

	<i>PF</i>	<i>MUF</i>	<i>Tannins</i>
<i>LD-1</i>	1; 2; 4; 5	1; 2; 4; 5	2; 4; 5
<i>LD-2</i>	1; 2; 4; 5	1; 2; 4; 5	2
<i>M-0</i>	7; 8	7; 8	-
<i>M-1</i>	7; 8	-	-
<i>H-1</i>	9	9; 6	9
<i>PBU</i>	7; 8; 3; 9; 10	3; 6; 10	9

5.4.4 Discussion des performances globales des résines

Les panneaux formulés avec la résine PF rencontrent et dépassent les exigences minimales de la norme ANSI-208.1 à tous les niveaux de densité. Le non-succès de la troisième, sixième et dixième configuration de pressage à haute densité peut être expliqué soit par l'inadéquation de la durée ou de la température de pressage avec ce système de résine dont la réticulation dépend fortement de ces facteurs. Cette observation est confirmée avec la conformité au grade H-1 du 9^{ème} programme de pressage. Ce dernier a été réalisé selon les niveaux hauts de la température (220 °C) et de la durée de pressage (15 s/ mm). En termes de gonflement, les résultats obtenus avec la matrice PF correspondent à la littérature et son caractère hydrophobe est confirmé.

La résine MUF n'a pas franchi le grade M-1 uniquement à cause de son MOR, alors que son MOE et sa cohésion interne dépassaient les exigences de la norme ANSI. La modélisation statistique a montré l'effet négatif de l'augmentation de la température pour cette résine au niveau de son module de rupture. Ces résultats sont confortés par la littérature imputant l'altération des propriétés mécaniques données par ce système de résine à sa dégradation thermique induite par une température de pressage élevée. Son comportement dans le test de gonflement valide aussi son aspect plus hydrophile que la résine phénolique.

Les résultats obtenus avec les tannins sont plus mitigés. En effet, c'est la cohésion interne qui était à l'origine de sa disqualification de la majorité des grades qu'elle n'a pas satisfait. Ceci est dû à la mauvaise dispersion de la résine sur les particules causée par sa haute viscosité (1522 cP), d'autant plus que le test de cohésion interne sert principalement à évaluer la qualité d'encollage entre les particules. A ce titre, le fait que sous certaines conditions de pressage, notre formulation composée à 100% de tannins durcis avec 6% d'hexamine ait rencontré les grades LD-1, LD-2, H-1 et PBU montre que le système de résine n'est pas le problème en soi, mais que le mauvais d'encollage a fortement pénalisé ses performances.

En ce qui a trait au gonflement, les matrices de tannins-hexamine ne sont pas destinées à la fabrication de panneaux à l'épreuve de l'eau. L'hexamine est normalement remplacée par le paraformaldéhyde pour améliorer la résistance à l'eau des produits encollés avec les tannins. Ce qui explique leurs piètres performances de gonflement en comparaison à ceux obtenus avec les résines PF et MUF.

5.5 Résultats du balayage par imagerie à ultrasons sans contact

Les essais d'étalonnage de l'analyseur à ultrasons avec le sandwich de calibration ont permis d'avoir une bonne résolution de lecture avec des capteurs piézoélectriques configurés selon les données du tableau 32.

Tableau 32 : Configuration de l'analyseur à ultrasons après calibration

<i>Paramètre</i>	<i>Attribut</i>
<i>Fréquence de l'onde (kHz)</i>	140
<i>Filtre passe-bas (kHz)</i>	200
<i>Filtre passe-haut (kHz)</i>	40
<i>Mode de lecture</i>	C-Scan
<i>Technique d'émission/ réception</i>	Transmission
<i>Gain (dB)</i>	70

Avec ces ajustements, il a été possible d'analyser un échantillon de haute densité (900 kg/m^3) en mode C-Scan où l'amplitude de l'atténuation de l'onde varie entre -14.02 dB et -52.46 dB. La figure 91 montre le résultat du balayage du specimen de calibration.

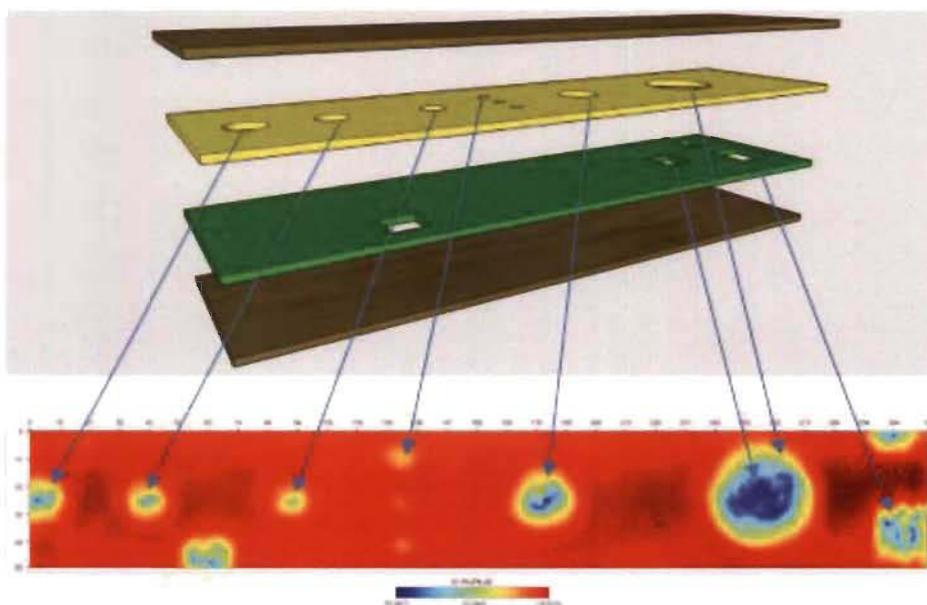


Figure 91 : Balayage en C-Scan du sandwich de calibration

Les zones de couleur rouge sont caractéristiques d'une bonne cohésion des couches superposées et correspondent aux sections pleines et sans cavités. La zone de couleur bleue témoigne de la profondeur du défaut à l'emplacement où deux cavités de géométries différentes sont superposées. En effet, cet espace vide fait chuter l'atténuation ultrasonore

à -52.46 dB alors que les défauts présents sur une seule couche affichent une atténuation de l'onde de -33.24 dB. Les zones de couleur turquoise présentent les cavités présentes sur une seule couche. Le scan à 140 kHz a même permis de détecter les cavités rondes ayant 6 mm de diamètre.

Pendant la mise en œuvre des plans d'expérience, la quatrième configuration de pressage avec la résine PF, réalisée selon le niveau haut de température et le niveau bas de la durée de pressage a donné lieu à un panneau délaminé dont on pouvait remarquer les fissures sur les côtés, sans que leur étendue ne soit identifiable par un examen visuel. Le délaminage était dû à une polymérisation partielle de la résine et favorisé par le retour élastique des particules et le dégagement de vapeur piégée au centre du feutre au moment du dégazage. Le balayage par ultrasons de ce panneau (figure 92) a permis la détection de la délamination au niveau de la section parallèle à la surface en montrant une variation de l'atténuation de l'onde ultrasonore de -84 dB (zone délaminée) à -11.45 dB (zone saine). L'apparence d'un panneau homogène est généralement donnée par la domination d'une seule couleur, avec la présence de certaines sections de couleur rouge et le moins possible de cavités ayant une couleur bleue. La figure 93 illustre un panneau correctement pressé dont la moyenne de l'atténuation ultrasonore est de -21.33 dB (zone turquoise) avec des valeurs extrêmes de -35.63 dB (zones bleues) et -7.03 dB (zones rouges).

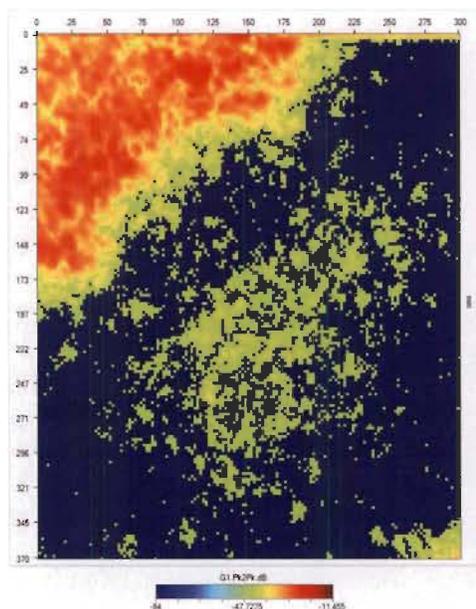


Figure 92 : Scan d'un panneau délaminé

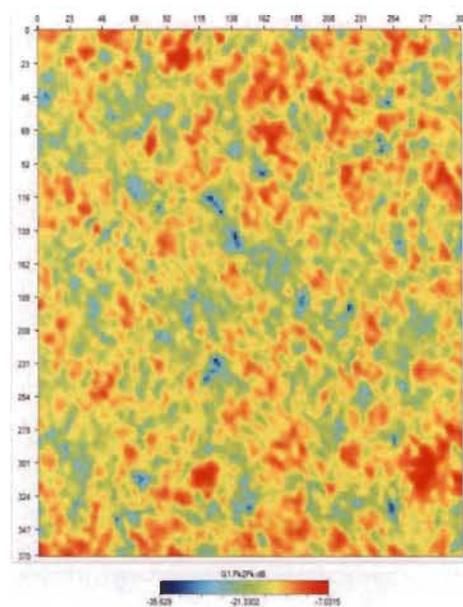


Figure 93 : Scan d'un panneau homogène

5.6 Conclusions partielles

Les essais de pressage effectués de particules de bois de CRD avec les résines PF, MUF et les tannins ainsi que l'exploration du potentiel de détection des délaminations par imagerie à ultrasons sans contact mènent aux conclusions suivantes :

