

ROGER PEDIEU

**VALORISATION DES RÉSIDUS D'ÉCORCE DE
BOULEAU BLANC (*BETULA PAPYRIFERA*) SOUS
FORME DE FABRICATION DE PANNEAUX**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en sciences du bois
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2008

© Roger Pedieu, 2008

Résumé

Des 3 500 000 tonnes métriques anhydres (TMA) d'écorces produites en 2004 par l'industrie forestière au Québec, 96 000 (soit 2,7% de la masse totale des écorces produites la même année) étaient celles de bouleau blanc. Ces écorces sont en grande partie utilisées dans la production d'énergie alors qu'elles généreraient plus de gains si elles étaient utilisées pour la fabrication de panneaux agglomérés.

L'objectif de ce projet de recherche est de mettre sur pied des stratégies permettant d'utiliser efficacement les particules d'écorce de bouleau pour fabriquer différents types de panneaux de masse volumique moyenne qui satisfont les exigences de la norme des panneaux conventionnels. Les essais préliminaires ont laissé entrevoir qu'il était difficile de fabriquer les panneaux de masse volumique moyenne exclusivement à base de ces particules d'écorce, à cause de leur faible taux de cellulose, surtout dans les particules d'écorce externe qui ne fait pas d'elles une matière structurale comme le bois. En outre, la forme granuleuse de la partie interne de cette écorce ne favorise pas l'effet d'entrelacement qui contribue fortement à l'amélioration des propriétés de flexion des panneaux. Également, la forte concentration des subérines dans la partie externe de cette écorce la rend très hydrophobe et sa surface est comme celle du téflon, c'est-à-dire, très difficile à mouiller. Les parties externe et interne de cette écorce ont des propriétés différentes, et pour pallier ces difficultés, la solution idéale consistait à concevoir des panneaux mixtes où ces particules d'écorce seraient renforcées avec les particules, les fibres et les lamelles de bois.

Le premier type de panneau mis sur pied est fait d'un mélange de fibres de bois et de particules d'écorce interne de bouleau blanc dans la couche médiane et de fibres de bois dans les couches couvrantes. Le pourcentage de fibres de bois (deux niveaux) et le pourcentage de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane (trois niveaux) constituaient les deux facteurs du dispositif utilisé pour la fabrication de ce type de panneaux. Les panneaux fabriqués ont tous eu des propriétés mécaniques qui rencontraient les exigences de la norme, le panneau avec 25% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce de la couche médiane ont eu les meilleurs propriétés mécaniques alors que le panneau le plus stable

dimensionnellement est celui avec 22% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 5% de fibres de bois mélangées aux particules d'écorce de la couche médiane.

Quant au second type de panneau, il est constitué de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes et respectivement de particules et de fibres de bois dans la couche médiane. Les deux facteurs intervenant dans sa fabrication sont le type de matériel dans la couche médiane (particules de bois versus fibres de bois) et le pourcentage de particules d'écorce dans les couches couvrantes. La méthode d'analyse statistique utilisée a permis de sélectionner le panneau avec 45% de particules d'écorce externe de bouleau dans les couches couvrantes et les particules de bois dans la couche médiane comme le meilleur du groupe, surtout en se basant sur le critère de la stabilité dimensionnelle mesurée par la dilatation linéaire.

Le troisième type de panneau est un panneau sous-plancher de 8 mm d'épaisseur et densifié à 800 kg/m^3 . Il est constitué de particules d'écorce externe de bouleau dans les couches couvrantes et de particules de bois dans la couche médiane. Les deux facteurs utilisés pour sa conception sont : le pourcentage de la résine phénol-formaldéhyde (PF) utilisée pour encoller les particules d'écorce des couches couvrantes (trois niveaux de pourcentage) et le traitement des particules d'écorce utilisées (écorce non traitée à la soude versus écorce traitée à la soude). Les particules d'écorce sont traitées afin de mettre en évidence leur impact sur les propriétés des panneaux produits. Le traitement à la soude a diminué les propriétés des panneaux produits en affaiblissant les structures de l'écorce externe de bouleau. Le meilleur panneau du groupe est celui dont les particules d'écorce externe de bouleau non traitées à la soude sont encollées avec le plus bas pourcentage de résine PF.

Le dernier type de panneau concerne un panneau mixte avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc au centre et les lamelles de bois dans les couches couvrantes. Deux facteurs sont utilisés dans sa mise en place : l'orientation des lamelles dans les couches couvrantes (orientées versus non orientées) et le type de matériel dans la couche médiane (écorce non traitée à la soude, écorce non traitée à la soude plus 10% de fibres de bois, écorce traitée à la soude). Le traitement à la soude n'a pas produit les effets escomptés (amélioration des propriétés mécaniques). L'analyse statistique utilisée dans un plan

factoriel en blocs complets a permis de déterminer le meilleur panneau comme étant celui avec les particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois.

La méthode mise sur pied pour les fabrications des quatre types de panneaux mixtes susmentionnés permet de valoriser plus de 50% (par rapport à la masse anhydre totale des particules utilisées pour fabriquer le panneau) de particules d'écorce de bouleau blanc par panneau fabriqué, ce qui conforte l'idée d'employer de façon judicieuse cette écorce comme source alternative d'approvisionnement en matière première pour les usines de panneaux.

Abstract

In the year 2004 alone, 96 000 dry metric tons (DMT) of white birch bark were produced by forest industries in Quebec. This constituted approximately 2.7% of total bark production for the region. These barks which are mostly used for energy production would have generated more benefits had they been used for agglomerated panels manufacture.

The objective of this research project was to set up strategies which will make possible to effectively use bark particles of white birch, for the manufacture of various types of medium density panels that meet the standard requirements of particleboards. The preliminary tests revealed that, it was difficult to manufacture medium density panels based on bark particles exclusively, due to the following disadvantages. (1): their low cellulose content, especially on the outer bark particles, does not make them a structural material like wood; (2): the granular form of the inner bark does not contribute to the interlacing effects, which strongly contribute to the improvement of panels bending properties; (3): the high concentration of suberins on the outer bark makes it very hydrophobic with a surface similar to teflon which is very difficult to wet; and (4): the outer and inner parts barks have different properties. In the face of such difficulties, the ideal solution consisted in designing mixed panels where these bark particles will be reinforced with wood particles, wood fibres and wood strands.

The first panel type was set up - a mixed panel with wood fibres in the surface layers, and a mixture of wood fibres and inner bark particles of white birch in the core layer. The percentage of wood fibres (two levels) and the percentage of wood fibres added to the inner bark particles in the core layer (three levels) were the two panels manufacturing factors. All manufactured panels fulfilled the standard requirements for all mechanical properties. Panel with 25% wood fibres in the surface layers and 9% wood fibres mixed with bark particles in the core layer had the best mechanical properties, while panel with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres mixed with bark particles in the core layer was the most dimensionally stable.

The second panel type is composed of outer bark particles of white birch in the surface layers and wood material in the core layer. The two manufacturing factors were: the type of wood material in the core layer (wood particles versus wood fibres) and the percentage of outer bark particles in the surface layers. The statistical analysis method used made possible to select the panel with 45% outer bark particles of white birch in the surface layers and wood particles in the core layer as the best, especially by taking into account the dimensional stability criterion based on linear expansion measurement.

The third panel type was a sub-flooring panel with a thickness of 8 mm and a density of 800 kg/m³. It was composed of outer bark particles in the surface layers and wood particles in the core layer. The two factors used for its experimental design were: the percentage of phenol-formaldehyde resin (PF) used to bond bark particles of surface layers (three levels of percentage) and the treatment of bark particles used (untreated bark versus bark treated with soda). The bark particles were treated in order to highlight their impact on the properties of manufactured panels. The alkali treatment lowered the properties of manufactured panels because soda treatment weakened the structures of outer bark particles of white birch used. The best panel was that with untreated outer bark particles of white birch, bonded with the lowest percentage of PF (5%).

The last panel type was a mixed panel with outer bark particles of white birch in the core layer and wood strands in the surface layers. Two factors were used in its setting-up: the orientation of strands in the surface layers (oriented versus not non oriented) and the type of material in core layer (untreated bark particles, a mix of untreated bark particle and 10% wood fibres, bark particle treated with soda). The alkali treatment did not produce the expected effects (improvement of panels' mechanical properties). The statistical analysis used in a factorial design in complete blocks made possible to choose the panel with untreated outer bark particles without wood fibres addition as the best.

The method used to manufacture the above-mentioned mixed panels permitted to add higher proportion of white birch bark particles in each manufactured panel.

The result of the present research project demonstrates that, bark particles of white birch, could be an alternative source of raw material supply for wood-based composite mills.

Avant-Propos

Les résultats présentés dans cette thèse ont été acquis à l'issue d'une longue période marquée par les difficultés à mettre sur pied des stratégies adéquates permettant d'utiliser efficacement les particules d'écorce de bouleau blanc dans la fabrication de panneaux.

Je ne saurais commencer sans remercier ceux qui de près ou de loin ont conçu et permis la réalisation de ce projet de recherche. Je commence par mon directeur de thèse, Bernard Riedl qui m'a informé par courriel de l'existence de ce projet à l'Université Laval pendant que j'étais en train d'achever mon programme de maîtrise à l'Université de Goettingen en Allemagne. Je le remercie pour les conseils prodigués, qui ont permis de mener ce travail à bon port. Je remercie le professeur André Pichette de l'Université de Chicoutimi qui n'a ménagé aucun effort pour codiriger ce travail. Je n'oublie pas tous les professeurs du Centre de Recherche sur le Bois (CRB) qui m'ont permis d'assister à leurs cours et d'approfondir ainsi mes connaissances dans les autres spécialités des sciences du bois.

L'expression de ma gratitude s'adresse aussi aux organismes et sociétés suivants :

- Le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) pour le financement du projet;
- La scierie Thomas Louis Tremblay Inc. de Ste Monique pour la livraison des particules d'écorce de bouleau blanc utilisées dans ce projet.

Remerciements à tous les membres du Centre de Recherche sur le Bois (CRB) en particulier Serge Plamondon qui m'a initié aux équipements du laboratoire de pressage et m'a longtemps assisté dans la fabrication de panneaux, David Lagueux qui a relayé Serge, Yves Bédard qui m'a initié à l'utilisation et à la manipulation des équipements du laboratoire de chimie, Luc Germain et Daniel Bourgault pour la préparations des échantillons à tester, Sylvain Auger pour l'initiation et l'utilisation des équipements d'essais mécaniques et physiques, Damien Voinot pour la relecture et les éventuelles corrections de plusieurs parties de cette thèse, Colette Bourcier et Guylaine Bélanger pour le volet administratif.

Je remercie aussi ma sœur Alice Chantal Tchandem Kamgang, journaliste à la Radio Télévision Camerounaise (CRTV) pour la relecture de la thèse et les corrections effectuées.

Cette thèse a fait l'objet de cinq articles dont trois ont été acceptés. La décision des deux autres est encore attendue.

Article #1

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Measurement of wood and bark particles acidity and their impact on the curing of urea-formaldehyde resin during the hot pressing of mixed panels. Accepté pour publication à la revue Holz als Roh- und werkstoff. Cet article constitue le Chapitre 4 de la thèse.

Article #2

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Properties of mixed particleboards based on white birch (*Betula papyrifera*) inner bark particles and reinforced with wood fibres. Article accepté pour publication à la revue Holz als Roh- und werkstoff. Cet article constitue le Chapitre 5 de la thèse.

Article # 3

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Physical and mechanical properties of panels based on white birch outer bark: mixed panels with wood particles versus wood fibres. Il a été soumis à la revue maderas : ciencia y tecnologia. Cet article constitue le Chapitre 6 de la thèse.

Article #4

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Properties of white birch (*Betula Papyrifera*) outer bark particleboards with reinforcement of coarse wood particles in the core layer. Article accepté à la revue Annals of Forest Science. Il constitue le Chapitre 7 de la thèse.

Article # 5

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Substitution effect of strands in the core layer of OSB by the outer bark particles of white birch on its mechanical and physical properties. Article soumis à la revue Bio-ressources. Cet article constitue le Chapitre 8 de la thèse.

Le premier auteur, Pedieu R. étudiant en doctorat est l'auteur principal des articles et est responsable de la revue de littérature, de l'application de la méthodologie, de l'obtention des résultats, des analyses statistiques et finalement de la rédaction des articles. Les professeurs Bernard Riedl et André Pichette ont été respectivement le directeur et le codirecteur de la thèse. Ils ont été impliqués dans la planification de la recherche et dans la révision des articles.

Deux notes de recherche ont été publiées sur le site du Centre de Recherche sur le Bois (CRB) de l'Université Laval.

La première note ayant le numéro 8 dans le site du CRB porte sur les propriétés des panneaux à base d'écorce interne de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) avec renfort de fibres de bois.

Quant à la seconde note elle a le numéro 19 dans le même site et concerne les propriétés des panneaux d'écorce de bouleau blanc (*Betula papyrifera*) et de particules de bois pour utilisation en sous-planchers.

Les résultats d'une partie des essais préliminaires ont été présentés au 74^{ème} Congrès de l'Association Francophone pour le Savoir (ACFAS), colloque 680 « unissons nos forces ». Université McGill, 15-19 mai 2006.

Le chapitre 8 de la thèse (intitulé l'investigation des propriétés des panneaux mixtes avec les lamelles de bois dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc au centre) a fait l'objet d'une présentation au 76^{ème} Congrès de l'Association Francophone pour le Savoir (ACFAS), colloque 210 «Le bois dans la construction ». Centre des Congrès de Québec, 5 – 8 mai 2008.

Une partie du chapitre 5 intitulée (Properties of white birch inner bark (*Betula papyrifera*) particleboard with reinforcement of wood fibres) a constitué l'objet d'une affiche présentée à la Forest Products Society (FPS) lors de la « 61st International Convention » à Knoxville, Convention Center, TN, USA, June 10 – 13, 2007

Une affiche a été aussi faite sur une partie du chapitre 6 intitulée (Physical and mechanical properties of panels based on white birch outer bark: mixed panels with wood particles versus wood fibres) et présenté au « International Wood Composites Symposium » à Red Lion Hotel on Fifth Avenue à Seattle, WA, USA, March 31- April 2, 2008.