- Les particules de bois de CRD se prêtent bien au procédé de pressage à chaud, et la détermination de leurs propriétés mécaniques est possible, voire prévisible au moyen d'une modélisation statistique.
- La diversité des essences, la large étendue des coefficients d'éclatement ainsi que l'impossible traçabilité des traitements thermiques ou chimiques subies par les particules de bois de CRD empêchent la construction d'un modèle statistiquement fiable (p -value < 0.05) se rapportant aux propriétés de gonflement des panneaux.
- L'atteinte des exigences de certains grades de la norme ANSI-208.1-2016 est possible avec les trois systèmes de résine.
- Les panneaux pressés avec la matrice PF affichent globalement les meilleures propriétés mécaniques et physiques, suivies de la résine MUF et les tannins.
- Tous les systèmes de colles montrent une sensibilité élevée à la densité cible. L'augmentation de celle-ci améliore invariablement l'ensemble des propriétés mécaniques des panneaux de particules. La résine MUF tend à avoir de meilleures performances à une température de 180 °C alors que la PF et dans une moindre mesure les tannins, montrent plus d'affinité avec des températures plus élevées (220 °C).
- Les tannins durcis avec l'hexamine ont un comportement sensiblement plus hydrophile en comparaison avec la PF et la MUF. Ce problème peut aussi être dû à la mauvaise dispersion de la résine.
- La technique de détection des défauts par imagerie à ultrasons sans contact permet de déterminer en mode C-Scan l'intégrité physique des panneaux de particules et propose un moyen simple à mettre en œuvre pour le contrôle qualité non destructif en usine.

Chapitre 6 - Conclusion

6.1 Conclusion générale

Les résidus de bois de CRD présentent un gisement intéressant pour le développement de produits à haute valeur ajoutée. Les composites à base de bois n'en sont qu'un exemple de valorisation parmi d'autres qui permet d'ouvrir à ce matériau résiduel des horizons plus vastes et rentables que la voie classique de la cogénération énergétique. Les résultats de ce travail de recherche démontrent de façon avérée le potentiel du bois de CRD à compétitionner les produits ligneux vierges dans un marché de plus en plus tourné vers la compression des coûts de production, l'optimisation des procédés de fabrication et la saine gestion des matières premières. Il est ainsi possible d'imaginer l'émergence d'une grappe industrielle focalisée sur la deuxième transformation du bois résiduel trié par les centres de tri. Surtout pour la multiplicité des facteurs objectifs, comme la disponibilité abondante de la ressource et son faible coût, qui se positionnent en faveur de l'exploitation à bon escient de ce gisement. L'écosystème de recyclage actuel au Québec, fortement composé de centres de tri de deuxième génération doit se réinventer. Ces sites de traitement gagneraient à se doter de moyens technologiques de pointe pour migrer à la troisième génération en prévision de l'entrée en vigueur du bannissement de l'enfouissement du bois.

Les expériences conduites dans le cadre de ce projet de maîtrise confirment la possibilité d'incorporer le bois de CRD dans les produits composites en conformité avec la norme ANSI sous réserve du respect d'un certain nombre de conditions. A commencer par l'emploi de plages de température et de durée de pressage appropriées en fonction du système de résine utilisé. La teneur en résine, souvent considérée comme un facteur déterminant dans le coût de fabrication peut être fixée à 8 % dans le cas des matrices PF et MUF. Et une attention particulière doit être portée à l'uniformité de la géométrie des particules pour la fabrication de panneaux destinés à un usage extérieur. La résine de tannins peut présenter une avenue intéressante pour le développement de produits écologiques de basse densité, comme les âmes de portes, sans émission de formaldéhyde.

Enfin, la détection des défauts physiques des panneaux peut être effectuée par l'imagerie à ultrasons sans contact dans une ligne de production à grande échelle.

6.2 Recommandations

Les principales recommandations qui découlent de cette étude se présentent comme suit :

- Un second broyage de finition peut amener à mieux uniformiser le coefficient d'élanement des particules destinées au pressage et améliorer par le fait même les propriétés mécaniques (MOE, MOR, IB, dureté) et les propriétés physiques de gonflement en épaisseur. On recommande de réaliser d'autres tentatives de modélisation statistique des propriétés physiques avec des panneaux composés de particules ayant des coefficients d'élanement plus élevés et une géométrie plus uniforme.
- Un autre moyen de stabiliser les résultats de gonflement en épaisseur serait d'augmenter la teneur en paraffine à un niveau plus élevé que 0.4%. La mise en œuvre d'une série d'expériences avec 1 – 2% de cire conduirait probablement à modéliser le comportement des panneaux en gonflement.
- La cohésion interne était à l'origine de la non-conformité de la plupart des panneaux qui n'ont pas rencontré les exigences de la norme ANSI-208.1-2016. A ce propos, la fabrication de panneaux à trois couches aurait permis d'atteindre les exigences de la norme pour la plupart des programmes de pressage étudiés. Il serait de ce fait pertinent de reproduire les plans d'expérience de ce travail avec des panneaux à trois couches pour observer l'effet de cette configuration sur les résultats de cohésion interne et sur la conformité de ce critère aux grades de la norme.
- Les résultats obtenus avec la résine de tannins auraient été plus intéressants si cette résine avait une viscosité moins élevée, de nature à mieux uniformiser sa répartition sur les particules. Ce constat ouvre la voie à d'autres essais pouvant être réalisés avec cette résine biosourcée formulée selon une teneur en masse sèche plus faible que 50%.
- La détection des délaminations par imagerie à ultrasons peut faire l'objet de travaux de recherche plus approfondis visant à corrélérer les propriétés mécaniques et/ou physiques des panneaux aux données ultrasonores du temps de vol et de l'atténuation de l'onde.

Chapitre 7 - Bibliographie

[1] Recyc-Québec. (2020). *Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-complet.pdf> (Vu en juillet 2020).

[2] SECOR. (2011). *Concertation des acteurs de la filière du bois récupéré du secteur CRD. Rapport final – Conclusions des rencontres*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/concertation-filiere-bois-secor.pdf> (Vu en juillet 2020).

[3] Ministère du Développement Durable, de L'environnement Et de la Lutte Contre les Changements Climatiques (MDDELCC), (2014). *Guide d'application du Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (chapitre Q-2, r 4.1)*, Québec, ISBN 978-2-550-72528-2, 460 p.

[4] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2018). *Industrie des panneaux composites à base de bois : Produits et potentiel de marché en Amérique du Nord*. Repéré à : https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/Industrie_panneaux.pdf (Vu en juillet 2020).

[5] Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ). (2011). *Débouchés pour les rebuts de bois de construction, rénovation, démolition (CRD) en dehors du Québec*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/debouches-bois-hors-qc.pdf> (Vu en juillet 2020).

[6] Univers Nature. (2013). *Fonctionnement des arbres, résineux et feuillus 1/2*. Repéré à : http://www.univers-nature.com/durable-co/flore/arbre_fonctionnement-51288.html (Vu en juillet 2020).

[7] Jourez, B. (2010). *Anatomie et identification des bois. Notes de cours et syllabus*. Université de Liège. Belgique. Repéré à : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/148477> (Vu en juillet 2020).

- [8] Domtar. (2017). Académie de la forêt. Repéré à : https://www.theforestacademy.com/connaissance-des-arbres/anneaux-de-croissance/#.WTRYGGgl_IV (Vu en juillet 2020).
- [9] Delcroix B., Herman C., Husquinet L., Kervyn de Meerendre. (2009). *L'arbre, un être vivant : comprendre et accompagner le développement des arbres*. Neufchâteau, Belgique. Weyrich Edition.
- [10] Keller, R., (1994). *La Constitution du Bois : Le bois matériau d'ingénierie*. Nancy, France. P. Jodin Editor. ARBOLOR.
- [11] Hoadley, R.B. (2000). *Understanding wood. A craftsman guide to wood technology*. Newtown, CT, USA. The Taunton Press.
- [12] Fahn, A. (1990). *Plant anatomy. Fourth edition*. Oxford. Pergamon Press.
- [13] Fengel D. et Wegener G. (1989). *Wood, Chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin, Allemagne. De Gruyter Editor.
- [14] Panshin, A. J. et de-Zeeuw C. (1980). *Text Book of Wood Technology*. New York, USA. McGraw-Hill Inc.
- [15] Meylan B.A. and Butterfield B.G. (1972). *Three-dimensional Structure of Wood*. New York., USA. Syracuse University Press.
- [16] Association technique internationale des bois tropicaux. (2014). *L'humidité du bois*. Repéré à : <https://www.atibt.org/wp-content/uploads/2017/06/ATIBT-Fiche-Humidit%C3%A9.pdf> (Vu en juillet 2020).
- [17] Parviz N. et Frédéric H. (2005). *Comportement thermo-hydrromécanique du bois: Applications technologiques et dans les structures*. Lausanne, Suisse. Presses polytechniques et universitaires romandes.

- [18] Dora Matthews. (2016). *Wood Structure and Properties*. Repéré à : <https://slideplayer.com/slide/7522596/> (Vu en juillet 2020).
- [19] Bureau de promotion des produits du bois du Québec. (2015). *Les technologies de construction en bois du Québec*. Repéré à : http://www.quebecwoodexport.com/images/stories/pdf/Catalogue_FR-1_sans_marques.pdf (Vu en décembre 2017).
- [20] Bureau de promotion des produits du bois du Québec. (2020). *Épinette, pin, sapin (EPS)*. Repéré à : <https://quebecwoodexport.com/produits/bois-resineux/essences/epinette-pin-sapin-eps/> (Vu en décembre 2017).
- [21] MELCC. (1998). *Résumé de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008*. Repéré à : http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/resume/index.htm (Vu en décembre 2017).
- [22] Recyc-Québec. (2018). *Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD)*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-crd.pdf> (Vu en janvier 2019).
- [23] Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2010). *Hiérarchie des modes de gestion des matières résiduelles et reconnaissance d'opérations de traitement en tant que valorisation énergétique*. Repéré à : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/regime-compensation/hierarchie-modesgmr.pdf> (Vu en janvier 2019).
- [24] Vachon, Jean-François Luc. (2009). *Profil de la gestion des débris de construction, rénovation et démolition (CRD) au Québec*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/profil-gestion-debris-crd.pdf> (Vu en janvier 2019).
- [25] Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ). (2008). *Diagnostic des centres de tri québécois*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/diagnostic-centres-tri-2008.pdf> (Vu en juillet 2020).

[26] Del-Degan, M. (2012). *Structure de l'industrie de la récupération du bois provenant de la construction, la rénovation et la démolition au Québec*. Repéré à : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/structure-industrie-bois-crd.pdf> (Vu en juillet 2020).

[27] McKinnon D, Fazakerley J, Hultermans R. (2017). *Waste sorting plants – extracting value from waste*. Repéré à : http://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=5071 (Vu en juillet 2020).

[28] Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME). (2012). *État de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets*. Repéré à : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/87753_rapport-ajeurope-technologies-de-tri.pdf (Vu en juillet 2020).

[29] Serranti, Silvia & Palmieri, Roberta & Bonifazi, Giuseppe. (2015). Hyperspectral imaging applied to demolition waste recycling: Innovative approach for product quality control. *Journal of Electronic Imaging*, 24, 043003. 10.1117/1.JEI.24.4.043003.

[30] MDDEP. (2011). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Plan d'action 2011-2015*. Repéré à : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/presentation.pdf> (Vu en juillet 2020).

[31] Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2014). *Plan d'action 2011-2015 : Bilan de mi-parcours. 2014*. Repéré à : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/bilanMiParcours.pdf> (Vu en juillet 2020).

[32] 3RMCDQ. (2018). *Mémoire sur le projet de Règlement relatif à l'autorisation ministérielle et à la déclaration de conformité en matière environnementale (RRAMDCME)*. Repéré à : https://www.3rmcdq.qc.ca/client_file/upload/Mémoire_3R_MCDQ_RRAMDCME_2018.pdf (Vu en juillet 2020).

- [33] Nature Québec. (2017). *Guide pratique de mise en valeur du bois post consommation. Réalisé dans le cadre du projet Faire flèche de tout bois*. Repéré à : https://naturequebec.org/wp-content/uploads/2019/04/Faire_Fleche_15fev2017_Web.pdf (Vu en juillet 2020).
- [34] Moslemi, A.A. (1974). Particleboard. Vol. 1 - Materials. Particleboard. Vol. 2 Technology. Southern Illinois University Press. (TS 875.M6)
- [35] Schniewind, A.P., Cahn, R.W., Bever, M.B. (1989). Wood and wood-based materials - Concise Encyclopedia. Pergamon Press Plc, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, England.
- [36] Maloney, T.M. (1993). Modern Particleboard & Dry-Process Fibreboard Manufacturing. Miller Freeman Publications, San Francisco. (TS 875.M3)
- [37] Youngquist, J.A. (1999). Wood-based Composites and Panel Products. In Wood handbook - Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.
- [38] Walker, J.C.F. (1993). Primary wood processing: Principles and Practice. Chapman & Hall. London.
- [39] Walker, J.C.F. (2006). Primary wood processing: Principles and Practice 2nd Edition. Springer, Amsterdam.
- [40] Thoemen H, Irle M, Sernek M (2010) Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists. Brunel University Press, London.
- [41] Stark, Nicole M.; Cai, Zhiyong; Carll, Charles. (2010). Wood-based composite materials: panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 11. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 11.1-11.28.

- [42] Cloutier, A. (2001). *Panneaux agglomérés I. Notes de cours*, SBO-17195. Québec, Canada. Université Laval.
- [43] Suchsland, O.; Woodson, G.E. (1986). *Fiberboard manufacturing practices in the United States*. Agric. Handb. 640. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture. 263p.
- [44] Institut Technique Européen du Bois-Energie (ITEBE). (2004). *Choisir un broyeur pour le bois-énergie*. Repéré à : <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/24-ITEBE-art3-choisir-un-broyeur.pdf> (Vu en juillet 2020).
- [45] Ressel, J. (2008): Particle drying. Presentation during the 3rd International Wood Academy, University of Hamburg, 25.02-07.03.08.
- [46] Ressel, J. (2008): Adhesive application. Presentation during the 3rd International Wood Academy, University of Hamburg, 25.02-07.03.08.
- [47] Hughes, M. (2016). *Wood and wood products – Manufacture of wood-based panels*. Notes de cours CHEM-E2105. Espoo, Finlande. Aalto University.
- [48] Wolcott, M.P. (1989). *Modeling viscoelastic cellular materials for the pressing of wood composites*. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Department of Wood Science and Forest Products. Thèse de Doctorat. 182 pp.
- [49] Bastias M-V. (2006). *Modélisation du pressage à chaud des panneaux de fibres de bois (MDF) par la méthode des éléments finis*. Faculté de foresterie et de géomatique. Thèse de doctorat. 155pp.
- [50] Lehmann, W.F. (1974). Properties of structural particleboard. *Forest Prod.J.* 24(1):19–26.
- [51] Rackwitz, G. (1963). Influence of chip dimensions on some properties of wood particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff* 21(6): 200-209.

- [52] Hayashi, K., Ohmi, M., Tominaga, H., & Fukuda, K. (2003). Effect of board density on bending properties and dimensional stabilities of MDF-reinforced corrugated particleboard. *Journal of wood science*, 49(5), 398-404.
- [53] Cravo, Julio & Sartori, Diogo & Mármol, Gonzalo & Schmidt, Gustavo & Balieiro, Julio & Fiorelli, Juliano. (2017). Effect of density and resin on the mechanical, physical and thermal performance of particleboards based on cement packaging. *Construction and Building Materials*. 151. 414-421. 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.084.
- [54] Heitler, C. (1966). Some physico-chemical aspects of adhesion. *Aspects of Adhesion*, vol. 4, actes des conférences tenues à The City University, EC1, Angleterre, du 20 au 21 avril 1966, sous la dir. de Alner, D.J., pages 47-64.
- [55] Lewis, A.F. et L.J. Forrestal. (1969). Adhesion of coatings. In: *Treatise on Coatings. Volume 2. Characterization of Coatings: Physical Techniques*. Marcel Dekker, New York, pages 57-98.
- [56] Hubbe, Martin & Pizzi, A.Pizzi & Zhang, Haiyang & Halis, Rasmina. (2018). Critical links governing performance of self-binding and natural binders for hot-pressed reconstituted lignocellulosic board without added formaldehyde: A review. *BioResources*. 13. 2049-2115. 10.15376/biores.13.1.Hubbe.
- [57] Paris, C. (2011). Étude et Modélisation de la Polymerisation Dynamique de Composite à Matrice Thermodurcissable. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de l'Université de Toulouse, France.
- [58] Dunky, Manfred. (1998). Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins of wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 18. 95-107. 10.1016/S0143-7496(97)00054-7.
- [59] Wieland, S. (2007). Utilisation d'adhésifs respectueux de l'environnement pour la fabrication de panneaux dérivés du bois à faible émission de formaldéhyde –

caractérisation des paramètres de pressage – évaluation des propriétés des panneaux. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1. France.

[60] Yin, S. (1994). Caractérisation par analyses thermiques de la polycondensation d'adhésifs aminoplastes et du durcissement de composites modèles de bois-adhésif. Thèse de doctorat. Université de Nancy 1. France.

[61] Zhang, Jizhi & Wang, Xiaomei & Zhang, Shifeng & Gao, Qiang & Li, Jianzhang. (2013). Effects of Melamine Addition Stage on the Performance and Curing Behavior of Melamine-Urea-Formaldehyde (MUF) Resin. *BioResources*. 8. 10.15376/biores.8.4.5500-5514.

[62] Mamza, P., Ezeh, E.C., Gimba, E.C., & Arthur, D. (2014). Comparative Study Of Phenol Formaldehyde And Urea Formaldehyde Particleboards From Wood Waste For Sustainable Environment. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 3, 53-61.

[63] Pizzi, A. (2018). Phenolic Resin Adhesives. Dans A. Pizzi (Éd.), *Handbook of Adhesive Technology, Third Edition* (pp. 223 – 262). Boca Raton, Floride: CRC Press Taylor & Francis Group.

[64] Mansouri, H. (2007). Amélioration des résines Urée-Formaldéhyde et Phénol-Formaldéhyde pour le collage des panneaux à base de bois. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1. France.

[65] Navarette Fuentes, P-J. (2011). Adhésifs naturels à base de tanin, tanin/lignine et tanin/gluten pour la fabrication de panneaux de bois. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1. France.

- [66] Hernes, P.J., Hedges, J.I. (2000). Determination of condensed tannin monomers in environmental samples by capillary gas chromatography of acid depolymerisation extracts. *Analytical Chemistry*. 72: 5115-5124.
- [67] Kraus, TEC; Yu, Z., Preston, CM; Dahlgren, RA; Zasoski, RJ. (2003) Linking chemical reactivity and protein precipitation to structural characteristics of foliar tannins. *Journal of Chemical Ecology*. 29: 703-730.
- [68] Haslam, E. (1989). *Plant polyphenols: vegetable tannins revisited*. Cambridge University Press, DEFRA.
- [69] FCBA Institut Technologique. (2014). *Colles vertes et liants biosourcés – Rapport Final*. Repéré à : https://www.codifab.fr/media/download-file?media_nid=815&media_file_uri=public%3A//secured/fcba_rapport_veille_colles_biosourcees_dec_2014.pdf&media_file_mimetype=application/pdf (Vu en juillet 2020).
- [70] Zhou, Xiaojian & Du, Guanben. (2019). Applications of Tannin Resin Adhesives in the Wood Industry. 10.5772/intechopen.86424.
- [71] Saayman, H.M.: Res.Bull., (1971). Leather Industries Research Institute 466, Grahamstown, South Africa.
- [72] Zhou, X. & Pizzi, A. Pizzi. (2013). Tannin–resorcinol–aldehyde cold-set wood adhesives with only formaldehyde as hardener. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71. 10.1007/s00107-013-0701-8.
- [73] Lehman, W.F. (1970). Resin Efficiency In Particleboard as Influenced by Density, Atomization, and Resin Content, *Forest Products Journal*, 20(11): 48—54.