À tous ceux qui me sont chers

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iv
Avant-Propos.....	vi
Table des matières.....	xi
Liste des tableaux.....	xv
Liste des figures.....	xviii
Introduction.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE.....	5
1.1 Bref rappel sur l'anatomie de l'écorce en général.....	5
1.2 Composition chimique générale du bois et de l'écorce externe de bouleau (<i>Betula verrucosa</i>).....	6
1.3 Utilisation de l'écorce en général.....	7
1.3.1 Utilisation de l'écorce comme combustible.....	8
1.3.2 Utilisation de l'écorce pour la production de l'énergie.....	8
1.3.3 Utilisation de l'écorce de certaines essences pour la production du liège et du liber 8	
1.3.4 Utilisation de l'écorce en horticulture et en biotechnique.....	9
1.3.5 Utilisation de l'écorce pour la fabrication de panneaux.....	10
1.4 Bref aperçu sur la fiche de bouleau blanc.....	12
1.4.1 Origine et habitat.....	12
1.4.2 Description.....	12
1.4.3 Utilisation de son écorce.....	12
1.5 Les espèces de bouleau dans l'est du Canada.....	13
1.6 Évolution des composites à base du bois depuis 1905 et production mondiale des trois plus importants panneaux à base de bois.....	14
1.7 Bref aperçu sur les principaux adhésifs à être utilisés dans le cadre de notre travail 16	
1.7.1 La colle urée-formaldéhyde.....	16
1.7.2 La colle phénol formaldéhyde (PF).....	17
1.8 Les panneaux de particules conventionnelles (ou particules de bois).....	19
1.8.1 Séchage des particules, addition de la résine et de la cire tels qu'exigés dans les industries de fabrication de panneaux de particules.....	21
1.9 Quelques notions sur la mouillabilité et l'angle de contact.....	22
1.10 Objectif général.....	27
CHAPITRE 2 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES.....	28
2.1 Description de la préparation des particules d'écorces utilisées et des premiers essais 28	
2.2 Sommaire de quelques essais réalisés avec les nouvelles particules préparées....	30
2.2.1 Panneaux monocouches avec renfort des fibres de bois.....	30
2.2.2 Panneaux mixtes trois couches avec renfort de particules ou fibres de bois	32
CHAPITRE 3 : PARTIE EXPÉRIMENTALE.....	35
Résumé.....	35
3.1 Introduction.....	36
3.2 Matériels et méthodes.....	38

3.2.1	Préparation des particules pour les analyses chimiques	38
3.2.2	Détermination du taux de cendre	39
3.2.3	Détermination du taux de cellulose de pentosanes et de lignine	40
3.2.4	Mesure de pH et du pouvoir tampon	44
3.2.5	Extraction quantitative des extractibles d'écorce	48
3.2.6	Effet de l'extraction qualitative à l'eau chaude des particules d'écorce sur leur acidité.....	55
CHAPITRE 4: MEASUREMENT OF WOOD AND BARK PARTICLES ACIDITY AND THEIR IMPACT ON THE CURING OF UREA FORMALDEHYDE RESIN DURING THE HOT PRESSING OF MIXED PANELS		62
Abstract.....		62
4.1	Introduction.....	62
4.2	Materials and Methods.....	63
4.2.1	Samples preparation.....	63
4.2.2	Experimental design	64
4.2.3	Measurement of pH value and buffering capacity	66
4.2.4	Selected contrasts for the analysis of variance (ANOVA)	66
4.2.5	Results.....	67
4.2.6	Discussion.....	69
4.3	Conclusion	72
CHAPITRE 5: PROPERTIES OF PARTICLEBOARDS BASED ON INNER BARK OF WHITE BIRCH (<i>Betula papyrifera</i>) AND REINFORCED WITH WOOD FIBRES		73
Abstract.....		73
Résumé.....		73
5.1	Introduction.....	74
5.2	Material and methods.....	75
5.2.1	White birch inner bark particles preparation	75
5.2.2	Experimental design	75
5.2.3	Panel manufacture and tests.....	78
5.2.4	Determination of mechanical and physical properties.....	79
5.3	Results and discussion	80
5.3.1	Results of mechanical properties	80
5.3.2	Results of physical properties	86
5.3.3	Analysis of variance.....	90
5.3.4	Result of comparison test using LSD (least significant difference) test.....	94
5.3.5	Regression.....	95
5.4	Conclusion	95
CHAPITRE 6: PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PANEL BASED ON OUTER BIRCH BARK: MIXED PANELS WITH WOOD PARTICLES VERSUS WOOD FIBRES		97
Abstract.....		97
Résumé.....		98
6.1	Introduction.....	99
6.2	Material and methods.....	100
6.2.1	White birch outer bark particles preparation	100
6.2.2	Experimental design	100
6.2.3	Panel manufacture and tests.....	102

6.2.4	Determination of mechanical and physical properties.....	103
6.3	Results and discussion	104
6.3.1	Results of mechanical properties	104
6.3.2	Results of physical properties.....	109
6.3.3	Analysis of variance.....	113
6.3.4	Result of comparison test using LSD (least significant difference) test.....	117
6.4	Conclusion	118
CHAPITRE 7: EFFET DE LA SUBSTITUTION DES PARTICULES FINES DE BOIS DES COUCHES COUVRANTES DES PANNEAUX PAR LES PARTICULES D'ÉCORCE EXTERNE DE BOULEAU BLANC SUR SES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES		
		120
	Résumé.....	120
	Abstract.....	120
7.1	Introduction.....	121
7.2	Matériel et méthodes.....	123
7.2.1	Préparation des particules d'écorce externe de bouleau	123
7.2.2	Essais préliminaires	124
7.2.3	Dispositif expérimental.....	124
7.2.4	Fabrication de panneaux et tests effectués.....	126
7.2.5	Détermination des propriétés physiques et mécaniques	129
7.3	Résultats et discussion	130
7.3.1	Résultats des propriétés mécaniques.....	130
7.3.2	Résultats des propriétés physiques	136
7.3.3	Analyse de variance (ANOVA).....	140
7.3.4	Résultats des tests de comparaison par la méthode LSD (plus petite différence significative)	145
7.3.5	Régression.....	146
7.4	Conclusion	147
CHAPITRE 8: INVESTIGATION DES PROPRIÉTÉS DES PANNEAUX MIXTES AVEC LES LAMELLES DE BOIS DANS LES COUCHES COUVRANTES ET LES PARTICULES D'ÉCORCE EXTERNE DE BOULEAU BLANC (<i>Betula papyrifera</i>) AU CENTRE.....		
		149
	Résumé.....	149
	Abstract.....	150
8.1	Introduction.....	150
8.1.1	Description et capacité de production.....	150
8.1.2	Norme et classification des panneaux OSB.....	152
8.1.3	Fabrication de panneaux PLO en industrie.....	155
8.1.4	Avantages et désavantages de panneaux PLO	158
8.1.5	Espèces de bois utilisées dans la fabrication de panneaux PLO.....	159
8.1.6	Possibilités d'utilisation des panneaux PLO.....	161
8.1.7	Objectif	161
8.2	Matériel et méthodes.....	162
8.2.1	Particules d'écorce externe de bouleau blanc et lamelles de bois	162
8.2.2	Dispositif expérimental.....	162
8.2.3	Fabrication de panneaux et tests effectués.....	165
8.2.4	Détermination des propriétés physiques et mécaniques	167

8.3	Résultats et discussion	167
8.3.1	Résultats des propriétés mécaniques.....	167
8.3.2	Résultats des propriétés physiques	175
8.3.3	Analyse de variance (ANOVA).....	179
8.3.4	Résultats des tests de comparaison par la méthode LSD (plus petite différence significative)	183
8.3.5	Régression.....	184
8.4	Conclusion	186
	Conclusion générale.....	188
	Recommandations.....	194
	Bibliographie	196
	ANNEXE A: Données qui ont permis de faire l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, GE et DL) du chapitre 5	204
A.1	Description des six types de panneaux de base	204
A2	Coefficients des contrastes.....	208
	ANNEXE B: Données qui ont permis de faire l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, GE et DL) du chapitre 6	210
B1	Description des six types de panneaux de base	210
B2	Coefficients des contrastes.....	213
	ANNEXE C: Données qui ont permis de faire l'analyse statistiques des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, Dureté, GE et DL) du chapitre 7	215
C1	Description des six types de panneaux de base	215
C2	Coefficients des contrastes.....	219
	ANNEXE D: Données utilisées dans l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, Dureté, GE et DL) du chapitre 8	221
D1	Description des six types de panneaux de base	221
D2	Coefficients des contrastes.....	225
	ANNEXE E: Mesure d'angle de contact de l'écorce externe de bouleau blanc.....	228
E.1	Matériel d'essai et équipements.....	228
E.2	Manipulation.....	228
E.2.1	Résultats des mesures d'angle en degré (Tableau E1).....	228
E.3	Détermination de la tension de surface critique par la méthode de Zisman	230
E.3.1	Tension de surface de bouleau jaune	230
E.3.2	Tension de surface des écorces externes fraîches de bouleau blanc.....	231
E.3.3	Tension de surface des vieilles écorces externes de bouleau blanc.....	232
E.4	Discussion.....	233
E.5	Conclusion	233

Liste des tableaux

Tableau 0. 1 Bilan des écorces en tonne métrique anhydre (tma) Québec (<i>Anonyme, 2004c</i>)	2
Chapitre 1	
Tableau 1.1 Développement des composites inorganiques à base du bois (<i>Ernst et al., 1998; Roffael et Dix, 1992</i>).....	14
Tableau 1.2 Production mondiale des trois plus importants panneaux à base du bois en m ³	15
Chapitre 3	
Tableau 3. 1 Pourcentage approximatif de cendre dans le bois et l'écorce	39
Tableau 3. 2 Taux de cendre des particules d'écorces de bouleau blanc	40
Tableau 3. 3 Taux de cellulose, de pentosanes et de lignine dans les écorces de bouleau blanc.....	44
Tableau 3. 4 Code d'identification des traitements	49
Tableau 3. 5 Plan d'expérience utilisé.....	50
Tableau 3. 6 Décomposition de la source de variation.....	51
Tableau 3. 7 Tableau d'ANOVA.....	52
Tableau 3.8 Sommaire des contrastes.....	53
Tableau 3. 9 Code d'identification des traitements	56
Tableau 3. 10 Randomisation des unités expérimentales	56
Tableau 3. 11 Décomposition de la source de variation.....	57
Tableau 3. 12 Tableau d'ANOVA et contrastes.....	58
Chapitre 4	
Table 4.1 Type and code of raw material.....	65
Table 4.2 Decomposition of source of variation.....	65
Table 4.3 Results of the Plan procedure of SAS for the experimental design.....	65
Table 4.4 Results of ANOVA (F values) for pH, acid and alkaline buffering capacities....	68
Table 4.5 pH value, acid and alkaline buffering capacities, LSD results	69
Table 4. 6 Summary of statistical tests for relationship	71
Chapitre 5	
Table 5.1 Description of panel types.....	77
Table 5.2 Experiment design obtained from the randomization	78
Table 5.3 Manufacturing parameters	79
Table 5.4 Summary of variance analysis (ANOVA). MOR= modulus of rupture, MOE= modulus of elasticity, IB= internal bond, TS= thickness swell, LE= linear expansion	90
Table 5.5 Standard error (S.E) associated with significant interactions	91
Table 5.6 Comparison of mixed panels with the reference panel (100% wood particles) with the help of LSD (least significant difference) test.....	94
Table 5.7 Regression.....	95
Chapitre 6	
Table 6.1 Description of panels' types.....	101
Table 6.2 Experiment design obtained from the randomization	102
Table 6.3 Manufacturing parameters	103

Table 6.4 Summary of variance analysis (ANOVA). MOR= modulus of rupture, MOE= modulus of elasticity, IB= internal bond, TS= thickness swell, LE= linear expansion,	114
Table 6.5 Standard error (S.E) associated with significant interactions	115
Table 6.6 Comparison of mixed panels with the reference panel (100% wood particles) with the help of LSD (least significant difference) test	118
Chapitre 7	
Tableau 7.1 Exigence des panneaux sous-planchers (ANSI 208.1-1999).....	122
Tableau 7.2 Description des types de panneau	125
Tableau 7.3 Plan d'expérience obtenu de la randomisation	126
Tableau 7.4 Paramètres de fabrication.....	128
Tableau 7.5 Résumé de l'analyse de variance (ANOVA) (dl = degré de liberté, MOE = module d'élasticité, MOR = module de rupture, CI = cohésion interne, D = dureté, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire)	141
Tableau 7.6 Erreurs types (S.E) associées aux interactions significatives	143
Tableau 7.7 Comparaison des panneaux mixtes au panneau de référence (fait de 100% de particules de bois) à l'aide du test LSD (plus petite différence significative).....	146
Tableau 7.8 Régression.....	147
Chapitre 8	
Tableau 8.1 Données des usines de panneaux OSB de LP au Québec (<i>Anonyme, 2004b</i>)	152
Tableau 8.2 Propriétés de base des panneaux gaufrés et PLO (selon la norme CSA-O437)	154
Tableau 8.3 Importantes espèces de bois utilisées dans la fabrication de panneaux PLO de nos jours dans le monde (<i>Boehme, 1998 et 1999</i>)	160
Tableau 8.4 Description des types de panneau	164
Tableau 8.5 Plan d'expérience obtenu de la randomisation	164
Tableau 8.6 Résumé de l'analyse de variance (ANOVA) (dl = degré de liberté, MOE* module d'élasticité sens longueur du panneau MOE ^ζ = module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau, MOR* = module de rupture dans le sens de la longueur du panneau, MOR ^ζ = module de rupture dans le sens de la largeur du panneau, CI = cohésion interne, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire).....	181
Tableau 8.7 Comparaison des panneaux mixtes au panneau de référence (fait de 100% de lamelles de bois) à l'aide du test LSD (plus petite différence significative)	184
Tableau 8.8 Régression.....	185
Annexe A	
Tableau A1 Données du module d'élasticité (MOE)	205
Tableau A2 Données du module de rupture (MOR)	206
Tableau A3 Données de la cohésion interne.....	206
Tableau A4 Données du gonflement en épaisseur (GE).....	207
Tableau A5 Données de la dilatation linéaire (DL).....	207
Tableau A6 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS qui a permis de faire l'analyse des variances des différentes variables dépendantes mesurées	209
Annexe B	
Tableau B1 Valeurs du module d'élasticité (MOE)	211
Tableau B2 Valeurs du module de rupture (MOR)	211
Tableau B3 Valeurs de la cohésion interne (CI).....	212
Tableau B4 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)	212

Tableau B5 Valeurs de la dilatation linéaire (DL).....	213
Tableau B6 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS ayant permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées	214
Annexe C	
Tableau C1 Valeurs du module d'élasticité (MOE).....	216
Tableau C2 Valeurs du module de rupture (MOR).....	216
Tableau C3 Valeurs de la cohésion interne (CI)	217
Tableau C4 Valeurs de la dureté (D).....	217
Tableau C5 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)	218
Tableau C6 Valeurs de la dilatation linéaire (DL)	218
Tableau C7 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS qui a permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées	220
Annexe D	
Tableau D1 Valeurs du module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau (MOE*).....	222
Tableau D2 Valeurs du module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE ^ξ)	222
Tableau D3 Valeurs de module de rupture dans le sens de la longueur du panneau (MOR*)	223
Tableau D4 Valeurs de module de rupture dans le sens de la largeur du panneau (MOR ^ξ)	223
Tableau D5 Valeurs de la cohésion interne (CI)	224
Tableau D6 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)	224
Tableau D7 Valeurs de la dilatation linéaire (DL)	225
Tableau D8 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS ayant permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées	227
Annexe E	
Tableau E1 Résultats des mesures d'angle de contact	229
Tableau E2 Tension de surface des différents liquides utilisés	230

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 Photo de la partie externe d'un tronc présentant distinctement l'écorce interne et l'écorce externe de bouleau blanc (*Betula papyrifera*).....6

Figure 1. 2 Composition chimique générale du bois et de l'écorce externe de bouleau (*Betula verrucosa*) (Lundqvist et Back, 1976).....6

Chapitre 2

Figure 2.1 Classe de granulométrie des particules d'écorce externe et interne de bouleau blanc.....30

Chapitre 3

Figure 3.1 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et la méthode d'extraction pour la teneur en extractibles54

Figure 3.2 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pH59

Figure 3. 3 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pouvoir tampon acide60

Figure 3. 4 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pouvoir tampon basique.....61

Chapitre 4

Figure 4.1 Relationship between pH value and absolute acid buffering capacity71

Figure 4.2 Relationship between pH value and relative acid buffering capacity72

Chapitre 5

Figure 5.1 Samples of panels P₂₅₋₅, P₂₅₋₉ and P₂₅₋₁₃.....78

Figure 5.2 Typical density profiles of reference panel made from 100% wood particles and mixed panel with white birch inner bark particle in the core layer and wood fibres in the surface layer81

Figure 5.3 Average density of panels (mean values and standard deviations).....82

Figure 5.4 Modulus of elasticity (MOE) (mean values and standard deviations)83

Figure 5.5 Modulus of rupture (MOR) (mean values and standard deviations).....84

Figure 5.6 Internal bond (IB) (mean values and standard deviations).....85

Figure 5.7 Thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)86

Figure 5.8 Water absorption (WA) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)87

Figure 5.9 Linear expansion (LE) (mean values and standard deviations).....88

Figure 5.10 Thickness swelling (TSw) (mean values and standard deviations).....89

Figure 5.11 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for the modulus of rupture.....92

Figure 5.12 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for the modulus of elasticity92

Figure 5.13 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for internal bond93

Figure 5.14 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for linear expansion	93
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 6

Figure 6.1 Samples of manufactured panels	102
Figure 6.2 Typical density profiles of reference panel made from 100% wood particles and mixed panels with white birch outer bark particles in the surface layers, wood particles or wood fibres in the core layers.....	104
Figure 6.3 Average specific density of panels (mean values and standard deviations).....	106
Figure 6.4 Modulus of elasticity (MOE) (mean values and standard deviations)	107
Figure 6.5 Modulus of rupture (MOR) (mean values and standard deviations).....	108
Figure 6.6 Internal bond (IB) (mean values and standard deviations).....	109
Figure 6.7 Thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)	110
Figure 6.8 Water absorption (WA) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)	111
Figure 6.9 Linear expansion (LE) (mean values and standard deviations).....	112
Figure 6.10 Thickness swelling (TSw) (mean values and standard deviations).....	113
Figure 6.11 Interaction plots for modulus of rupture.....	115
Figure 6.12 Interaction plots for internal bond	116
Figure 6.13 Interaction plots for thickness swelling (TS) after 24 hours water soaking ...	116
Figure 6.14 Interaction plots for linear expansion	117

Chapitre 7

Figure 7.1 Spécimens des panneaux fabriqués, vues de surface et de côté	127
Figure 7.2 Profils de masse volumique typique du panneau de référence en bois et des panneaux mixtes avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans les couches couvrantes ou les particules des mêmes écorces traitées à la soude dans les couches couvrantes	131
Figure 7.3 Masse volumique moyenne des panneaux (kg/m^3) (valeur moyenne et écart-type)	132
Figure 7.4 Module d'élasticité (MOE) (valeurs moyennes et écart-types).....	133
Figure 7.5 Module de rupture (MOR) (valeurs moyennes et écart-types).....	134
Figure 7.6 Cohésion interne (CI) (valeurs moyennes et écart-types)	135
Figure 7.7 Dureté (valeurs moyennes et écart-types)	136
Figure 7.8 Gonflement en épaisseur (GE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types).....	137
Figure 7.9 Absorption d'eau (AE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types).....	138
Figure 7.10 Dilatation linéaire (DL) (valeurs moyennes et écart-types)	139
Figure 7.11 Dilatation en épaisseur (DE) (valeurs moyennes et écart-types).....	140
Figure 7.12 Diagramme d'interaction pour le module d'élasticité	143
Figure 7.13 Diagramme d'interaction pour le module de rupture	144
Figure 7.14 Diagramme d'interaction pour la dureté.....	144
Figure 7.15 Diagramme d'interaction pour le gonflement en épaisseur.....	145

Chapitre 8

Figure 8.1 Schéma du dispositif d'orientation des lamelles lors de la fabrication de panneaux à lamelles orientées à l'échelle industrielle (<i>Deppe et Ernst, 2000</i>)	156
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Figure 8.2 Schématisation des principales étapes de fabrication de panneaux OSB en industrie (<i>adopté de SBA, 1995</i>)	157
Figure 8.3 Spécimens des panneaux fabriqués	165
Figure 8.4 Profils de masse volumique typique du panneau de référence en lamelle de bois et du panneau mixte avec les lamelles de bois orientées en surface et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude au centre.....	168
Figure 8.5 Masse volumique des panneaux (kg/m^3) (valeur moyennes et écart-types).....	169
Figure 8.6 Module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau (MOE^*) (valeurs moyennes et écart-types)	170
Figure 8.7 Module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE^{ζ}) (valeurs moyennes et écart-types)	171
Figure 8.8 Module de rupture dans le sens de la longueur du panneau (MOR^*) (valeurs moyennes et écart-types)	172
Figure 8.9 Module de rupture dans le sens de la largeur du panneau (MOR^{ζ}) (valeurs moyennes et écart-types)	173
Figure 8.10 Cohésion interne (CI) (valeurs moyennes et écart-types)	174
Figure 8.11 Gonflement en épaisseur (GE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types).....	176
Figure 8.12 Absorption d'eau (AE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types).....	177
Figure 8.13 Dilatation linéaire (DL) (valeurs moyennes et écart-types)	178
Figure 8.14 Dilatation en épaisseur (DE) (valeurs moyennes et écart-types).....	179
Figure 8.15 Histogrammes d'interaction de l'effet de l'orientation des lamelles et du type de particule au centre du panneau sur le MOE mesuré dans le sens de la largeur du panneau	183
Annexe E	
Figure E1 Droite de Zisman pour le bouleau jaune	230
Figure E2 Droite de Zisman pour les écorces externes fraîches de bouleau blanc.....	231
Figure E3 Droite de Zisman pour les vieilles écorces externes de bouleau blanc.....	232

Introduction

La quantité d'écorce produite annuellement à l'échelle mondiale hormis celle se trouvant sur le bois destiné au chauffage est d'environ 140 à 170 millions de m³. Au niveau du Canada tout entier la production de l'écorce est au dessus de sept millions de tonnes anhydre. Le Québec, à lui tout seul, a produit 2,5 millions de tonnes anhydres d'écorce en 1996 et cette valeur s'est accrue à 3 483 000 tonnes en 2001 soit une augmentation de 39% en l'espace de cinq ans (*Anonyme, 2004c*). Pour ce qui est du cas spécifique de bouleau blanc, sa consommation au niveau provincial est chiffrée à 1 009 674 m³ et le rendement en écorce est de 0,095 tonne métrique anhydre par m³. Il en résulte une production provinciale annuelle des écorces de bouleau blanc estimée à 95919 tonnes métriques anhydres (*Anonyme, 2004c*). Ces chiffres montrent que l'industrie forestière surtout très présente dans la région du Saguenay Lac St Jean représente un secteur très important de l'activité économique du Québec. Les statistiques du *MRNQ (1993)* révèlent que des 2,5 millions de tonnes anhydres d'écorces annuellement produites au Québec, environ la moitié était brûlée pour la production d'énergie et un large surplus non valorisé était enfoui ou incinéré, sans qu'une récupération d'énergie, de matériau ou de produits chimiques ne soit effectuée, ce qui entraînait souvent des problèmes environnementaux. En effet, les divers produits chimiques présents dans les écorces enfouies peuvent contaminer les eaux souterraines, contamination qui est évidemment préjudiciable à la santé de l'homme (*Charbonneau, 1990*). C'est ainsi que la nécessité de valoriser cette biomasse non utilisée est en train de prendre son essor. Au niveau de l'Université Laval des travaux de recherche portant sur la fabrication de panneaux d'écorce à partir des écorces de l'épinette noire et des écorces du peuplier faux tremble ont été faits dans un passé récent et les résultats obtenus n'ont pas laissé entrevoir une éventuelle concurrence de ces panneaux face aux panneaux conventionnels.

Les informations du Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNQ) révélaient que la situation des écorces était déjà en équilibre au Québec et qu'il y avait même un léger déficit (*Anonyme, 2004c*). Il y a très peu d'enfouissement et le déficit résineux versus le surplus feuillus comme le montre les chiffres du Tableau 1 vient probablement de l'incapacité de séparer les essences.

Tableau 0. 1 Bilan des écorces en tonne métrique anhydre (tma) Québec (*Anonyme, 2004c*)

	Résineux	Feuillus	Total
Production des usines du Québec	2 647 428	983 639	3 631 067
Importations des usines du Québec	18 117	23 031	41 148
Exportations des usines du Québec	393 497	65 859	459 356
Consommation des usines du Québec (Cogénération)	1 114 081	214 437	1 328 518
Utilisation énergétique (chaudière et séchoirs)	1 237 724	609 284	1 847 008
Utilisation agricole (paillis)	42 939	11 861	54 800
Surplus ou déficit au Québec	-122 696	105 229	-17 467

Quoique les écorces ne soient presque plus enfouies, les chiffres du Tableau 0.1 montrent que la grande partie est toujours brûlée pour la production d'énergie. L'idée de faire plus de gain avec cette abondante matière première incite à développer d'autres possibilités d'utilisation. C'est dans ce contexte qu'au Centre de Recherche sur le Bois de l'Université Laval, l'objet de notre projet de recherche est focalisé sur la valorisation des résidus d'écorce de bouleau blanc (*Bétula papyrifera*) sous forme de fabrication de panneaux de particules. Les travaux antérieurs ont montrés que les propriétés des écorces étant différentes de celles du bois, il est difficile de fabriquer des panneaux constitués uniquement des particules d'écorces ayant les mêmes propriétés que les panneaux de particules de bois. Une des causes connues est que les extractibles solubles dans l'eau sont plus abondants dans les écorces que dans le bois et constituent un obstacle à la polymérisation de l'adhésif (*Maloney, 1977; Foster, 1967*). Une autre difficulté est la très grande variabilité qui existe entre les écorces des différentes espèces et dans le cas spécifique des bouleaux la différence en termes de structure, de propriétés physiques et

mécaniques qui existent entre la partie interne et la partie externe de leur écorce n'ont pas permis dans le passé de les utiliser pour la fabrication de panneaux à l'échelle du laboratoire (*Lundqvist et Back, 1976*). Ces différences ont permis de mettre en évidence les problèmes auxquels nous serons confrontés en utilisant les particules d'écorce de bouleau blanc. Le premier problème concerne la forte masse volumique de l'écorce interne qui rabaisse le taux de compression de l'ébauche (rapport de l'épaisseur de l'ébauche sur l'épaisseur du panneau pressé), ce qui affecte négativement la cohésion interne et la stabilité dimensionnelle (gonflement en épaisseur après immersion dans l'eau et dilatation linéaire) des panneaux fabriqués. Le second problème majeur est la forme presque sphérique des particules d'écorce interne obtenues avec un broyeur à marteaux. Cette forme défavorise l'effet d'enchevêtrement des particules qui fait qu'il y a une plus grande surface de contact entre les particules et par incidence une bonne adhésion. Les conséquences qui en découlent sont des valeurs de cohésion interne et surtout de module de rupture des panneaux fabriqués plutôt basses. Dans le même cadre, le faible contenu en composantes structurales (cellulose, hémicellulose et lignine) de l'écorce externe occasionne un manque de rigidité des panneaux fabriqués (*Lundqvist et Back, 1976*). La forte concentration des subérines qu'ont ces particules d'écorce externe rendent leur surface très difficile à mouiller, ce qui est un obstacle majeur à la pénétration de la colle par les pores lors de l'encollage. Le faible taux de composantes structurales affecte négativement les propriétés de flexion (MOE et MOR) et la forte concentration des subérines rabaisse largement la cohésion interne. Les études antérieures ont montré à l'unanimité qu'il est très difficile de fabriquer les panneaux uniquement constitués de particules d'écorce qui rencontrent les normes. C'est pour cette raison que l'hypothèse générale émise dans le cas spécifique de ce travail est qu'il est possible de fabriquer des panneaux à base d'écorce de bouleau en utilisant un renfort des fibres, des particules et des lamelles de bois à défaut de faire des traitements onéreux de ces écorces ou d'utiliser un adhésif très coûteux comme l'isocyanate pour leur encollage.

Le but de ce travail de recherche consiste d'une part à faire une série d'essais de fabrication de panneaux à base d'écorce de bouleau qui permettra de mettre sur pied des stratégies de fabrication de plusieurs types de panneaux mixtes où les particules et les fibres de bois sont

utilisées comme renfort afin que les propriétés de ces panneaux rencontrent les valeurs normalisées.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Bref rappel sur l'anatomie de l'écorce en général

Le nom d'écorce sert à désigner chez les arbres, l'ensemble des tissus extérieurs au bois. On y trouve de l'intérieur vers l'extérieur : **le liber** ou phloème secondaire, couche interne de l'écorce formée par le cambium de l'arbre. Il s'agit d'un tissu vivant servant au transport des matières nutritives et constitué essentiellement de tubes criblés, de cellules de parenchyme, de fibre et de sclérites. **Le périderme** comprenant le phelloderme, tissu vivant ayant l'aspect d'un parenchyme cortical, né de l'activité vers l'intérieur du phellogène. **Le phellogène** ou assise subéro-phellodermique qui est une couche de méristème engendrant le périderme. **Le suber** ou liège, né de l'activité extérieure du phellogène. Ce tissu inerte peut être recouvert de tissus exfoliés. Sur les tiges déjà âgées il suffit de faire une distinction entre : l'écorce interne, qui est la partie vivante ; il s'agit avant tout du liber. L'écorce externe, qui est la partie inerte ou morte ; elle comprend essentiellement le suber et les tissus exfoliés avec parfois des îlots de tissus libériens ou corticaux. L'écorce interne est parfois appelée « liber », l'écorce externe « rhytidome ». La distinction entre l'écorce interne et externe est généralement suffisante pour l'étude des diverses propriétés de ce matériau. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'il est apparu opportun de faire la différence entre un liber jeune et un liber plus âgé. La quantité d'écorce sur l'arbre est relativement importante puisqu'on considère que chaque bille de bois est constituée de 10 à 15% d'écorce (*Risi, 1945 ; LPFE, 1976*). La Figure 1.1 présente clairement les grandes parties de l'écorce de l'intérieur vers l'extérieur d'un tronc

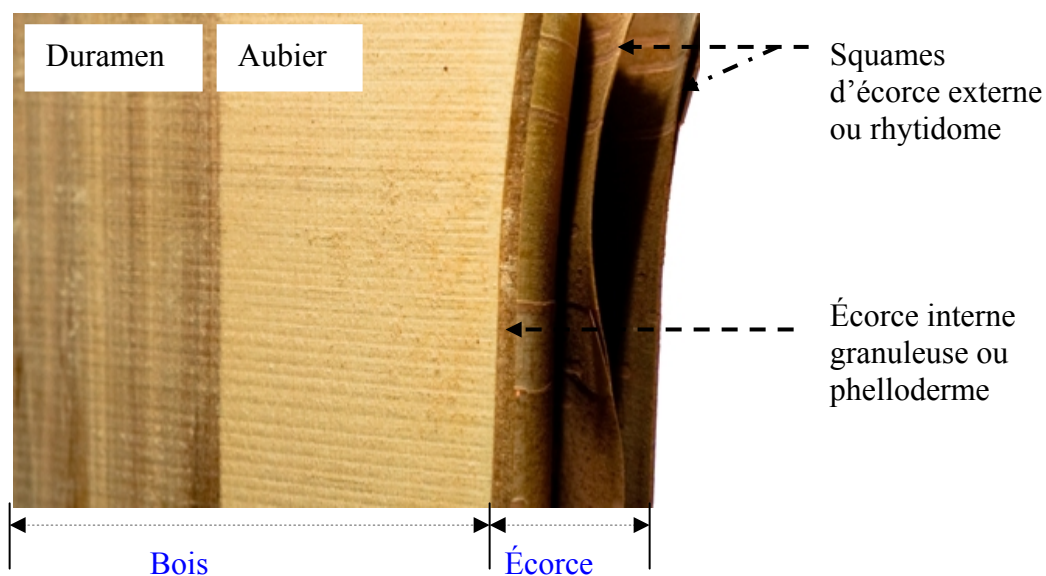


Figure 1.1 Photo de la partie externe d'un tronc présentant distinctement l'écorce interne et l'écorce externe de bouleau blanc (*Betula papyrifera*)