- [74] Maraghi, M.M. & Tabei, A. & Madanipoor, M. (2018). Effect of board density, resin percentage and pressing temprature on particleboard properties made from mixing of poplar wood slab, citrus branches and twigs of Beech. *Wood Research*. 63. 669-682.
- [75] AM Bhadewad, YY Sumthane, AU Nimkar, SM Khachane, YB Tyade, SS Harne. (2018). Different Percentage of Resin for Particle Board Manufacturing from *Prosopis Juliflora*. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 5(9), pp 31-38.
- [76] Wan Abd Rahman, W., Md Yatim, A., Mat Zlan, A., Kasim, J., and Mohd Yunus, N. (2019). Effects of the resin content and particle size on the properties of particleboard made of *Neolamarckia* and *Leucaena* particles. *BioRes*. 14(3), 6079-6087.
- [77] Ressel, J. (2008). Adhesive application. Presentation during the 3rd International Wood Academy, University of Hamburg, 25.02-07.03.08.
- [78] Carvalho, L.H., Costa, M.R.N. and Costa, C.A.V. (2003) A Global Model for the Hot-Pressing of Medium Density Fiberboard (MDF). *Wood Sci. and Technol.*, 37, 241-258.
- [79] Humphrey, P.E. and A.J. Bolton. (1989). The Hot Pressing of Dry-formed Wood-based Composites. Part II: A Simulation Model for Heat and Moisture Transfer, and Typical Results. *Holzforschung*, 43(3), 199-206.
- [80] Thoemen, H., Humprey, P. (2001). Hot pressing of wood-based composites: selected aspects of the physics investigated by means of a simulation. In *Proceedings of The Fifth European Panel Products Symposium*, Llandudno, Wales, UK, pp. 18-30.
- [81] B.G. Heebink, W.F. Lehmann, F.V. Hefty. (1972). Reducing Particleboard Pressing Time: Exploratory Study, Research Paper FPL 180, U.S. Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory Madison, Wisconsin, p.12.
- [82] Miyamoto, Kohta & Suzuki, Shigehiko & Inagaki, Takayoshi & Iwata, Ritsuo. (2002). Effects of press closing time on mat consolidation behavior during hot pressing

and on linear expansion of particleboard. *Journal of Wood Science*. 48. 309-314. 10.1007/BF00831352.

[83] Kamke, F.A. (2003). Physical of hot-pressing. *Fundamentals of Composite Processing*. Madison, Wisconsin. 5-6 November. 126 p.

[84] Baley C. (2005). *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Techniques de l'ingénieur Ref: AM5 130.

[85] Zombori B. (2001). *Modeling the transient effects during the Hot-Pressing of Wood-based Composites*. PhD Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.

[86] Thoemen, H., Humprey, P.E. (2006). Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part I. Heat and Mass transfer. *Holz Roh-Werkst.*, 35, 456-468.

[87] Nenonene. A-Y. (2009). *Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. France.

[88] Bucur, Voichita. (2011). *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. 10.1007/978-90-481-9550-3.

[89] Hayward G, Gachagan A. (1996). An evaluation of 1–3 connectivity composite transducers for air-coupled ultrasonic applications. *JASA* 99(4):2148–2157

[90] McDonald KA (1978) Lumber defect detection by ultrasonics. *Forest Prod Lab Res Paper FPL 311*, USDA, Madison, WI, 25 pp.

[91] Lynnworth LC, Nguyen TH, Smart CS, Khrakovsky OK. (1997). Acoustically isolated paired air transducers for 50, 100,200 or 500kHz applications. *IEEE Trans UFFC* 44 5:1087-1100

- [92] Senalik, C. Adam; Schueneman, Greg; Ross, Robert J. (2014). Ultrasonicbased nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review. General Technical Report FPL-GTR-235. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 31 p.
- [93] Bucur, V. (2011). Delamination in wood products and wood based composites—the state of the art. In: Proceedings, 17th Symposium Nondestructive Testing of Wood, Vol. 2. Sopron, Hungary. 617–624.
- [94] Budapest University of Thechnology and Economics (BME). *Inspection and test techniques*. Repéré à: http://www.ett.bme.hu/meca/Courses/AIT/8_4.html (Vu en juillet 2020).
- [95] Blomme, E., Bulcaen, D., Cool, T., Declercq, F., Lust, P., (2010). Air-coupled ultrasonic assessment of wood veneer. Phys. Procedia 3, 193–200.
- [96] Fang, Yiming & Lin, Lujun & Feng, Hailin & Lu, Zhixiong & Emms, Grant. (2017). Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products. Computers and Electronics in Agriculture. 137. 79-87. 10.1016/j.compag.2017.03.015.
- [97] Hsu, D.K., Utrata, D., Kuo, M. (2010). NDE of Lumber and Natural Fiber Based Products With Air Coupled Ultrasound. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Kingston, RI, pp. 1533–1540.
- [98] Cai, Z., Muehl, J. H. Winandy J.E. (2006). Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard. Forest Prod. J. 56(10):20-25.
- [99] Dai, Yu, Xu C., He, G. (2007). Heat and mass transfer in wood composite panels during hot pressing: Part 4. Experimental investigation and model validation. Holzforschung (61): 83– 88.
- [100] Belley, D. (2009). Détermination des propriétés de transfert de chaleur et de masse des panneaux de fibres de bois. Mémoire de maîtrise. Université Laval. Québec, Canada.

- [101] Eslah, F., Enayati, A. A., Tajvidi, M., Faezipour, M.M., (2012). Regression models for the prediction of poplar particleboard properties based on urea formaldehyde resin content and board density, *Agricultural Science and Technology J.* 14: 1321-1329.
- [102] Lias, H., Kasim, J., Johari, N.A.N., Lyana, I., Mokhtar, M., (2014). Influence of board density and particle sizes on the homogenous particleboard properties from kelempayan (*Neolamarckia cadamba*), *International Journal of Latest Research in Science and Technology* 3(6): 173-176.
- [103] Lin, Wei-Shu & Lee, Wen-Jau. (2017). Influence of curing temperature on the bonding strength of heat-treated plywood made with melamine-urea-formaldehyde and phenol-formaldehyde resins. *European Journal of Wood and Wood Products.* 76. 10.1007/s00107-016-1154-7.
- [104] Ashori, Alireza & Nourbakhsh, Amir. (2008). Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Industrial Crops and Products - IND CROPS PRODUCTS.* 28. 225-230. 10.1016/j.indcrop.2008.02.015.
- [105] Kwon, Jin Heon & Han, Tae. (2012). Effect of resin type and content on properties of composite particleboard made of a mixture of wood and rice husk. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 38. 79–83. 10.1016/j.ijadhadh.2012.04.008.
- [106] Abd El-Sayed, Essam & El-Sakhawy, Mohamed & Kamel, Samir & El-Gendy, Ahmed & Abouzeid, Ragab. (2018). Eco-friendly Mimosa Tannin Adhesive System for Bagasse Particleboard Fabrication. *Egyptian Journal of Chemistry.* 10.21608/ejchem.2018.5413.1479.
- [107] Halligan, A.F. (1970). A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Sci. Technol.* 4, 301–312. <https://doi.org/10.1007/BF00386406>
- [108] He, Weili, Xiaoxiang Lu, and Yukun Hua. (2000). Study on waterproof performance of paint coated OSB. *China-Wood-Industry.* 14(6):28-29 Beijing, China: Chinese Academy of Forestry.

- [109] Chen, Siguo & Du, Chungui & Wellwood, Robert. (2010). Effect of panel density on major properties of oriented strandboard. *Wood and Fiber Science*. 42. 177-184.
- [110] Rofii, Muhammad & Yumigeta, Satomi & Suzuki, Shigehiko & Prayitno, Tibertius. (2013). Effects of Shelling Ratio and Particle Characteristic on Physical Properties of Three-Layered Particleboard Made from Different Wood Species. *Wood Research Journal*. 4. 25-30.
- [111] Baharoğlu, Mehmet & Nemli, Gökay & Sarı, Bünyamin & Birtürk, Turgay & Bardak, Selahattin. (2013). Effects of anatomical and chemical properties of wood on the quality of particleboard. *Composites Part B: Engineering*. 52. 282–285. [10.1016/j.compositesb.2013.04.009](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.009).
- [112] Farrokhpayam, S.R., Valadbeygi, T. & Sanei, E. (2016). Thin particleboard quality: effect of particle size on the properties of the panel. *J Indian Acad Wood Sci* 13, 38–43 <https://doi-org.biblioproxy.uqtr.ca/10.1007/s13196-016-0163-9>
- [113] Li, Xianjun & Cai, Zhiyong & Winandy, Jerrold & Basta, Altaf. (2010). Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries. *Bioresource technology*. 101. 4662-6. [10.1016/j.biortech.2010.01.053](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.053).
- [114] MOTTET, A. L. (1967). The particle geometry factor in particleboard manufacture. *Proc., 1st Washington State Univ. Particleboard Symposium Pullman*, 23–73.
- [115] BRUMBAUGH, J. (1960). Effect of flake dimensions on properties of particleboards. *For. Prod. J.* 10 (5): 243–246.
- [116] Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between +1/–1, or do they?. *J Target Meas Anal Mark* 17, 139–142. <https://doi.org/10.1057/jt.2009.5>
- [117] Garay, R. M. (2012). Lab testing for P3 moisture resistant overlaid particleboards made from wood residues, *BioResources* 7(3), 3093-3103. DOI: [10.15376/biores.7.3.3093-3103](https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3093-3103)

[118] Sedano-Mendoza, M. & Navarrete, P. & Pizzi, A. Pizzi. (2010). Effect of layers relative moisture content on the IB strength of pine tannin bonded particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*. 68. 355-357. 10.1007/s00107-010-0452-8.