1.2 Composition chimique générale du bois et de l'écorce externe de bouleau (*Betula verrucosa*)

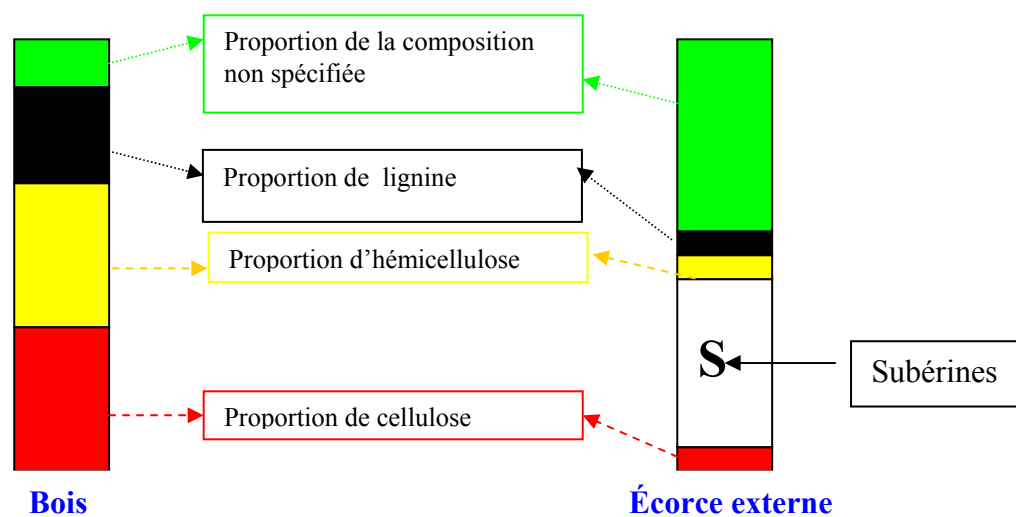


Figure 1.2 Composition chimique générale du bois et de l'écorce externe de bouleau (*Betula verrucosa*) (Lundqvist et Back, 1976)

La Figure 1.2 montre que contrairement au bois, les proportions de cellulose, d'hémicellulose de lignine sont très faibles dans les écorces externes de bouleau. Cette faible teneur limite grandement l'effet structural de ce matériel. L'autre particularité de l'écorce externe de bouleau est qu'elle contient près de 40% de subérine, substance qu'on ne trouve pas du tout dans son bois. La subérine ne peut pas être isolée en totalité des tissus d'écorce externe, on peut la saponifier par un traitement alcalin. Les constituants sont extraits et séparés par des méthodes chromatographiques. Dans la saponification du mélange de subérine, il y a un nombre considérable (25-30%) de composés phénoliques. Ces informations suggèrent que la subérine n'est pas une espèce chimique précise mais plutôt un mélange de diacides avec des chaînes aliphatiques de longueurs variables et avec des fonctionnalités chimiques spécifiques. De part la nature non polaire de ses chaînes aliphatiques, la subérine est hydrophobe (*Fengel et Wegener, 1989*).

Tamminen (1962, 1970) a montré dans ses études que le retrait en volume de l'état humide à l'état anhydre de l'écorce est d'environ deux à quatre fois celui du bois. La structure non directionnelle de la plupart des cellules de l'écorce et la faible teneur en fibres directionnelles des écorces explique la faible stabilité dimensionnelle des écorces et des panneaux d'écorces.

1.3 Utilisation de l'écorce en général

Jusqu'à l'heure actuelle les écorces n'ont pas encore été utilisées pour la fabrication de panneaux de manière industrielle. C'est la raison pour laquelle la littérature portant sur ces types de panneaux reste restreinte par rapport aux panneaux de particules de bois. Fort de ce constat, dans la description des principales utilisations de l'écorce, et les travaux antérieurs effectués sur les écorces, la partie concernant les panneaux d'écorce n'occupe pas une portion prépondérante de cette revue bien qu'elle constitue le thème principal sur lequel se focalise ce travail de recherche.

1.3.1 Utilisation de l'écorce comme combustible

Les écorces humides ont en général une capacité calorifique plus faible (environ 10500 kJ/kg) que celle du bois humide (environ 15800 kJ/kg) (*Welfring et Weidenhaupt, 1998*). Cette faible capacité calorifique des écorces est surtout due à son taux d'humidité élevé, et son contenu en impuretés comme le sable, les cailloux et la terre. Ces impuretés conduisent à un encombrement des lieux (chaudières par exemple) où se fait leur combustion générant ainsi un excès de cendre, et par conséquent des frais supplémentaires élevés d'entretien.

1.3.2 Utilisation de l'écorce pour la production de l'énergie

La grande quantité des écorces produites (près de la moitié au Québec) est de nos jours utilisée par les usines de sciage et de fabrication de panneaux pour l'alimentation de leurs chaudières, pour la production d'une partie de l'énergie nécessaire au séchage et aussi pour dégeler le bois dans des piscines d'eau chaude l'hiver, parce que le bois arrive à -35°C .

La capacité calorifique de l'écorce anhydre est entre 17 000 et 23 000 kJ/kg comparativement à celle du bois anhydre qui est entre 17 500 et 19 200 kJ/kg. Cette différence s'explique par la diversité observée entre les fibres du bois et celles de l'écorce. La capacité calorifique effective de l'écorce est fortement dépendante de son taux d'humidité, parce que pour s'évaporer l'eau a besoin d'énergie.

1.3.3 Utilisation de l'écorce de certaines essences pour la production du liège et du liber

Le liège né de l'activité extérieure du phellogène se trouve dans l'écorce externe des arbres, il est très léger et sa masse volumique est d'environ 240 kg/m^3 . Il est doux, durable, facile à travailler, imperméable aux liquides et aux gaz et agit comme isolant parce que sa capacité à conduire la chaleur et le courant est quasi nulle. Les principaux constituants du liège des différentes écorces sont : la subérine 58%, la cellulose 22%, la lignine 12% et l'eau 5%. L'utilisation du liège s'est faite depuis des temps immémoriaux. En effet, les premières utilisations du liège ont eu lieu il y a environ 5000 ans. Les Égyptiens utilisaient le liège pour fermer les récipients faits en argile. Il y a 2500 ans dans la Grèce antique le liège fut

utilisé pour faire flotter les filets de pêche au dessus de l'eau et pour la fabrication des semelles des sandales (*Anonyme, 1999; Klaubner, 1920*). Avec l'essor de l'industrie de fabrication du verre au dix-septième siècle commença l'épanouissement de l'industrie des bouchons à partir du liège (*Klaubner, 1920*). On estime à 500 000 tonnes la production annuelle mondiale du liège. La moitié de cette production revient au Portugal. Les principaux produits fabriqués avec le liège sont les bouchons pour la fermeture des bouteilles, les semelles de certaines chaussures, les ceintures de sauvetage et les amortisseurs. Des panneaux à base de liège sont aussi pressés et utilisés surtout pour le recouvrement des planchers. Près de dix milliards de bouchon à base de liège sont produits par an (*De Oliveira et De Oliveira, 2000*). Le chêne (*Quercus suber*) est l'essence la plus importante puisque c'est de son écorce que la plus grande production mondiale du liège est obtenue. En ce qui concerne le liber ou le phloème secondaire, qui se trouve dans la couche interne des écorces, ses fibres sont utilisées pour la fabrication de panneaux à masse volumique moyenne (MDF). Mais ces types de panneaux sont utilisés principalement pour des isolations thermiques et sonores. Leur module de rupture est inférieur à celui des panneaux MDF faits de fibres de bois. Les essences tropicales sont les plus indiquées pour la production en masse du liber. En raison de sa bonne qualité de résistance à la flexion, le liber est aussi utilisé pour la fabrication des paniers, des corbeilles, des matelas et des nattes.

1.3.4 Utilisation de l'écorce en horticulture et en biotechnique

L'écorce étant une matière végétale, donc pouvant se régénérer, elle est produite en grande quantité et peut se substituer aux tourbes dans le domaine de l'horticulture. Une étude montre que les extractibles des écorces pourraient nuire à l'horticulture surtout à la germination des graines. En plus d'être utilisées comme fumier pour amender le sol, les écorces sont aussi utilisées comme substance pour l'amélioration des propriétés physiques du sol comme par exemple sa structure.

König et Roffael (2003) ont consacré une partie de leurs travaux à l'extraction des tannins des écorces de sapin. Lors de l'extraction, de l'urée ou des morceaux de panneaux de particules usagés encollés avec la résine urée-formaldéhyde ont été ajoutés au milieu. Cet

ajout soit de l'urée ou des panneaux usagés a eu pour effet d'augmenter le rendement d'extraction des tannins ainsi que la quantité d'azote fixée par les écorces. Le ratio C/N des écorces extraites est devenu plus faible, ce qui est un grand avantage pour leur utilisation comme compost dans la culture des plantes.

De nos jours certains produits de l'écorce sont utilisés comme matériel de remplissage et de filtrage dans les domaines suivants : nettoyage et assainissement biologiques des sols contaminés; épuration biologique des gaz nocifs : à titre d'exemple on peut filtrer les odeurs dans les toilettes biologiques et développer des biofiltres pour certains composés volatils provenant de la décomposition de certaines matières.

Les recherches se poursuivent activement pour voir dans quelle mesure les écorces peuvent être utilisées comme matière biologique pour neutraliser les nitrates contenus dans de l'eau potable.

Les écorces de bouleau blanc ont récemment attiré l'attention de la communauté scientifique. En effet l'acide bétulinique, un composé triterpénique au squelette du lupane présent en petite quantité dans l'écorce externe de bouleau blanc, a démontré une activité antitumorale contre les mélanomes. Cette étude effectuée sur des cultures de cellules (tests *in vitro*) et sur un modèle animal (test *in vivo*) a permis de constater que l'acide bétulinique agissait efficacement contre les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines (*Pisha et al., 1995*). Il a également été démontré que ces triterpènes au squelette du lupane possédaient une activité intéressante contre le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) (*Labrosse et al, 1997; Kashiwada et al., 2001*).

1.3.5 Utilisation de l'écorce pour la fabrication de panneaux

Les recherches axées principalement sur deux voies montrent qu'il est possible de fabriquer les panneaux d'écorce d'une part avec les résines synthétiques et d'autre part en exploitant la propriété d'auto agglomération de l'écorce. C'est dans ce contexte que *Dost (1971)* a fabriqué des panneaux de particules trois couches à base d'écorce en faisant varier les pourcentages des particules d'écorces de séquoia (*Sequoiadendron sempervirens*) ainsi que le pourcentage de la colle urée-formaldéhyde (UF). Il a constaté que les propriétés physico-

mécaniques diminuaient avec une augmentation du pourcentage de l'écorce et augmentaient avec une augmentation de la quantité du liant. *Maloney (1973)* a fabriqué des panneaux d'écorces à trois couches en utilisant l'urée-formaldéhyde et a remarqué qu'en faisant varier la teneur en résine de 7,5 à 10%, la cohésion interne et le module de rupture augmentent. *Blanchet et al. (2000)* ont fabriqué des panneaux écorces-bois dont le centre est constitué des écorces de l'épinette noire (*Picea mariana*) en faisant varier à la fois la quantité des particules de bois et la teneur en liant dans les couches couvrantes. Ils obtiennent les meilleures propriétés mécaniques avec les panneaux ayant 50% de particules de bois et 14% de teneur en liant dans les couches couvrantes. *Villeneuve et al. (2004)* utilisent les particules d'écorce du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) pour fabriquer les panneaux d'écorce à l'Université Laval. Pour le faire, ils font varier trois facteurs qui sont la masse volumique, la teneur en liant dans les couches couvrantes ainsi que le type de liant (urée-formaldéhyde et phénol-formaldéhyde) et arrivent à la conclusion que les panneaux encollés avec la phénol-formaldéhyde présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles des variantes encollées avec de l'urée formaldéhyde. Une des grandes différences entre les panneaux de particules à base de bois et les panneaux d'écorce est que le module de rupture des panneaux d'écorce représente 25 à 30% celui des panneaux de particules à base de bois. Quoique l'écorce et le bois soient tous deux des produits régénératifs, c'est-à-dire, pouvant être renouvelés par la culture des arbres, ils diffèrent par leur constitution morphologique et leurs propriétés physiques comme la masse volumique, la capacité d'absorption et la capacité de conduction thermique. Il a été démontré que la conductivité thermique de l'écorce en direction radiale et tangentielle est inférieure à celle du bois. Dans ces conditions, l'écorce est un meilleur isolant thermique. Ils sont aussi différents de par leur composition chimique comme par exemple la teneur en cellulose, en lignine et en produits extractibles. Les propriétés physiques et chimiques pertinentes à l'encollage des particules telles que le mouillage des particules par la colle, le pH, le pouvoir tampon et la proportion des acides volatiles sont aussi partiellement différentes pour les deux types de particules. Un avantage important qui pourrait s'offrir aux industries de fabrication de panneaux d'écorce si jamais les recherches s'avéraient concluantes, est que le coût de transport de l'écorce est déjà inclus dans le coût de transport de la bille de bois entière de la forêt à l'usine. Comme déjà sus mentionné, les impuretés

(sable, cailloux et terre) présentes dans les écorces pourraient être préjudiciables à l'usage des panneaux.

1.4 Bref aperçu sur la fiche de bouleau blanc

1.4.1 Origine et habitat

Le bouleau (*Betula spp.*) est originaire des régions boréales, notamment de la Russie dont il est l'arbre emblème, s'étendant des bords de l'Europe centrale jusqu'aux confins de la Sibérie, au Nord de l'Asie. Du Nord au Sud, dans ses limites extrêmes, on le trouve encore de l'Islande à la Sicile. Tandis qu'il est considéré comme un arbre élégant en Europe, en raison de la blancheur habituelle de son tronc et de ses lignes allongées, il est plutôt considéré comme un arbre commun au Canada, où l'on aurait tendance à le voir comme une espèce moins digne d'intérêt tant il est répandu. Une exception cependant au Québec, où il figure comme le symbole discret d'une province aux origines différentes, et au Chili, où le bouleau est l'arbre sacré de la nation autochtone Mapuche. Habituellement mélangé parmi les peupliers, l'érable et les conifères, le bouleau, arbre vénéré des Premières Nations et pilier de la civilisation autochtone, offre une richesse d'utilisation étonnante pour divers métiers. Son nom remonte à l'antiquité, sans doute du mot Sanscrit "**Bhurga**" qui signifie "l'arbre qui sert à écrire" (*Anonyme, 2000-2008*).

1.4.2 Description

C'est un des arbres les plus faciles à identifier, en raison de son écorce fine qui se déroule ou plutôt se défait en lambeaux horizontaux hors du tronc, comme du papier-bible. Il peut dépasser les trente mètres de hauteur. Il pousse en effet rapidement, et a l'avantage de parvenir assez vite aux dimensions requises pour son exploitation. Son bois est dur et pesant, mais peu résistant à l'humidité. (*CREAF, 2000-2008*).

1.4.3 Utilisation de son écorce

Sans doute son utilisation la plus connue, est-elle celle qu'on en fait pour la fabrication des **canots**. C'est grâce à l'écorce de bouleau que la colonisation française a pu se faire et

pénétrer dans des terres jamais explorées. Très populaire chez les chasseurs canadiens, celle-ci permet de réaliser des appeaux (sifflet) pour attirer les originaux, ainsi que toutes sortes de boîtes, de caisses et de paniers; pour recueillir fruits et baies sauvages ; pour préserver le poisson, les viandes, les farines, les graines et les semences. On l'utilise aussi en joaillerie, avec incrustations d'aiguilles de porc-épic ou par gravure au poinçon. Utilisée comme papier pour écrire, à l'instar du papyrus, on s'en sert aussi comme support pour peindre, dessiner et même faire de la gravure. On peut aussi en faire du carton et des bardeaux. Elle peut aussi servir comme matériau pour faire des torches, l'écorce servant tout à la fois de contenant et de bois d'allumage pour faire partir un feu. Là ne s'arrêtent pas ses usages, puisqu'une fois le feu allumé, l'écorce sert encore de récipient pour faire bouillir de l'eau, cuire des viandes qu'elle parfume d'une saveur douce-amère, et pour conserver sèves et résines, ainsi que le miel. On s'en sert enfin comme emballage pour emballer des objets ou des aliments, sans oublier l'écorce intérieure qui elle, peut servir d'aliment : la farine de bouleau est excellente quoique méconnue. Dans certains pays, comme en Russie, l'écorce a permis de développer une industrie de la reliure de livres extrêmement populaire, car, semblable à une sorte de cuir, enduite de sa propre huile, l'écorce de bouleau s'est révélée très résistante à l'usure. Dans l'industrie encore, ainsi que dans certains pays d'Europe du Nord, l'huile extraite de bouleau a servi d'insecticide et comme onguent pour les mains (CREAF, 2000-2008).

1.5 Les espèces de bouleau dans l'est du Canada

Les espèces de bouleau les plus communes dans l'est du Canada sont : le bouleau jaune ou, à tort merisier (*Betula alleghaniensis* Britt), c'est l'arbre emblématique du Québec; le bouleau à papier ou bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh) et le bouleau gris ou bouleau à feuille de peuplier (*Betula populifolia* Marsh). L'écorce de bouleau blanc est de couleur blanche crème, s'exfoliant facilement en longues et larges bandes horizontales. L'écorce de bouleau jaune a une couleur cuivrée, s'exfoliant plus difficilement en minces feuilletés. L'écorce est aromatique, rappelant l'odeur du thé des bois (petites mentes roses). L'écorce de bouleau gris est quant à elle d'une couleur blanc terne (crayeux), s'exfoliant très difficilement en minces plaques rectangulaires.

1.6 Évolution des composites à base de bois depuis 1905 et production mondiale des trois plus importants panneaux à base de bois

Tableau 1.1 Développement des composites inorganiques à base de bois (*Ernst et al., 1998; Roffael et Dix, 1992*)

Dates	Type de composite à base de bois
Environ 1905	Contreplaqués
Environ 1914	Panneaux de fibres (panneaux de fibres isolants)
Environ 1924	Panneaux de fibres (panneaux de fibres hautement densifiés)
Environ 1930	Le bois d'ingénierie (matériau de construction)
Environ 1940	Panneaux de particules
Environ 1960	Medium Density Fiberboard (MDF)
Environ 1970	Laminated Veneer Lumbers (LVL)
Environ 1980	Oriented Strands Boards (OSB)
Environ 1990	Parallel Strands lumbers (PSL)
Environ 1995	Laminated Strands lumbers (LSL)

Tableau 1.2 Production mondiale des trois plus importants panneaux à base du bois en m³*(Anonyme 2003a)*

Régions	Panneaux de particules	Panneaux de fibres de masse volumique moyenne (MDF)	Panneaux à lamelles orientées (PLO)	Total
Amérique du Nord	14 551 000	5 063 000	21 973 000	41 567 000
Union européenne	32 573 000	9 631 000	2 630 000	44 834 000
Autres pays de l'Europe	10 905 000	2 291 000	470 000	13 666 000
Chine	5 790 000	7 320 000	10 000	13 120 000
Asie du Nord-Est	2 642 000	1 724 000	0	4 366 000
Asie du Sud-Est	5 635 000	2 761 000	0	8 396 000
Autres pays d'Asie	2 127 000	255 000	0	2 382 000
Amérique Centrale et du Sud	5 157 000	2 967 000	480 000	8 604 000
Australasie	1 129 000	1 730 000	0	2 859 000
Afrique	1 227 000	251 000	0	1 478 000
Total	81 737 000	34 093 000	25 563 000	141 393 000

Les résultats du Tableau 1.2 nous montrent que l'union européenne détient le plus fort pourcentage (31,6%) des trois grandes catégories de panneaux citées suivie par l'Amérique du Nord avec 29,4%. D'une part, l'union européenne est en ce qui concerne la production des panneaux de particules et des MDF largement en tête et d'autre part l'Amérique du Nord a à son actif 86% de la production mondiale des OSB.

L'Europe toute entière a eu une récente expansion de la production des OSB qui a atteint un total de 3,1 millions m³. L'Afrique du Sud possède aussi une capacité de 480 000 m³

En Amérique du Sud il y a aussi eu une expansion significative sur le plan mondial dans le domaine de la production des panneaux de particules.

En considérant la capacité par pays pris seul et non par grande région, la chine est le pays ayant la plus grande capacité de production des panneaux MDF.

1.7 Bref aperçu sur les principaux adhésifs à être utilisés dans le cadre de notre travail

1.7.1 La colle urée-formaldéhyde

Cette résine est typiquement utilisée dans la fabrication des produits qui exigent une uniformité dimensionnelle et une égalité de la surface comme par exemple le MDF et les panneaux de particules, mais elle n'est pas résistante à l'eau et n'a pas des applications structurelles. L'urée est synthétisée à partir de l'ammoniaque NH₃ et du dioxyde de carbone CO₂ sous l'effet de la température et de la pression en CO (NH₂)₂ et de l'eau H₂O. L'ammoniaque et le gaz carbonique sont obtenus des gaz naturels. La formaldéhyde est synthétisée à partir du méthane CH₄ et de l'oxygène O en méthanol CH₃OH. Le méthane est obtenu du pétrole brut et de l'oxygène de l'air. Avec l'aide d'un catalyseur, le méthanol est converti en formaldéhyde HCHO et en hydrogène H₂. Le formaldéhyde est un gaz incolore ayant pour point d'ébullition -21° C. Il est très soluble dans l'eau. L'urée et le formaldéhyde sont combinés dans un réacteur pour donner la résine UF. Cette résine est expédiée pour la fabrication des produits à base de bois sous forme de solution aqueuse colloïdale avec à peu près 65% de solide. Ce liquide est inodore, légèrement opaque et naturellement non inflammable. Avant d'être expédiée, cette résine est déjà polymérisée et relativement réticulée. Elle a donc une durée limitée mesurée en jours. Sous sa forme semi-condensée, la résine UF est constituée de molécules dans les étapes intermédiaires telles le mono-, di-, tri- et tétraméthylol urées. En solution, l'urée et le formaldéhyde sont présents avec un ratio molaire d'environ 1 :1,1. L'excès de 10% du formaldéhyde est nécessaire pour les réactions aboutissant au solide où les molécules sont entre reliées. Il y a quelques

décennies que le ratio UF était de 1 :2 mais pour réduire l'émission du formaldéhyde dans les panneaux les fabricants de cette résine ont réduit ce ratio à 1 :1,1 de nos jours. Pendant le pressage à chaud, la polymérisation et la condensation de l'UF sont complétées. Peu avant la pulvérisation de la résine UF dans les particules à encoller, on y ajoute un catalyseur qui est de l'acide. La plupart des résines UF se condensent le plus vite quand leur pH est entre 3 et 4. À ce stade la durée de la solution UF est drastiquement réduite et mesurée en heures. Sous l'effet de la chaleur dégagée pendant le pressage, l'UF pré condensé se polymérise pour former une résine solide. Pendant le pressage à chaud, une portion du formaldéhyde en excès est émise. Un excès de chaleur (température supérieure à 200°C) hydrolyse la résine UF en urée et en formaldéhyde, dégradant ainsi les liens de colle entre les particules de bois et laissant se dégager la formaldéhyde. C'est la raison pour laquelle le temps de pressage doit être bien contrôlé et les panneaux refroidis dès leur sortie de la presse. Cette résine est utilisée pour l'encollage des panneaux destinés à la production des meubles et des panneaux à usage intérieur. Son avantage est qu'elle ne coûte pas cher et a une couleur claire. Le désavantage des panneaux encollés avec du UF est qu'ils ne peuvent pas être destinés à un usage externe à cause de leur faible résistance à l'humidité. L'UF est le liant le plus utilisé pour la production des panneaux MDF. Beaucoup de fabricants au Québec ajoutent une très faible quantité de mélamine dans leur colle UF.

1.7.1.1 Précautions à prendre lors de l'utilisation de la colle UF

Une fois la colle mélangée aux particules, l'idéal serait de presser l'ébauche tout de suite pour éviter d'une part que la colle ne rentre en grande partie dans les particules au point qu'en surface il n'en reste qu'une infime partie et d'autre part pour éviter le phénomène de la pré-condensation de la colle. Les travaux de *Xing et al. (2004)* montrent que la cohésion interne diminue de 10% et de façon drastique quand le panneau est pressé 24 heures après l'encollage. Cette diminution de la CI est due au fait que la colle sèche ou réagit pendant que l'ébauche n'est pas encore pressée.

1.7.2 La colle phénol formaldéhyde (PF)

Elle est formée du phénol et du formaldéhyde par condensation avec le détachement de l'eau. L'adaptation entre le formaldéhyde et le phénol se fait à différents niveaux ; elle

aboutit d'abord à la formation du méthylol phénol. Les liaisons qui en résultent rendent possible une suite de réactions de condensation. Suite à cette réaction en chaîne aboutissant à la formation du méthylol il y a en premier lieu le lien du noyau phénolique à travers la liaison du pont méthylénique et enfin la formation du pont méthyle éther (*Roffael, 1982*). Les molécules tridimensionnelles interconnectées ainsi formées sont extrêmement stables contre l'hydrolyse. C'est pour cette raison que cette résine est appropriée à la fabrication de panneaux résistants à l'humidité. Les panneaux encollés avec du PF présente une résistance à l'humidité supérieure à ceux encollés avec la mélamine urée-formaldéhyde (MUF). Le liant PF est de loin l'adhésif dominant pour la fabrication de panneaux durs (HB), des panneaux à lamelles orientées (OSB) et le bois lamellé de placage (LVL). Elle fournit une forte adhésion dans un milieu sec avec un potentiel de s'exposer à l'eau liquide pour une durée mesurée en heures. Comme c'est le cas avec les liants UF et MF, la résine PF est plus habituellement appliquée aux fibres, aux lamelles et aux placages sous forme de solution aqueuse. Contrairement aux liants aminoplastes UF et MUF il se forme avec l'utilisation du phénol du phénoplaste qui se lie si fermement au formaldéhyde lors de la réaction en milieu basique que la résine résultante n'émet qu'une quantité infime du formaldéhyde. Les phénols sont en effet une famille des composés aromatiques avec un groupe hydroxyle lié directement au noyau aromatique. Ils sont différents des alcools par le fait qu'ils se comportent comme des acides faibles et se dissolvent promptement dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium, mais sont insolubles dans une solution aqueuse de carbonate de sodium. La plus large utilisation du phénol est la production des résines phénol-formaldéhyde. Actuellement, la production mondiale de phénol se chiffre à cinq millions de tonnes par année (*Gardziella et al., 2000*). Le ratio molaire phénol : formaldéhyde pour la fabrication du PF en milieu basique varie de 1 : 1,8 à 1 : 3,0. La condensation du phénol avec la formaldéhyde a lieu en présence de la soude (NaOH). Du fait que la base est ajoutée pour la condensation, le produit pré condensé formé reste soluble dans l'eau. En plus la basicité élevée du liant PF agit positivement sur sa stabilité lors de son stockage. En règle générale le contenu basique du liant PF destiné à être utilisé pour encoller les particules est de 8 à 13% (avec un pourcentage en solide de résine PF d'environ 50%) (*Roffael, 1982*). Sur les couches couvrantes des panneaux de particules à trois couches encollés avec du liant PF cette colle peut cependant être utilisée avec un

contenu basique de l'ordre de 3 à 5% (avec un pourcentage en solide de la résine PF d'environ 50%). La tendance pour une résine phénol-formaldéhyde de faible basicité se fait des nos jours persistante. Une attention particulière est faite lorsqu'on utilise plutôt les résines phénoliques fortement basiques pour la fabrication de panneaux de particules parce que la base dans la PF influence négativement les propriétés des panneaux (*Wittmann, 1973*). En effet la base dans le liant PF augmente l'hygroscopicité des panneaux qui en résultent après l'encollage parce que la soude est très hygroscopique (*Roffael et Schneider, 1978 ; Schneider, 1973*). *Schneider (1973)* prouve que les panneaux de particules encollés avec le liant PF basique durci ont une humidité d'équilibre nettement élevée dans un milieu où l'humidité de l'air est supérieure à 70% comparés à ceux encollés avec l'UF. Pour les panneaux encollés avec le liant PF, la saturation de l'humidité dans les fibres est atteinte et même dépassée lorsque l'humidité de l'air est de 90% (*Roffael et Schneider, 1978*). Par conséquent l'eau en surplus se retrouve emprisonnée dans les panneaux. De ce fait certaines parties de la base du phénolate et des constituants du bois peuvent être dissoutes. Les panneaux encollés à la PF basique émettent peu ou pas de formaldéhyde ; à ce sujet, ces types de panneaux sont nettement supérieurs à ceux encollés avec le liant UF (*Cherubim, 1976*). Les détails sur le PF et sur les panneaux fabriqués avec cette colle se trouvent dans les travaux de *Roffael et al., (1988)* ainsi que *Roffael et Dix, (1991)*. Pour les panneaux OSB les producteurs d'adhésifs ajoutent souvent de l'urée aux adhésifs PF pour diminuer leurs coûts : ce sont alors des colles UPF, très courantes de nos jours.