[119] Moubarik, Amine & Charrier, Bertrand & Allal, Ahmed & Charrier - El Bouhtoury, Fatima & Pizzi, A. Pizzi. (2010). Development and optimization of a new formaldehyde-free cornstarch and tannin wood adhesive. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 68. 167-177. 10.1007/s00107-009-0357-6.

[120] Gonultas, Oktay. (2018). Properties of Pine Bark Tannin-based Adhesive Produced with Various Hardeners. *Bioresources*. 13. 9066 - 9078. 10.15376/biores.13.4.9066-9078.

Annexe A – Plan d'expérience de la résine PF

Ajuster le groupe

Réponse MOE

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	3,936		0,00012
Température(180,220)	1,680		0,02089
Température*Densité	1,579		0,02638

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	67568,40	67568,4	0,6920
Erreur pure	5	488206,50	97641,3	Prob. > F
Erreur totale	6	555774,90		0,4434
				R carré max.
				0,9486

Résumé de l'ajustement

R carré	0,941467
R carré ajusté	0,912201
Racine de l'erreur quadratique moyenne	304,3504
Moyenne de la réponse	2635,1
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	8939354,0	2979785	32,1690
Erreur	6	555774,9	92629	Prob. > F

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Total corrigé	9	9495128,9		0,0004*

Estimations des coefficients

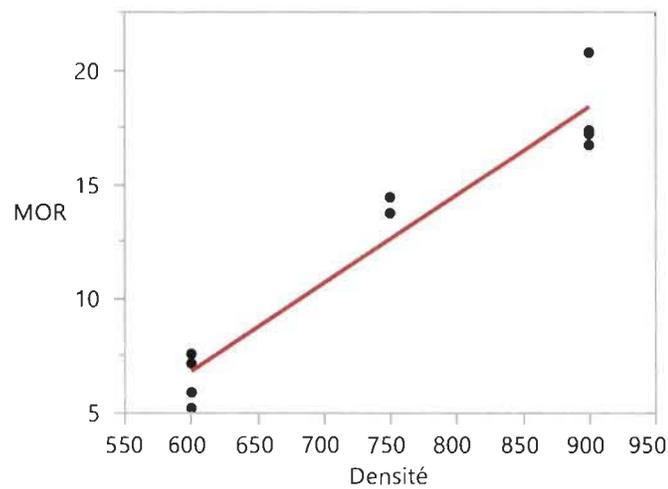
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	2635,1	96,24404	27,38	<,0001*
Température(180,220)	334,5	107,6041	3,11	0,0209*
Densité(600,900)	952	107,6041	8,85	0,0001*
Température*Densité	315	107,6041	2,93	0,0264*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Température(180,220)	1	1	895122,0	9,6635	0,0209*
Densité(600,900)	1	1	7250432,0	78,2738	0,0001*
Température*Densité	1	1	793800,0	8,5697	0,0264*

Réponse MOR

Graphique de régression



Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité(600,900)	5,211		0,00001

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	5,461210	5,46121	2,6995
Erreur pure	7	14,161150	2,02302	Prob. > F
Erreur totale	8	19,622360		0,1444
				R carré max.
				0,9506

Résumé de l'ajustement

R carré	0,931603
R carré ajusté	0,923053
Racine de l'erreur quadratique moyenne	1,56614
Moyenne de la réponse	12,612
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	1	267,26720	267,267	108,9643
Erreur	8	19,62236	2,453	Prob. > F
Total corrigé	9	286,88956		<,0001*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	12,612	0,495257	25,47	<,0001*
Densité (600,900)	5,78	0,553714	10,44	<,0001*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Densité (600,900)	1	1	267,26720	108,9643	<,0001*

Réponse IB

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	1,958		0,01100
Durée (9,15)	1,776		0,01677
Température (180,220)	1,391		0,04061

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	5	0,23179090	0,046358	35,6464
Erreur pure	1	0,00130050	0,001301	Prob. > F
Erreur totale	6	0,23309140		0,1265
				R carré max.
				0,9991

Résumé de l'ajustement

R carré	0,836493
R carré ajusté	0,75474
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,1971

Moyenne de la réponse	0,5659
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	1,1924855	0,397495	10,2319
Erreur	6	0,2330914	0,038849	Prob. > F
Total corrigé	9	1,4255769		0,0090*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	0,5659	0,062329	9,08	0,0001*
Température (180,220)	0,18125	0,069686	2,60	0,0406*
Durée (9,15)	0,22875	0,069686	3,28	0,0168*
Densité (600,900)	0,25275	0,069686	3,63	0,0110*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Température (180,220)	1	1	0,26281250	6,7651	0,0406*
Durée (9,15)	1	1	0,41861250	10,7755	0,0168*
Densité (600,900)	1	1	0,51106050	13,1552	0,0110*

Réponse Dureté

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	3,421		0,00038
Température (180,220)	1,952		0,01116
Température*Densité	1,671		0,02132

Source	LogWorth		P-value
Durée (9,15)	1,556		0,02778

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	4	1809099,1	452275	259,8534
Erreur pure	1	1740,5	1741	Prob. > F
Erreur totale	5	1810839,6		0,0465*
				R carré max.
				1,0000

Résumé de l'ajustement

R carré	0,955465
R carré ajusté	0,919836
Racine de l'erreur quadratique moyenne	601,8039
Moyenne de la réponse	3850,7
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

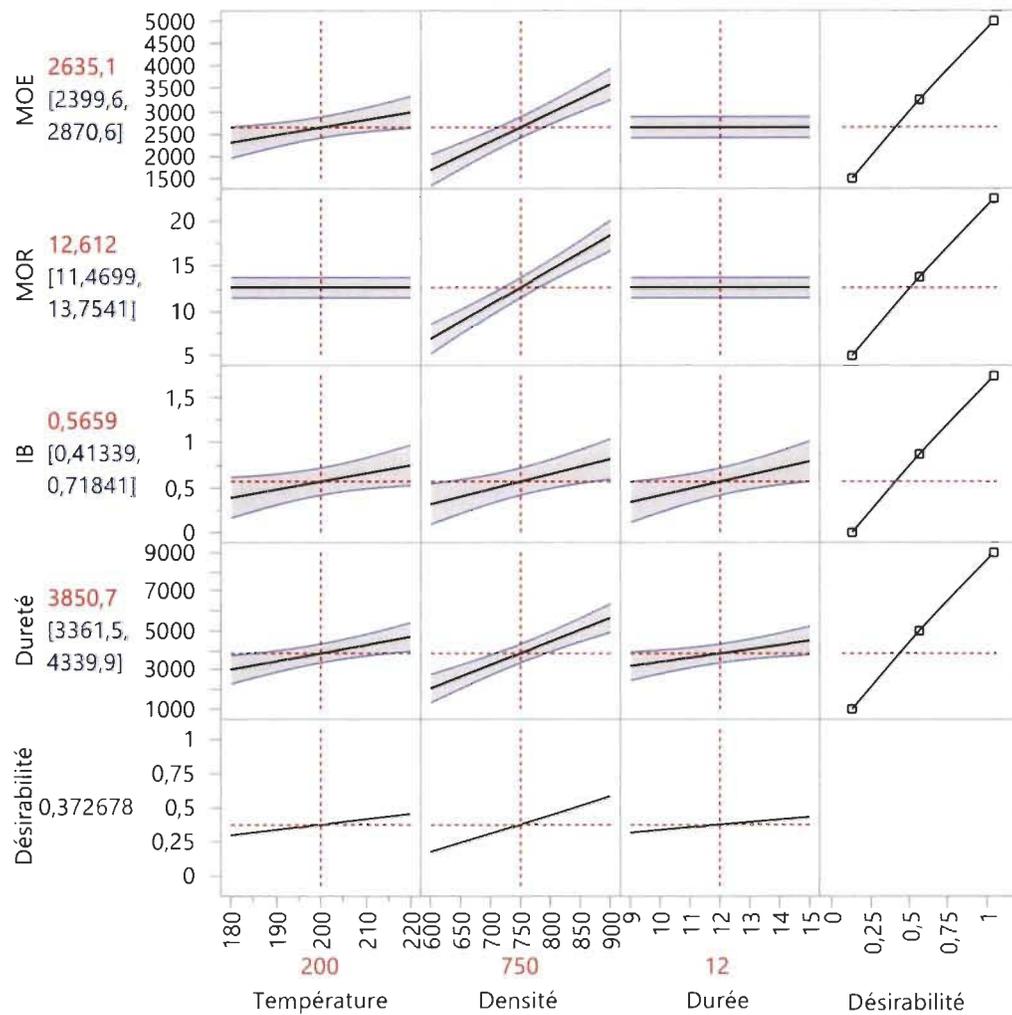
Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	4	38849906	9712477	26,8176
Erreur	5	1810840	362168	Prob. > F
Total corrigé	9	40660746		0,0014*