1.8 Les panneaux de particules conventionnelles (ou particules de bois)

On fait allusion aux panneaux de particules dans ce sous paragraphe parce que la fabrication de panneaux d'écorce s'appuie sur les mêmes méthodes utilisées dans la fabrication de panneaux de particules conventionnelles à trois couches. Les panneaux de particules conventionnelles à trois couches présentent deux couches couvrantes dénommées (CC) ayant des surfaces bien compactes et lisses sur lesquelles peuvent être collés la mélamine ou le placage. Les particules du bois utilisées dans ces couches couvrantes sont très fines pour maintenir la texture des surfaces des panneaux la plus fine possible et leur rugosité la plus basse possible. Dans les normes, l'épaisseur des particules destinées à être

utilisées dans les couches couvrantes doit être inférieure à 0,25 mm. La somme des surfaces de ces particules est plus grande ce qui explique la grande quantité de liant utilisée pour leur encollage en vue d'atteindre les valeurs requises des résistances de flexion et de traction (*Deppe et Ernst, 2000*). Dans la couche médiane dénommée (CM) d'un panneau de particules à trois couches, on utilise des particules grossières qui représentent la charpente stabilisante du panneau; la géométrie et la forme de ces particules y sont déterminantes. L'idéal est l'utilisation de particules longues et pleines. Pour avoir les résistances optimales à la flexion et à la traction, le coefficient d'élancement défini comme étant le rapport de la longueur de la particule sur sa largeur doit être compris entre 100 et 200 (*Deppe et Ernst, 2000*). Dans un panneau de particules à trois couches, les couches couvrantes influencent particulièrement la résistance à la flexion (module de rupture) alors que la couche médiane influence plus la résistance à la traction perpendiculaire (cohésion interne). Selon les épaisseurs cibles des panneaux de particules, la proportion en masse des particules des couches couvrantes est entre 20% et 40% de la masse totale du panneau afin de fabriquer un panneau présentant des excellentes qualités de surface. Dans le cadre de la fabrication de panneaux d'écorces le même principe sera utilisé. La masse volumique du panneau de particules à trois couches se situe entre 500 kg/m^3 et 750 kg/m^3 et elle présente une répartition caractéristique le long de l'épaisseur du panneau. Dans les couches couvrantes la valeur de la masse volumique est la plus élevée et se situe entre 700 kg/m^3 et 1200 kg/m^3 . Cette valeur de masse volumique diminue dans la couche médiane et se situe à ce niveau entre 400 kg/m^3 et 600 kg/m^3 . Les travaux antérieurs ont montré que ces valeurs sont difficiles à atteindre avec les panneaux d'écorces. Le profil de masse volumique d'un panneau de particules est influencé par une modification des paramètres de fabrication. Il en est de même pour les panneaux d'écorces. Le taux de compression qui est le rapport de l'épaisseur de l'ébauche sur l'épaisseur du panneau pressé est un paramètre très important pour savoir si l'ébauche ainsi formée sera bien compressible ou non. L'idéal serait d'avoir à fabriquer les panneaux ayant un taux de compression élevé afin de les rendre plus compressible dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques. La rigidité de la couche couvrante et celle du domaine directement en bordure dans la couche médiane sont d'une importance capitale pour le MOR (*Deppe et Ernst, 2000*). L'épaisseur de la particule et son degré de minceur n'ont aucune influence sur le gonflement en épaisseur (*Rackwitz, 1963*).

Toutefois, la couche médiane des panneaux paraît nettement plus compacte que les particules grossières prises individuellement parce qu'elle présente moins de volume poreux, ce qui fait que l'absorption d'eau soit moindre. Ceci a aussi une influence sur le gonflement en épaisseur (*Jossifov, 1989*). Une diminution de l'épaisseur du panneau conduit aussi tendanciellement à un faible gonflement en épaisseur et une faible absorption d'eau (*Jossifov, 1989*).

1.8.1 Séchage des particules, addition de la résine et de la cire tels qu'exigés dans les industries de fabrication de panneaux de particules

Le séchage des particules est une étape critique dans le processus de fabrication de panneaux. La matière première n'arrive pas à l'usine avec une humidité assez basse pour être directement utilisée. En effet, à leur arrivée en industrie leur teneur en humidité est estimée entre 10% et 200%. Afin d'être utilisées avec la résine liquide les particules doivent être séchées jusqu'à ce que leur humidité soit entre 2% et 7% (*Youngquist, 1999*), sauf pour les panneaux MDF. Le taux d'humidité des particules est d'une importance particulière pendant les opérations de pressage à chaud. C'est ainsi qu'il faut savoir sélectionner les séchoirs appropriés ainsi que l'équipement de contrôle. La teneur en humidité des particules à atteindre lors du séchage dépend sous quelle forme la résine sera ajoutée : Si elle est ajoutée à sec, sous forme d'une solution ou d'une émulsion. La teneur en humidité des particules à la sortie des séchoirs est de l'ordre 4% à 8% (*Youngquist, 1999*).

En ce qui concerne l'addition de la résine et de la cire, la résine la plus fréquente dans la fabrication de panneaux des particules est l'UF. Les autres résines comme la PF, la MUF et l'isocyanate sont parfois utilisées. Le type de résine utilisé est fonction du type de produit souhaité. Sur la base de la masse anhydre des solides de la résine et de la masse anhydre des particules, la teneur en résine est comprise entre 4% et 10% mais le plus souvent entre 6 et 9% pour la résine UF. La teneur en résine des couches couvrantes est généralement légèrement plus élevée que celle de la couche médiane. La résine UF est généralement introduite dans la solution d'eau contenant à peu près 50% à 65% de solides. En plus de la résine, la cire est ajoutée pour améliorer la résistance à l'humidité à court terme. Elle a

aussi un effet lubrifiant. La quantité de la cire à ajouter varie entre 0,3% et 1% basée sur la masse anhydre des particules. Dans les panneaux de particules à trois couches, le pourcentage de la résine dans les couches couvrantes est en général plus élevé que dans la couche médiane. [On estime que la teneur en résine est de 8 à 15% dans les couches couvrantes et de 4 à 8% dans la couche médiane) (*Youngquist, 1999*)].

1.9 Quelques notions sur la mouillabilité et l'angle de contact

Lors des visites effectuées dans différentes usines des composites à base de bois, il a été noté qu'aucune importance particulière n'était portée sur les notions de mouillabilité et d'angle de contact, qui pourtant ont aussi une importance non négligeable dans ce domaine et font l'objet de plusieurs études à l'échelle du laboratoire. En effet, l'optimisation de l'encollage de ces composites nécessite une maîtrise de ces deux notions. La mouillabilité est évaluée par la mesure d'angle de contact.

Plusieurs chercheurs ont montré que la mouillabilité du bois telle que déterminée à travers la mesure d'angle de contact est étroitement associée à l'intégrité de la ligne de colle (*Bodig, 1962; Freeman, 1959; Hse, 1972; Suchsland et Stevens, 1968*). Le principe d'angle de contact d'équilibre et sa méthode de détermination sur les surfaces du bois sont détaillés dans les travaux de (*Gray, 1962*). *Herczeg (1965)* a découvert que la force de liaison dépend du mouillage, de l'étalement et de la tension de surface. *Bryant (1968)* a prouvé que la qualité de la liaison est influencée par la mouillabilité du bois, la résine et les interactions chimiques entre la résine et la surface du bois. *Wellons (1980)* a trouvé que les placages du sapin Douglas deviennent moins mouillables quand leur taux d'humidité décroît à la température ambiante. C'est la raison pour laquelle lors de leur pressage à chaud, leur collage n'est pas inhibé par la faible mouillabilité, mais le film d'adhésif est plutôt desséché. L'importance de la formulation de la phénol-formaldéhyde sur la mouillabilité du pin du sud a été investiguée par *Hse (1972)*. Ses recherches montrent que l'angle de contact décroît lorsque le ratio molaire de l'hydroxyde de sodium sur le phénol croît et que le ratio de la formaldéhyde sur le phénol décroît. *Hse (1972)* a également établi dans ses travaux une différence de mouillabilité au niveau du bois initial et du bois final du pin du sud. Il le fait en mesurant les angles de contact qui est plus grand dans le bois final que dans le bois

initial. Les traitements alcalins, l'extraction à l'eau chaude et l'extraction à l'éthanol rendent les particules de bois plus hydrophiles et favorisent leur mouillabilité. Par contre l'acétylation les rend plus hydrophobes et défavorise leur mouillabilité (*Pecina et Paprzycki, 1990*). Les matières hydrophobes comme la cire et les gras peuvent recouvrir la surface du bois et rendre leur mouillage difficile. Le tilleul (*Tilia sp.*) passe pour être une espèce riche en gras qui pose énormément des difficultés lors de son encollage dans son utilisation pour la fabrication des contreplaqués. Ces difficultés sont dues à la forte concentration des substances extractibles grasses sur la surface des placages (*Weissman, 1976*). La lignine et la résine ont aussi un effet négatif sur la mouillabilité parce qu'elles sont hydrophobes. Un autre facteur qui affecte sérieusement la mouillabilité du bois c'est son vieillissement. Il a été démontré qu'il est plus facile d'appliquer une couche de peinture sur un bois frais que sur un qui a déjà pris de l'âge. La fraîcheur de la surface du bois est un des facteurs les plus importants pour son mouillage. La perte par cette surface de l'habileté à être mouillée et à être encollée avec le vieillissement est un phénomène qui a suscité la curiosité de plusieurs chercheurs. *Chen (1970), Troughout et Chow (1971), Gardner et al. (1991), Nussbaum (1999), Walinder (2000)* ont prouvé que l'effet du vieillissement est dû à la migration de extractibles du bois vers la surface externe après leur préparation ce qui fait décroître la mouillabilité de cette surface.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la mouillabilité du bois. Parmi les facteurs les plus connus, il y a l'effet du sablage, l'effet de la surface du bois (anisotropie), l'effet de la méthode de séchage et l'effet des extractibles. À propos de l'effet de sablage, *Shupe et al. (2001)* ont fait une investigation de l'effet de sablage de certains feuillus sur leur mouillabilité; ils s'attendaient à ce que la surface lisse des échantillons sablés ait un angle de contact plus petit que celui sur les surfaces non sablées, mais ce fut le contraire parce que l'angle de contact a été plus grand sur les échantillons sablés que sur ceux non sablés de 3,9° et de 12,0° pour les surfaces des faces transversale et radiale respectivement. Les résultats de ces études sont en concordance avec d'autres faites antérieurement qui ont montré que la rugosité de surface avait un impact minimal sur la mouillabilité (*Gray, 1961, 1962; Herczeg, 1965*). Cependant d'autres études ont trouvé des angles de contact décroissant avec une augmentation de la rugosité (*Marian et Stumbo, 1962 a,b*).

En ce qui concerne la méthode de séchage, certains chercheurs prétendent que les échantillons séchés à l'étuve donneraient une grande valeur d'angle de contact en raison de la désactivation de leur surface qui survienne lors du séchage à l'étuve (*Gardner et al., 1996*) et de la migration des extractibles vers les surfaces (*Hse et Kuo, 1988*). Mais *Shupe et al. (2001)* démontrent le contraire dans leurs travaux résumé comme suit : trois groupes d'échantillons des quatre espèces (épinette, pin, peuplier, hêtre) ont été séchés dans l'étuve en 24 heures à la température de 105° C, à l'air libre et à froid. Les échantillons séchés à l'étuve ont donné l'angle de contact le plus grand de 63,3°. Les échantillons séchés à l'air libre ont donné un angle de contact de 62,9° et ceux séchés à froid un angle de contact de 57,0°. Les échantillons séchés à froid ont donné la valeur d'angle de contact la plus faible. Le froid préserve plutôt que de dégrader les propriétés chimiques de la surface du bois. Par conséquent la désactivation de la surface est dans ce cas minimale et le mouillage est plus favorable. Cette composante de l'étude a aussi investigué les angles de contact sur tous les trois surfaces (transversale, radiale, tangentielle) de chacune des quatre espèces (épinette, pin, peuplier, hêtre). Les valeurs prises sur le plan transversal étaient plus élevées que celles des plans radial et tangentiel qui étaient presque identiques. Ce modèle est largement attribué à la grande rugosité de surface et l'ouverture des cellules des lumens sur la surface transversale. Les surfaces tangentielle et radiale ont presque la même structure anatomique d'où la similarité de leurs valeurs de rugosité de surface.

Il est reconnu que d'autres facteurs influencent les mesures d'angle de contact. *Chen (1970)* rapporte que les extractibles du bois peuvent influencer l'angle de contact du bois. *Jordan et Wellons (1977)* ont trouvé que l'extraction augmentait significativement le mouillage des veneers (placages) du diptérocarpe. *Kajita et Skaar (1992)* ont attribué la grande mouillabilité de l'aubier comparée au duramen à la grande teneur en extractible du duramen. Quoique les extractibles tendent à dominer la surface du bois, toutes les composantes chimiques contenues dans le bois contribuent à sa chimie de surface et affectent donc l'activation de la surface (*Gardner et al., 1996*). En plus la tension de surface, la viscosité du liquide, l'empilement de surface moléculaire, la tension de surface critique du solide et l'interaction solide-liquide ont toutes un impact sur la valeur de l'angle de contact. La rugosité de la surface affecte aussi l'angle de contact parce qu'elle crée plus

d'un état métastable au niveau de l'interface solide-liquide-vapeur (*Johnson et Dettre, 1993*).

Hameed et Roffael (1999) ont fait des investigations sur la mouillabilité de l'aubier et du duramen du pin sylvestre, du mélèze et du sapin Douglas. Ils l'ont fait parce qu'ils ont constaté que pour l'encollage du bois et des particules du bois, ce ne sont pas seulement les propriétés chimiques bien définies du bois comme le pH, la teneur en extractible et le pouvoir tampon qui sont impliquées, mais aussi les propriétés morphologiques et physiques, qui influencent l'effet d'interaction entre le bois et la colle utilisée.

Le mouillage de l'aubier et du duramen des espèces utilisées avec l'eau, la colle urée-formaldéhyde (UF), la colle phénol-formaldéhyde (PF), la colle mélamine-urée-phénol-formaldéhyde (MUPF), et la colle isocyanate (PMDI) ont fait ressortir les différentes observations décrites ci-dessous.

- Le mouillage moyen de l'aubier du mélèze, du pin sylvestre et du sapin Douglas avec l'eau, l'UF, la PF, la MUPF, et le PMDI sur les coupes radiale, tangentielle et transversale est meilleur que celui fait sur les mêmes coupes du duramen. Ceci serait peut être dû à la forte teneur en extractibles hydrophobes (cires, graisses, résines et acides gras) du duramen qui rend le mouillage difficile (*Chen, 1970*).
- Le mouillage croît avec une augmentation de la durée du test, à ce sujet, les différences entre le duramen et l'aubier demeurent qualitativement indépendantes du temps de la mesure et de la direction anatomique (anisotropie).
- À toutes les durées de la mesure, l'eau mouille peu l'aubier et le duramen du mélèze sur la coupe tangentielle que sur les autres plans de coupe. Le mouillage du duramen du mélèze par l'eau est continuellement plus faible que celui de son aubier.
- Un faible mouillage de l'aubier et du duramen du mélèze sur la coupe tangentielle avec l'UF a aussi été constaté après les durées de mesure de 120s, 180s, 240s et 300s. Tout comme avec l'eau, le mouillage du duramen du mélèze avec la colle UF est plus mauvais que celui de son aubier.
- Après toutes les durées de mesure, les plus faibles mouillages du bois avec la colle UF ont été constatés sur la coupe tangentielle du duramen et de l'aubier du sapin de

Douglas et du pin sylvestre. En plus le mouillage du duramen est continuellement plus faible que celui de l'aubier.

- Après une durée de mouillage de 5s, 30s, 60s 120s et 180s, l'aubier et le duramen du mélèze ont présenté sur leur coupe tangentielle le plus faible mouillage avec la colle PF.
- Après une durée de mouillage de 30s, 60s, 120s et 180s, l'aubier et le duramen du pin sylvestre ont présenté sur leur coupe tangentielle un mouillage avec la colle PF un peu plus grand que celui sur la coupe radiale du bois et le plus grand mouillage est observé sur la coupe transversale. Le mouillage du duramen du pin sylvestre est aussi plus faible que celui de son aubier. Cet écart de réaction repose probablement sur le fait que la base de la colle PF a un effet de gonflement sur le bois et que le gonflement est continuellement plus important ou plus grand en direction tangentielle qu'en directions radiale et transversale.
- Le mouillage avec la colle PF sur les coupes transversale et tangentielle de l'aubier du sapin Douglas est meilleur que celui de la coupe radiale.
- Le mouillage avec la MUPF sur les coupes radiale et tangentielle de l'aubier du mélèze est plus faible que celui de la coupe transversale.
- Sur les coupes tangentielle et radiale de l'aubier et du duramen du sapin de Douglas, le mouillage avec la MUPF après les durées de 5s, 60s, 120s, 180s, 240s et 300s est plus faible que celui de la coupe transversale.
- Sur les coupes tangentielles de l'aubier et du duramen des trois espèces, le mouillage avec le PMDI est également le plus faible après toutes les durées de mesure. L'aubier et le duramen du sapin Douglas ont été peu mouillés sur leurs coupes radiale et tangentielle.

Le mouillage de ces trois espèces avec l'eau et les différentes colles dépend entre autres de leur structure de surface, leur système capillaire (les trachéides coupées en biais, la distribution du canal résinifère, la structure du bois initial et du bois final au sein d'un même cerne annuel) et de leur contenu.

Il faut toutefois remarquer que toutes les mesures de tension de surface mettent en cause des énergies assez faibles. Or lors de la prise des résines réactives, il y a établissement des

liens covalents très énergétiques, ce qui permet d'éviter de tirer des conclusions quant à l'effet déterminant des phénomènes.

1.10 Objectif général

L'objectif de ce travail est de faire dans un premier temps une série d'essais qui permettra de mettre sur pied différentes variantes de panneaux mixtes qui respecteront les valeurs normalisées en renforçant les particules d'écorce de bouleau blanc soit par les fibres, soit par les particules ou les lamelles de bois. Cette phase préliminaire s'impose parce que les panneaux d'écorce de bouleau blanc n'ont jamais été fabriqués. Une fois ces variantes de panneau mises sur pied, l'objet du second volet de ce travail consistera à les fabriquer sur la base d'un dispositif expérimental propre à chaque variante, de faire les tests spécifiques et de comparer les résultats obtenus aux valeurs normalisées, enfin d'utiliser le logiciel SAS pour analyser les résultats conformément au dispositif préalablement mis sur pied pour chaque type de panneaux. Parallèlement à la phase des essais une analyse chimique des particules d'écorce sera faite afin de mettre en évidence les composantes susceptibles d'avoir un impact direct sur les propriétés des panneaux.

CHAPITRE 2 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES

2.1 Description de la préparation des particules d'écorces utilisées et des premiers essais

Les écorces de bouleau blanc utilisées pour ce travail ont été fournies par la scierie Thomas Louis Tremblay Inc. de Ste-Monique au Québec. La phase d'essai a pris plus de la moitié de temps imparti pour ce travail parce que face à un matériau complexe comme les écorces de bouleau qui n'avaient jamais été utilisées auparavant dans la fabrication de panneaux, une imagination créatrice s'imposait pour mettre sur pied une méthode permettant de l'utiliser dans la fabrication de panneaux. Les écorces reçues sont séchées à la température de la pièce (28° C) pendant deux semaines. Après le séchage, les impuretés comme les gros morceaux de bois, le métal et la terre sont éliminés par triage. Après le triage, les écorces sont d'abord broyées dans un broyeur à marteau du type **Jeffrey** mais la granulométrie obtenue est en moyenne de l'ordre d'une dizaine de centimètres, raison pour laquelle elles sont broyées une deuxième fois dans un **raffineur à grille Pallmann** où les particules obtenues sont à 95 % toutes passées à travers les mailles du tamis de 6 mm après tamisage. Les 5 % restées au dessus du tamis ont une granulométrie inférieure à 8 mm et ont été broyées de nouveau. Un deuxième tamis de 2 mm est utilisé pour séparer les particules à utiliser pour les couches couvrantes comme c'est le cas avec les particules de bois. Toutes les particules d'écorce interne de bouleau sont passées à travers le tamis de 2 mm de sorte que seules les particules d'écorces externes sont restées au dessus du tamis. C'est ainsi que les parties externes et internes de cette écorce ont pu être séparées. Avec les deux classes de granulométrie obtenues (particules grossières entre 2 et 6 mm et particules fines entre 0,25 mm et 2 mm) des panneaux constitués exclusivement d'écorces ont été fabriqués avec 60 % de particules grossière au centre et 40 % de particules fines dans les couches de surface. Les propriétés mécaniques des panneaux ainsi fabriqués étaient très faibles, alors que leur gonflement en épaisseur était très faible (bonne propriété physique). Même une extraction à l'eau chaude des particules n'a pas aidé à améliorer les propriétés mécaniques. Les essais se sont poursuivis par l'utilisation des particules de bois et de fibres de bois dans les couches de surface comme renfort dans la fabrication de panneaux mixtes avec les particules grossières d'écorce externe au centre. Le module de rupture et le module d'élasticité des

panneaux fabriqués ont atteint les normes des panneaux de type M-1 (panneaux à usage intérieur) mais leur cohésion interne est restée très basse. C'est ce qui a laissé entrevoir que les particules grossières d'écorce externe de bouleau blanc utilisées au centre de ces panneaux sont très difficiles à encoller à l'urée-formaldéhyde ou la phénol-formaldéhyde lorsque leur granulométrie est comprise entre 2 et 6 mm. C'est pour cette raison qu'elles ont été broyées une seconde fois de manière à avoir granulométrie entre 0,25 et 2 mm.

Les particules d'écorce interne ont été aussi systématiquement séparées de celles de l'écorce externe par tamisage. Afin de tester les propriétés mécaniques intrinsèques des panneaux exclusivement à base d'écorce interne, un panneau monocouche a été fabriqué. La cohésion interne de ce panneau était très bonne mais son module de rupture et son module d'élasticité étaient très faibles. C'est ce qui nous a permis de découvrir que les écorces internes ne pouvaient qu'être utilisées dans la couche centrale des panneaux mixtes avec un renfort à base de bois dans les couches de surface.

Les essais se sont poursuivis avec l'utilisation séparée des deux types d'écorces : les particules d'écorce interne avec une granulométrie comprise entre 0,25 et 1 mm et celles d'écorce externe avec un diamètre compris entre 0,25 et 1,5 mm. Les classes de granulométrie de ces deux types d'écorce sont représentées à la Figure 2.1. Des panneaux monocouches ont été fabriqués avec chaque type de particules d'écorce à différentes teneurs (8 %, 10 %, 12 %, 14 % et 16 %) de colle UF afin d'optimiser la quantité de colle à utiliser. La teneur en liant ont été fixés à la base de la masse des particules d'écorce sèches. Les tests de cohésion interne ont montré que le pourcentage idéal de colle UF à utiliser est 12% (de la masse totale du panneau). C'est avec ce pourcentage de colle que les essais se sont poursuivis dans la fabrication de panneaux mixtes. Plusieurs types de panneaux sont conçus et fabriqués et c'est par cette voie que les variantes de panneau retenues pour ce projet ont été mises sur pied. Seuls les tests des propriétés mécaniques (cohésion interne, modules de rupture et d'élasticité) ont été faits sur les panneaux fabriqué. Les types de panneaux fabriqués pour ces essais et les résultats des tests des propriétés mécaniques sont résumés ci-dessous.

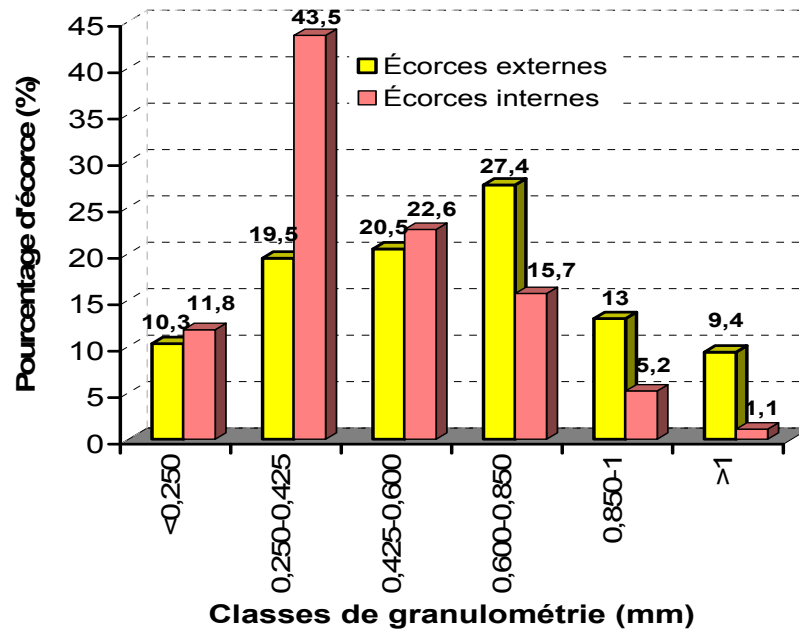


Figure 2.1 Classe de granulométrie des particules d'écorce externe et interne de bouleau blanc

2.2 Sommaire de quelques essais réalisés avec les nouvelles particules préparées

2.2.1 Panneaux monocouches avec renfort des fibres de bois

Les granulométries des particules d'écorce externe et interne préparées étant un peu semblable à celles des fibres de bois il a été jugé nécessaire de faire des essais de fabrication de panneaux monocouche en ajoutant à chaque type d'écorce un certain pourcentage de fibre de bois comme renfort afin de résoudre le problème de flexion qui à cette étape des essais reste l'obstacle majeur. La masse volumique cible des panneaux à fabriquer est 750 kg/m^3 et leur épaisseur 11mm. La colle urée-formaldéhyde est utilisée à 12%. Les particules de bois utilisées étaient un mélange d'épinette, de pin et de sapin.

2.2.1.1 Mélange de 30% de fibres de bois et 70% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : $0,33 \text{ MPa} < 0,40 \text{ MPa}$ qui est la norme
- Module de rupture : $10,6 \text{ Mpa} < 11 \text{ MPa}$ qui est la norme

- Module d'élasticité : 1,099 GPa < 1,725 GPa qui est la norme
- Gonflement après 2h : 18% (pas bon)
- Gonflement après 24h : 20,4%

Ce type de panneau n'a pas été retenu parce que les valeurs normalisées des trois principales propriétés mécaniques n'étaient pas atteintes.

2.2.1.2 Mélange de 40% de fibres de bois et 60% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : 0,29 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 10,7 Mpa < 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,195 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

Les propriétés mécaniques sont toujours mauvaises

2.2.1.3 Mélange de 50% de fibres de bois et 50% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : 0,29 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 14,3 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,552 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

La cohésion interne et le module d'élasticité sont mauvais.

2.2.1.4 Mélange de 50% de fibres de bois et 50% de particules d'écorce interne

- Cohésion interne : 0,41 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 11,6 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,594 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

Le module d'élasticité exigé par la norme n'est pas atteint.

Toutes les valeurs des propriétés mécaniques des panneaux monocouches sus mentionnés n'ayant pas été atteintes, il a été décidé de s'orienter vers la fabrication de panneaux d'écorce trois couches avec renfort de particules ou de fibres de bois soit dans la couche centrale, soit dans les couches de surface

2.2.2 Panneaux mixtes trois couches avec renfort de particules ou fibres de bois

2.2.2.1 Couche de surface : 40% de particules fines de bois, couche du centre : 60% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : 0,23 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 5,5 Mpa < 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,199 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

Mauvaises propriétés mécaniques

2.2.2.2 Couche de surface : 40% de particules fines de bois, couche du centre : 60% de particules d'écorce interne

- Cohésion interne : 0,48 MPa > 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 6,7 Mpa < 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,547 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

Les modules de rupture et d'élasticité restent faibles

2.2.2.3 Couche de surface : 40% de fibres de bois, couche du centre : 60% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : 0,18 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 12,4 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,386 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

La cohésion interne et le module d'élasticité restent faibles.

2.2.2.4 Couche de surface : 40% de fibres de bois, couche du centre : 60% de particules d'écorce interne

- Cohésion interne : 0,2 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 13,2 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,543 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

La cohésion interne et le modules d'élasticité restent faibles

2.2.2.5 Couche de surface : 30% fibres de bois, couche du centre : 70% de particules fines d'écorce externe

- Cohésion interne : 0,12 MPa < 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 14,2 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,533 GPa < 1,725 GPa qui est la norme

Le module d'élasticité et la cohésion interne restent faibles

2.2.2.6 Couche de surface : 25% de fibres de bois, couche du centre : 75% de particules d'écorce interne (auxquelles sont ajoutés 9% de fibres de bois)

- Cohésion interne : 0,52 MPa > 0,40 MPa qui est la norme
- Module de rupture : 13,1 Mpa > 11 MPa qui est la norme
- Module d'élasticité : 1,727 GPa > 1,725 GPa qui est la norme.

Bonnes propriétés mécaniques. C'est ce dernier essai qui a permis de découvrir que l'utilisation des particules d'écorce interne doit être faite dans les panneaux mixtes à trois couches avec renfort de moins de 30% de fibres de bois dans les couches de surface. De ce constat, un dispositif expérimental décrivant les panneaux où les particules d'écorce interne sont utilisées dans la couche centrale et les fibres de bois aux pourcentages respectifs de 22% et 25% dans les couches de surface a été élaboré. Les résultats de ces essais montrent aussi clairement qu'il est difficile d'avoir les panneaux mixtes qui rencontrent les exigences de la norme, en utilisant les particules d'écorce externe dans le centre et les particules ou les fibres de bois dans les couches de surface. C'est pour cette raison que l'option des les utiliser dans les couches de surface en mettant le renfort qui sont soit les particules grossières de bois soit les fibres de bois dans la couche centrale a été prise. Les résultats des essais réalisés avec cette nouvelle stratégie ont permis d'avoir des panneaux dont les propriétés normalisées sont atteintes, ce qui a facilité la mise sur pied de deux autres dispositifs pour la fabrication de deux autres variantes de panneaux qui sont présentées plus loin dans cette thèse. Les essais ont aussi permis de mettre sur pied une variante particulière de panneau mixte à lamelles orientées, où les particules d'écorce externe sont utilisées dans la couche médiane et les lamelles de bois dans les couches couvrantes.

Plus de 150 panneaux ont été fabriqués lors de la phase d'essai et ceux décrits dans ce chapitre ont permis de mettre sur pieds les différents plans d'expérience utilisés aux chapitres 5, 6, 7 et 8.