Estimations des coefficients

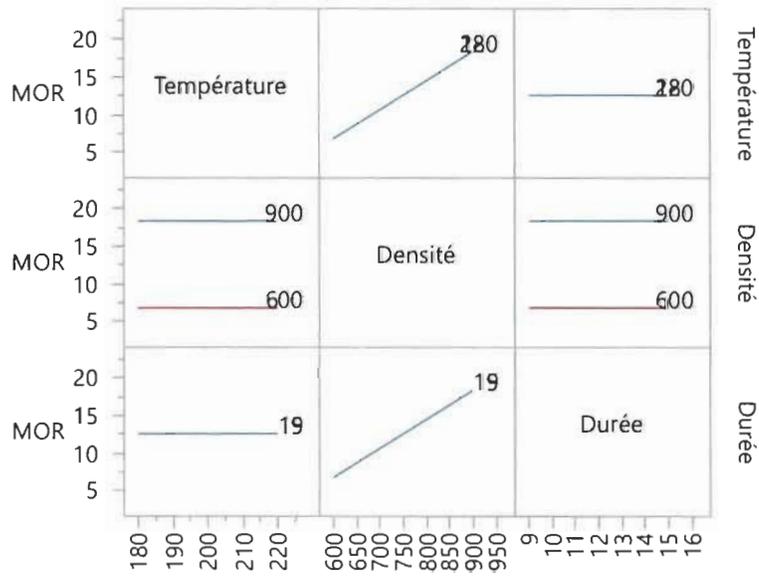
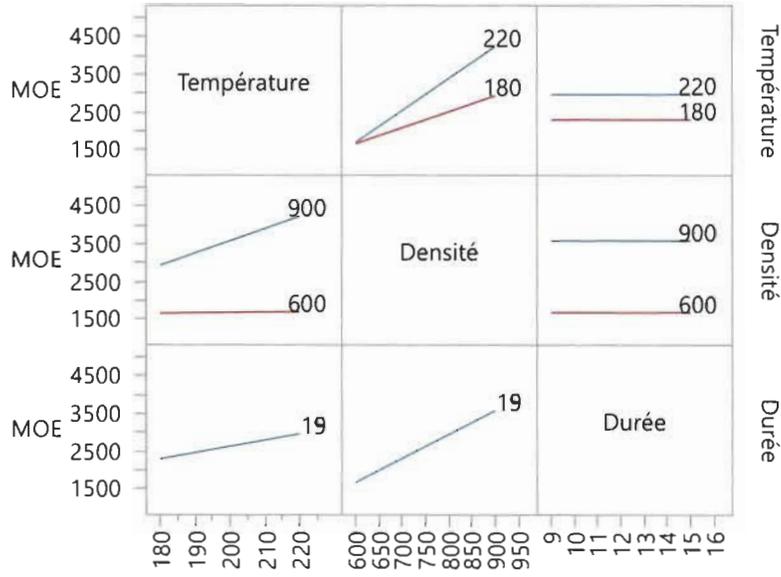
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	3850,7	190,3071	20,23	<,0001*

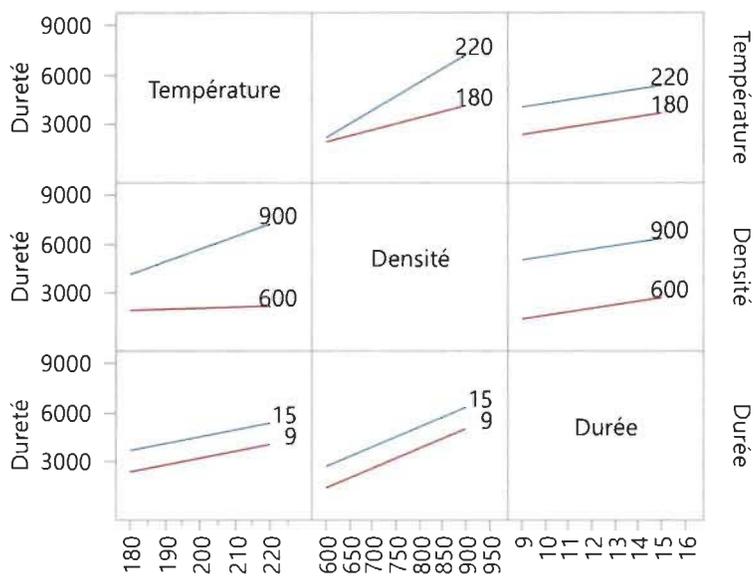
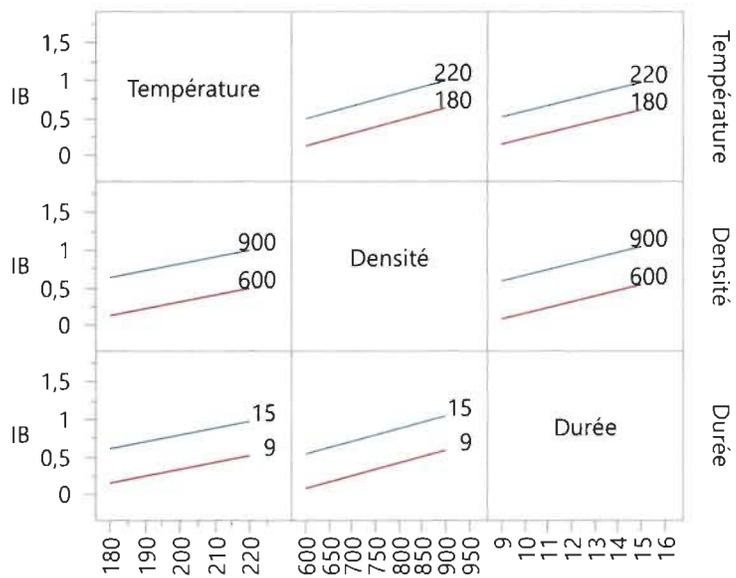
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Température(180,220)	834,5	212,7698	3,92	0,0112*
Durée(9,15)	653,25	212,7698	3,07	0,0278*
Densité(600,900)	1799,5	212,7698	8,46	0,0004*
Température*Densité	703,5	212,7698	3,31	0,0213*

Profileur de prévision



Profils d'interaction



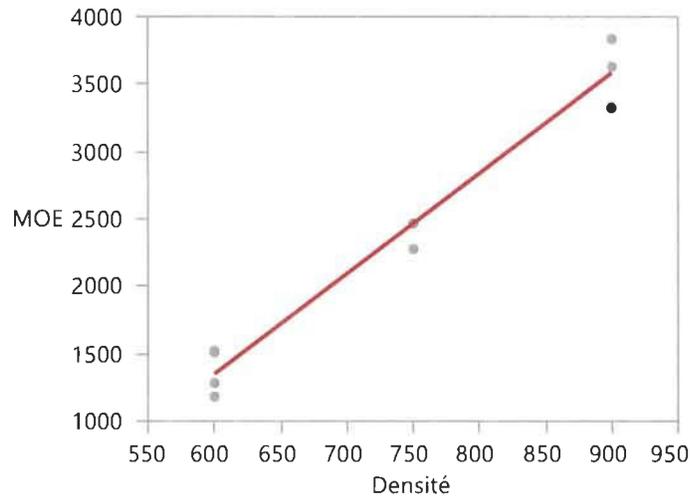


Annexe B – Plan d'expérience de la résine MUF

Ajuster le groupe

Réponse MOE

Graphique de régression



Résumé des effets

Source	Log Worth	P-value
Densité (600,900)	6,957	0,00000

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	22325,63	22325,6	0,6660
Erreur pure	7	234654,75	33522,1	Prob. > F
Erreur totale	8	256980,38		0,4413
				R carré max.
				0,9770

Résumé de l'ajustement

R carré	0,974862
R carré ajusté	0,97172
Racine de l'erreur quadratique moyenne	179,2276
Moyenne de la réponse	2467,5
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	1	9965880	9965880	310,2456
Erreur	8	256980	32123	Prob. > F
Total corrigé	9	10222861		<,0001*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	2467,5	56,67676	43,54	<,0001*
Densité (600,900)	1116,125	63,36654	17,61	<,0001*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Densité (600,900)	1	1	9965880,1	310,2456	<,0001*

Réponse MOR

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	3,292		0,00051
Température (180,220)	1,146		0,07138

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	2	14,893015	7,44651	2,2086
Erreur pure	5	16,858300	3,37166	Prob. > F
Erreur totale	7	31,751315		0,2054
				R carré max.
				0,9230

Résumé de l'ajustement

R carré	0,854899
R carré ajusté	0,813441
Racine de l'erreur quadratique moyenne	2,129766
Moyenne de la réponse	10,426
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	2	187,07053	93,5353	20,6211
Erreur	7	31,75131	4,5359	Prob. > F
Total corrigé	9	218,82184		0,0012*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	10,426	0,673491	15,48	<,0001*
Température (180,220)	-1,59875	0,752986	-2,12	0,0714
Densité (600,900)	4,56375	0,752986	6,06	0,0005*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Température (180,220)	1	1	20,44801	4,5080	0,0714
Densité (600,900)	1	1	166,62251	36,7342	0,0005*

Réponse IB

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	2,357		0,00440
% Résine (8,12)	1,403		0,03952

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	2	0,09850435	0,049252	9,4232
Erreur pure	5	0,02613350	0,005227	Prob. > F
Erreur totale	7	0,12463785		0,0201*
				R carré max.
				0,9518

Résumé de l'ajustement

R carré	0,77003
R carré ajusté	0,704324
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,133437
Moyenne de la réponse	0,6837
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	2	0,41733625	0,208668	11,7194
Erreur	7	0,12463785	0,017805	Prob. > F
Total corrigé	9	0,54197410		0,0058*

Estimations des coefficients

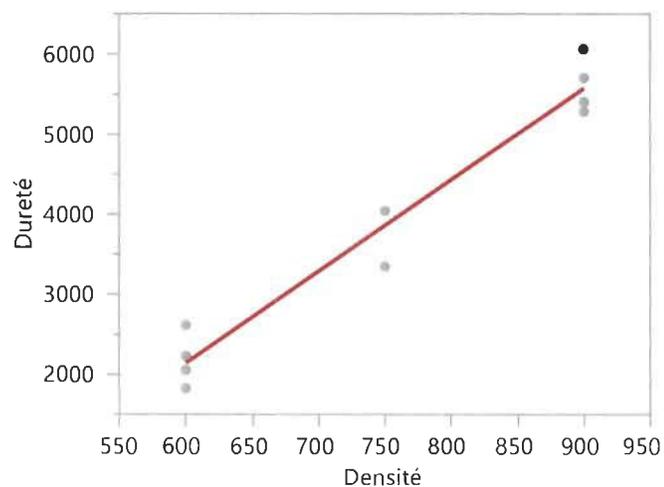
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	0,6837	0,042196	16,20	<,0001*
% Résine (8,12)	0,119125	0,047177	2,53	0,0395*
Densité (600,900)	0,194875	0,047177	4,13	0,0044*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
% Résine (8,12)	1	1	0,11352613	6,3759	0,0395*
Densité (600,900)	1	1	0,30381013	17,0628	0,0044*

Réponse Dureté

Graphique de régression



Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	6,112		0,00000

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	66504,0	66504	0,4962
Erreur pure	7	938127,3	134018	Prob. > F
Erreur totale	8	1004631,3		0,5039
				R carré max.
				0,9619

Résumé de l'ajustement

R carré	0,959161
R carré ajusté	0,954056
Racine de l'erreur quadratique moyenne	354,3711
Moyenne de la réponse	3858,6
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	1	23595015	23595015	187,8900
Erreur	8	1004631	125578,91	Prob. > F
Total corrigé	9	24599646		<,0001*

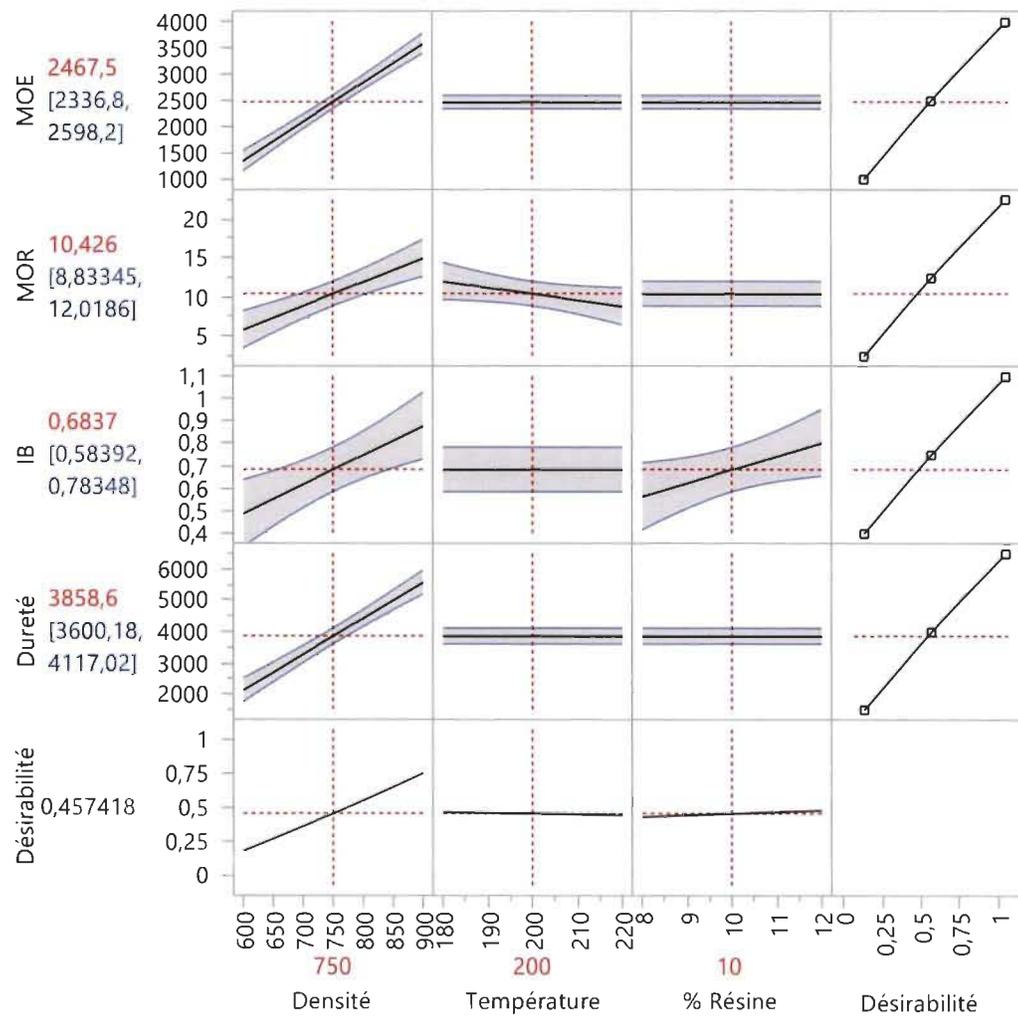
Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	3858,6	112,062	34,43	<,0001*
Densité (600,900)	1717,375	125,2891	13,71	<,0001*

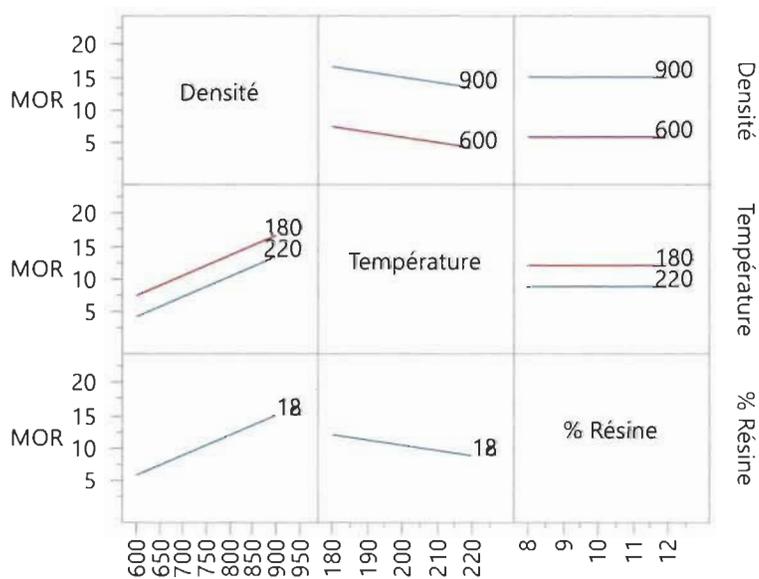
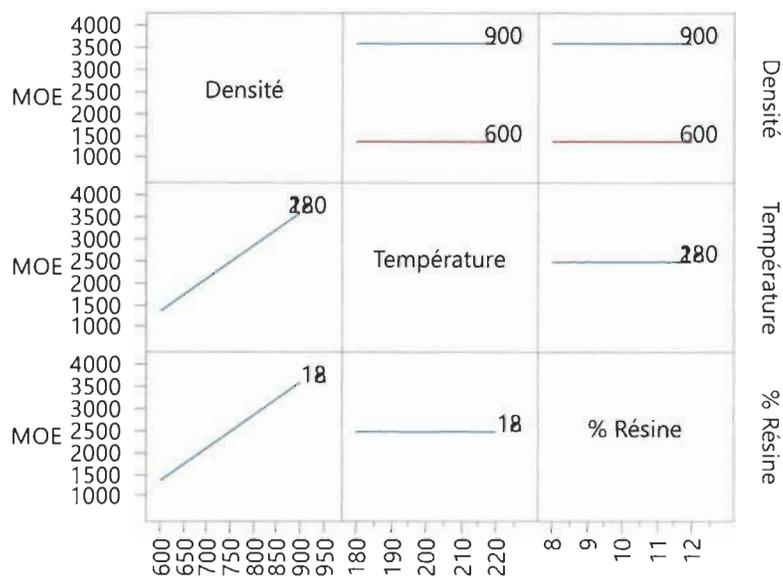
Tests des effets

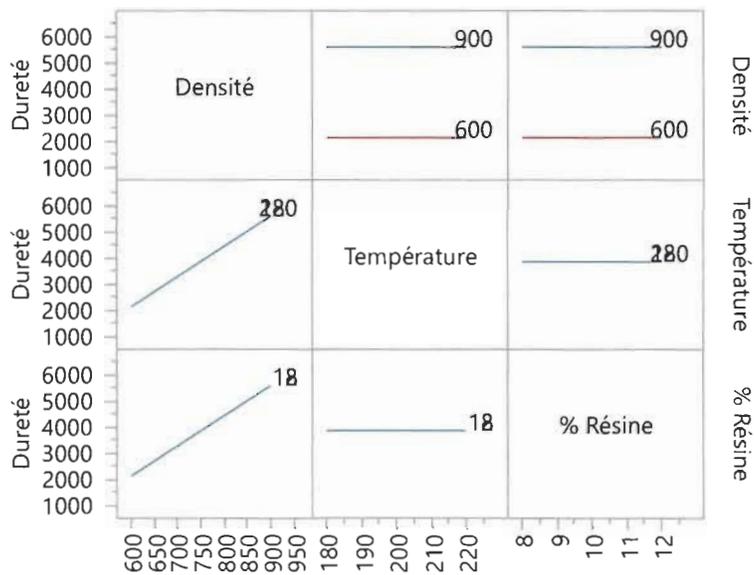
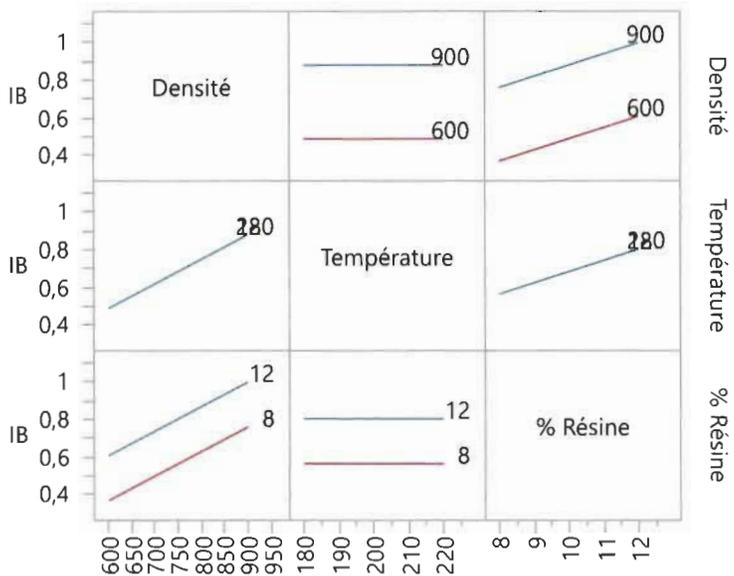
Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Densité (600,900)	1	1	23595015	187,8900	<,0001*

Profil de prévision



Profils d'interaction





Annexe C – Plan d'expérience de la résine tannin

Ajuster le groupe

Réponse MOE

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	3,936		0,00012
Température (180,220)	1,680		0,02089
Température*Densité	1,579		0,02638

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	67568,40	67568,4	0,6920
Erreur pure	5	488206,50	97641,3	Prob. > F
Erreur totale	6	555774,90		0,4434
				R carré max.
				0,9486

Résumé de l'ajustement

R carré	0,941467
R carré ajusté	0,912201
Racine de l'erreur quadratique moyenne	304,3504
Moyenne de la réponse	2635,1
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	8939354,0	2979785	32,1690
Erreur	6	555774,9	92629	Prob. > F

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Total corrigé	9	9495128,9		0,0004*

Estimations des coefficients

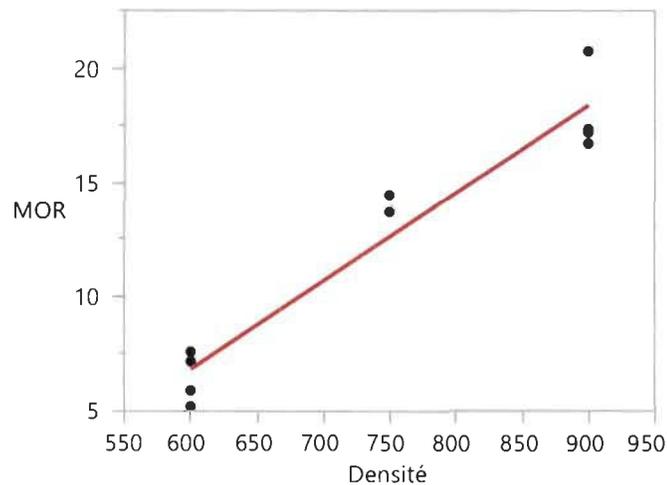
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	2635,1	96,24404	27,38	<,0001*
Température (180,220)	334,5	107,6041	3,11	0,0209*
Densité (600,900)	952	107,6041	8,85	0,0001*
Température*Densité	315	107,6041	2,93	0,0264*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Température (180,220)	1	1	895122,0	9,6635	0,0209*
Densité (600,900)	1	1	7250432,0	78,2738	0,0001*
Température*Densité	1	1	793800,0	8,5697	0,0264*

Réponse MOR

Graphique de régression



Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	5,211		0,00001

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	1	5,461210	5,46121	2,6995
Erreur pure	7	14,161150	2,02302	Prob. > F
Erreur totale	8	19,622360		0,1444
				R carré max.
				0,9506

Résumé de l'ajustement

R carré	0,931603
R carré ajusté	0,923053
Racine de l'erreur quadratique moyenne	1,56614
Moyenne de la réponse	12,612
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	1	267,26720	267,267	108,9643
Erreur	8	19,62236	2,453	Prob. > F
Total corrigé	9	286,88956		<,0001*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	12,612	0,495257	25,47	<,0001*
Densité (600,900)	5,78	0,553714	10,44	<,0001*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Densité (600,900)	1	1	267,26720	108,9643	<,0001*

Réponse IB

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	1,958		0,01100
Durée (9,15)	1,776		0,01677
Température (180,220)	1,391		0,04061

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	5	0,23179090	0,046358	35,6464
Erreur pure	1	0,00130050	0,001301	Prob. > F
Erreur totale	6	0,23309140		0,1265
				R carré max.
				0,9991

Résumé de l'ajustement

R carré	0,836493
R carré ajusté	0,75474
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,1971

Moyenne de la réponse	0,5659
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	1,1924855	0,397495	10,2319
Erreur	6	0,2330914	0,038849	Prob. > F
Total corrigé	9	1,4255769		0,0090*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	0,5659	0,062329	9,08	0,0001*
Température (180,220)	0,18125	0,069686	2,60	0,0406*
Durée (9,15)	0,22875	0,069686	3,28	0,0168*
Densité (600,900)	0,25275	0,069686	3,63	0,0110*

Tests des effets

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Température (180,220)	1	1	0,26281250	6,7651	0,0406*
Durée (9,15)	1	1	0,41861250	10,7755	0,0168*
Densité (600,900)	1	1	0,51106050	13,1552	0,0110*

Réponse Dureté

Résumé des effets

Source	LogWorth		P-value
Densité (600,900)	3,421		0,00038
Température (180,220)	1,952		0,01116
Température*Densité	1,671		0,02132

Source	LogWorth		P-value
Durée (9,15)	1,556		0,02778

Défaut d'ajustement

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Défaut d'ajustement	4	1809099,1	452275	259,8534
Erreur pure	1	1740,5	1741	Prob. > F
Erreur totale	5	1810839,6		0,0465*
				R carré max.
				1,0000

Résumé de l'ajustement

R carré	0,955465
R carré ajusté	0,919836
Racine de l'erreur quadratique moyenne	601,8039
Moyenne de la réponse	3850,7
Observations (ou sommes pondérées)	10

Analyse de la variance

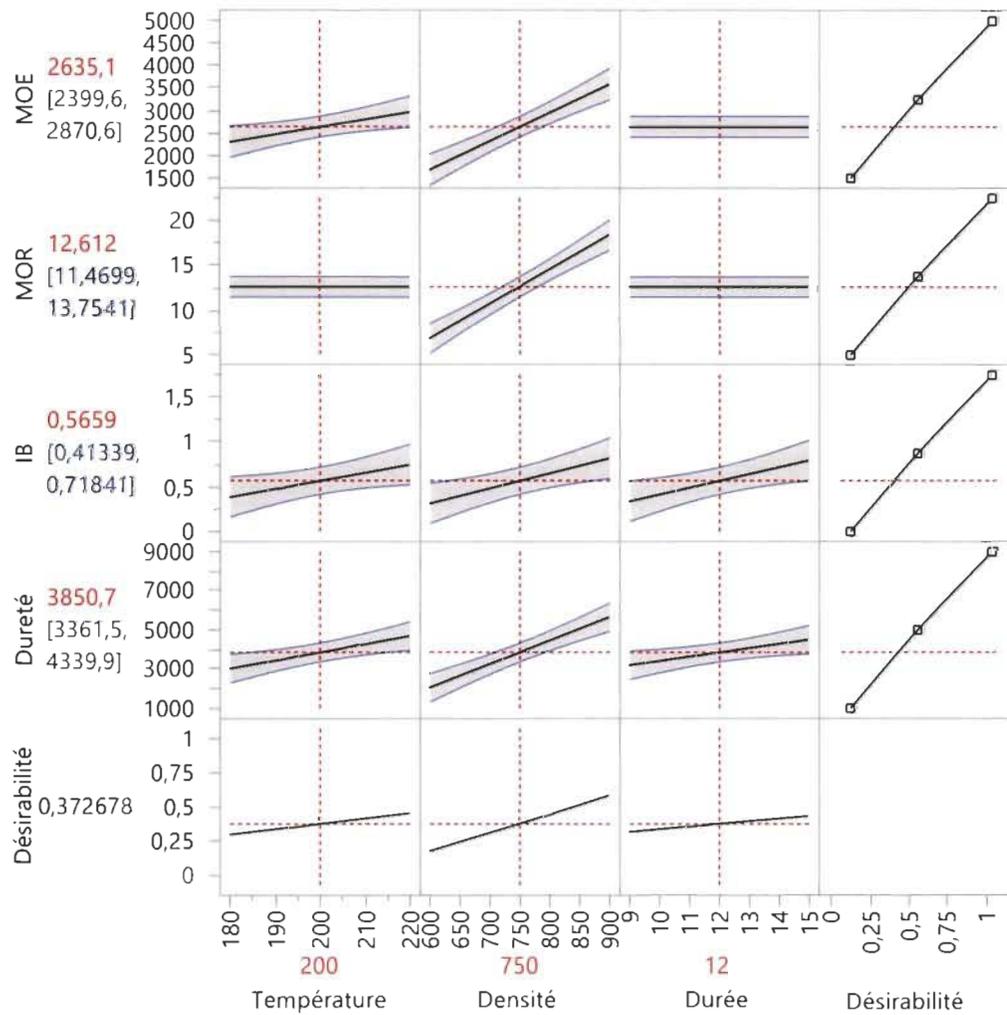
Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	4	38849906	9712477	26,8176
Erreur	5	1810840	362168	Prob. > F
Total corrigé	9	40660746		0,0014*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Constante	3850,7	190,3071	20,23	<,0001*

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
Température (180,220)	834,5	212,7698	3,92	0,0112*
Durée (9,15)	653,25	212,7698	3,07	0,0278*
Densité (600,900)	1799,5	212,7698	8,46	0,0004*
Température*Densité	703,5	212,7698	3,31	0,0213*

Profileur de prévision



Profils d'interaction