CHAPITRE 3 : PARTIE EXPÉRIMENTALE

Résumé

Les particules susceptibles d'être utilisées efficacement de nos jours dans la fabrication de panneaux sont celles dont les principaux constituants chimiques ne nuisent pas à l'encollage et au pressage. Face à une matière première aussi complexe que les écorces de bouleau blanc qui n'ont jamais été utilisées dans la fabrication de panneaux, il est important de faire leur analyse chimique et de comparer les résultats de cette analyse à ceux faits sur les particules de bois afin de maîtriser les paramètres à ajuster lors de leur utilisation dans la fabrication de panneaux et de comprendre leur contribution aux propriétés de ces panneaux. Dans le cadre de ce travail, les analyses chimiques effectuées sont : 1) la détermination du taux de cendre dans les écorces externes et internes de bouleau blanc, 2) la mesure du pourcentage de cellulose, de pentosanes et de lignine des deux types d'écorce, 3) la détermination du taux d'extractibles obtenu par (a) la méthode à l'eau chaude, (b) la méthode au méthanol chaud et (c) la méthode au méthanol froid, 4) l'investigation de l'acidité des particules d'écorce ainsi que les particules de bois utilisées comme renfort aux écorces dans la fabrication de panneaux. Le taux de cendre obtenu est relativement peu élevé comparé à celui d'autres espèces fournis par la littérature. Le taux d'extractibles des particules d'écorce internes obtenu par la méthode à l'eau chaude est supérieur à celui des particules d'écorce externe alors que c'est l'inverse qui se produit lorsque l'extraction est faite au méthanol. La différence entre la méthode à l'eau chaude et la méthode au méthanol est hautement significative avec un rendement plus élevé lorsque le contenu en méthanol est élevé. L'analyse statistique des données n'a décelé aucune différence significative entre la méthode d'extraction à reflux au méthanol et la méthode d'extraction méthanol à la température de la pièce. Ce qui permet de choisir cette dernière méthode comme la meilleure parce qu'elle est peu coûteuse, moins polluante et a un rendement élevé. Les taux respectifs de cellulose, de pentosanes et de lignine sont faibles dans les écorces internes comparés à ceux du bois et très faibles dans les écorces externes avec moins de 6% de pentosanes et de cellulose; ce qui met en évidence que ces particules ne sont pas structurales comme le bois. Les résultats de la mesure du pH montrent une différence significative d'une part entre les particules d'écorce interne (plus acides) et les particules

d'écorce externe et d'autre part entre les deux types d'écorce et les particules de bois utilisées comme renfort dans la fabrication de panneaux. Les pouvoirs tampons acides et basiques des particules d'écorce interne et externe sont plus élevés que ceux de particules utilisées comme renfort, ce qui constitue un obstacle à la polymérisation complète de la colle urée-formaldéhyde lors du pressage à chaud.

3.1 Introduction

La fabrication de panneaux de particules à base d'écorce se fait normalement en suivant les méthodes utilisées pour les panneaux à base de bois. Mais la difficulté majeure avec les écorces est qu'en plus d'avoir des propriétés mécaniques plus faibles que celles du bois correspondant (*Martin, 1969; Cassens, 1974*), elles ont une composition chimique différente de celle du bois due à la présence des polyphénols et des subérines ainsi que d'un pourcentage élevé d'extractibles. En plus la composition chimique varie beaucoup entre les écorces de plusieurs espèces et même entre la partie interne et externe de l'écorce d'une même espèce, d'où la nécessité de faire leur analyse chimique avant de les utiliser dans la fabrication de panneaux. Les analyses chimiques les plus importantes sont : le taux de cendre, le pourcentage de cellulose, de pentosanes et de lignine, le taux des extractibles (surtout solubles dans l'eau) et finalement l'acidité. La cendre est constituée de composés inorganiques qui sont des minéraux et leur taux dans les écorces est le plus souvent de 10% supérieur à celui dans le bois (*Choong et al., 1976*). L'élément prédominant dans les cendres est le calcium (82-95%), le potassium et le magnésium apparaissant en faible quantité (*Fengel et Wegener, 1989*). Le danger d'un contenu élevé en cendre de l'écorce dans la fabrication de panneaux est que les minéraux de ces cendres sont des substances abrasives préjudiciables aux outils d'usinage d'une part et d'autre part ce taux élevé de cendre ne contribue pas à l'amélioration des propriétés mécaniques des panneaux. La détermination du taux de lignine, de pentosanes et surtout de cellulose permet d'emblée de savoir si les écorces en présence sont structurales ou pas afin de décider s'il faut les renforcer avec des particules structurales comme celles de bois lors de leur utilisation dans la fabrication de panneaux. L'acidité et les extractibles des particules d'écorce occupent une place prépondérante dans les analyses chimiques. Dans le cas de ce projet de recherche, les panneaux seront fabriqués à base d'écorces de bouleau avec renfort de différentes

particules et fibres de bois. Une détermination de l'acidité des différentes particules à combiner s'impose parce que la colle à utiliser sera l'urée-formaldéhyde (UF) qui ne polymérise qu'en milieu acide. Le pH et le pouvoir tampon jouent un rôle important dans la stabilité dimensionnelle des panneaux (*Hsu, 1997*) et dans la vitesse de prise des adhésifs. La cohésion interne des panneaux comme le MDF encollés avec l'UF peut être affectée par l'acidité des fibres (*Park et al., 2001*). Dans les études antérieures, *Xing et al. (2004)* ont montré que le pH et le pouvoir tampon varient avec le type de matière première. Ils n'ont pas trouvé de relation linéaire entre le pH et les pouvoirs tampons acide et basique, mais ont trouvé plutôt une relation linéaire entre le pH et les pouvoirs tampons absolu et relatif. Un autre aspect important de leur travail fut la preuve de l'existence d'une relation linéaire entre le pH des espèces utilisées et le temps de gel de la colle UF qui décroît lorsque le pH diminue. Les travaux de *Johns et Niazi (1980)*, *Peng et Li (1983)* ainsi que *Guo et al. (1998)* révèlent les mêmes conclusions. *Volz (1971)* a comparé la valeur du pH des écorces de quatre essences européennes obtenue par les méthodes d'extraction à l'eau chaude et à l'eau froide et est arrivé à la conclusion que le pH de la solution d'eau chaude est légèrement plus faible que celui de la solution d'eau froide. La diminution du pH de la solution d'eau chaude est expliquée par la production d'acides volatils (acide acétique et acide formique) qui se libèrent des particules lorsque la température augmente (*Gignac, 1992*). Quant aux extractibles, il a été prouvé qu'ils peuvent influencer négativement la polymérisation des colles lors du pressage à chaud des panneaux. En général les panneaux fabriqués avec des particules contenant beaucoup d'extractibles ont une cohésion interne faible. S'il y a aussi beaucoup d'extractibles volatils dans les particules, les panneaux sont exposés aux soufflures à la fin du pressage à chaud. Les principales possibilités d'utilisation des extractibles sont à trouver dans les travaux de (*Aaron, 1966*); (*Farber, 1959*); (*Hall et al., 1960*); (*Hergert, 1962*). Par exemple, des extractibles d'écorce qui se commercialisent bien sont des tannins qui sont généralement des polyphénols condensés (*Hathway, 1962*; *Hergert, 1962*; *Hall et al., 1960*; *Hergert, 1960*; *Herrick et Conca., 1960*). Les tannins d'écorce sont aussi utilisés dans la synthèse de certains adhésifs destinés aux industries de contreplaqués et de panneaux de particules (*Anderson et al., 1961*; *MacLean and Gardner, 1952*). *Dix et Marutzki (1984)* ont établi que l'eau est le solvant le plus simple à utiliser pour les extractions des écorces. Le bois de bouleau blanc ne contient

pas de tannins alors que son écorce en contient seulement 1,5 à 4,5 % (*Russell et al., 1942-1945*). Les écorces de bouleau blanc sont couvertes d'une poudre blanche non toxique (triterpènes pentacycliques au squelette du lupane) qui peut causer des éruptions cutanées (*Woods et Calnan, 1976*).

Le premier objectif de cette partie du travail consiste à déterminer le taux de cendre, les pourcentages de cellulose, de pentosanes et de lignine des particules d'écorce de bouleau blanc. Quant au second objectif, il est question de déterminer l'acidité (pH et pouvoir tampon) des particules d'écorce et de toutes les particules et fibres de bois à associer aux écorces pour la fabrication de panneaux mixtes afin d'investiguer à l'aide d'une analyse statistique les différences significatives parmi leurs acidités qui permettra de maîtriser l'ajustement du pH de la colle UF pendant l'encollage et de la température des plateaux pendant le pressage pour éviter les problèmes de pré-cuisson ou de sur-cuisson. L'objet du troisième volet consiste à déterminer les taux d'extractible obtenu respectivement par la méthode à l'eau chaude (reflux trois), au méthanol (reflux trois heures) et au méthanol à la température de la pièce des particules d'écorce externe et interne. Une analyse statistique permettra de déceler les différences significatives et de choisir la meilleure méthode en terme de rendements en extractibles, de temps et de coût. Le dernier objectif de ce chapitre consiste à investiguer l'effet de l'extraction qualitative sur l'acidité de l'écorce de bouleau. La présence de deux facteurs qui sont le type d'écorce (écorce externe et écorce interne) et l'extraction (écorces non extraites et écorces extraites) impose l'utilisation d'une analyse factorielle dans cette investigation.

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Préparation des particules pour les analyses chimiques

Les particules d'écorce et de bois sont broyées d'abord dans un broyeur de marque Fritsch Pulverisette 19 et par la suite, elles sont rendues plus fines dans un second broyeur de marque Retsch ZM100. Elles sont tamisées dans des tamis montés sur une machine de marque CE Tyler (Testing sieve shaker). Les particules retenues pour les analyses sont celles ayant une granulométrie comprise entre 250 μm (tamis 60) et 400 μm (tamis 40). Ces

particules sont conservées dans des sacs plastiques à la température de la pièce (environ 22°C) afin que l'humidité s'y uniformise.

3.2.2 Détermination du taux de cendre

3.2.2.1 Bref rappel de la littérature

Les tissus d'écorce pure ne contiennent pas normalement plus de matière inorganique que le bois (maximum : environ 1%). Mais les écorces ordinaires extraites contiennent jusqu'à 20% de cendre parce que le sable est habituellement emprisonné dans le rhytidome, ce qui augmente le pourcentage de cendre. De plus les écorces obtenues à partir des troncs abattus et traînés au sol contiennent aussi beaucoup de sable et de gravier qui y sont encastés, contribuant là aussi à l'augmentation du pourcentage de cendre (Tableau 3.1). La présence de gravier dans l'écorce est préjudiciable aux outils de sciage et de tranchage parce qu'il entraîne leur usure prématurée.

Tableau 3. 1 Pourcentage approximatif de cendre dans le bois et l'écorce

	Résineux		Feuillus	
	Bois	Écorce	Bois	Écorce
Taux de Cendre	0, 2 – 0,6%	Jusqu'à 20%	0, 2 – 0,6%	Jusqu'à 20%

3.2.2.2 Méthode de détermination du taux de cendre

Deux grammes anhydres d'écorce sont pesés dans des creusets. Pour chaque type d'écorce, trois répétitions sont faites. Les creusets sont ensuite placés dans un four à moufle où les particules d'écorces sont brûlées à la température de 600° C pendant 6 heures. Les cendres obtenues sont refroidies dans un dessiccateur avant d'être pesées pour la détermination de leur taux dans les écorces. Le pourcentage de la cendre est calculé par la formule suivante :

$PC = (M_1/M_2) \times 100$, où PC est le pourcentage de cendre, M_1 sa masse et M_2 la masse anhydre des particules d'écorce (ASTM-D 1102). Les résultats du taux de cendre dans les écorces internes et externes de bouleau blanc sont présentés dans le Tableau 3.2. Le taux de cendre de 0,88% des particules d'écorce externe de bouleau est du même ordre de grandeur que celui du bois. Donc l'utilisation de cette écorce dans la fabrication de panneaux n'aura

aucun impact négatif sur les outils d'usinage. Le taux de cendre de 2,44% des particules d'écorce interne est trois fois plus élevé que celui des particules d'écorce externe mais reste relativement faible comparé aux taux d'autres types d'écorce qui peuvent atteindre 20%.

Tableau 3. 2 Taux de cendre des particules d'écorces de bouleau blanc

	Particules d'écorce externe de bouleau blanc	Particules d'écorce interne de bouleau blanc
Taux de cendre (%)	0,88	2,44

3.2.3 Détermination du taux de cellulose de pentosanes et de lignine

La procédure décrite à la suite a été utilisé pour la détermination du taux de cellulose, de pentosanes et de lignine. Elle est tirée des protocoles du cours CHM-22170 de chimie du bois du Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval (*Stevanovic, 2004*). Avant de commencer le processus de la détermination du taux de cellulose, de pentosane et de lignine, les particules d'écorces sont débarrassées de leurs extractibles par des suites d'extractions qualitatives suivant les méthodes décrites dans les normes ASTM – D1107 et ASTM-D1109. L'extraction avec le mélange éthanol-toluène permet de retirer différentes composantes chimiques telles que les cires, les terpènes et une partie des tannins. L'extraction à l'eau chaude permet d'enlever une partie des tannins et les sucres. L'extraction à la soude 1% enlève les composés phénoliques. Une extraction quantitative est faite parallèlement sur les particules d'écorce afin de déterminer le pourcentage d'extractible obtenu par la série d'extraction à l'éthanol-toluène, à l'eau chaude et à la soude 1%.

3.2.3.1 Procédure de détermination du taux de lignine

Cette procédure commence par le pesage précis de 225 à 250 mg d'écorces extraites dans une éprouvette. Pour chaque type d'écorce, trois pesées sont faites. Puis 3 ml d'acide sulfurique 72% sont pipetés et versés dans chaque éprouvette. Les éprouvettes sont placées dans un bain à température contrôlée de 30° C pour une durée d'une heure. Par la suite, le

contenu de chaque éprouvette est transféré dans un erlenmeyer de 500 ml en utilisant 84 ml d'eau déminéralisée. Les erlenmeyers sont recouverts et placés à l'autoclave. Les échantillons y restent pendant une heure à la température de 125° C afin de compléter l'hydrolyse. Le temps de dépressurisation est de 30 minutes afin d'éviter le déversement soudain de la solution. Ils sont par la suite sortis et refroidis. La lignine est filtrée sur un creuset F et le premier filtrat est conservé. La lignine est lavée à l'eau déminéralisée jusqu'à l'obtention d'un pH neutre qui est testé avec un papier pH (pHydron 1 à 12). La lignine est séchée à l'étuve à 103° C jusqu'à constance de la masse. Le pourcentage de la lignine non soluble à l'acide sulfurique est calculé par la formule suivante : Lignine % = (masse de la lignine/masse anhydre des particules)*100.

En ce qui concerne la lignine soluble à l'acide sulfurique elle est déterminée comme suit : 1 ml de filtrat est introduit à la pipette dans une éprouvette de 16 ×150 mm dans lequel 15 ml d'acide sulfurique 3% sont ajoutés. C'est la méthode normalement utilisée pour les feuillus parce que la solution obtenue avec les particules d'écorces est plus colorée, preuve qu'il y a eu plus de lignine passée en solution. C'est la raison pour laquelle cette solution a été plus diluée. L'absorbance de la solution est mesurée à 205nm. La solution de référence est le H₂SO₄ à 3%. La formule suivante permet de déterminer la concentration de la lignine dans le cas d'un filtrat dilué comme le notre :

Lignine (g/l) = (A/110)*D où $D = V_{\text{final}}/V_{\text{initial}}$ soit 16ml/1ml = 16 dans notre cas, A est l'absorbance, [lignine (g/l)] est la concentration de la lignine. En tenant compte du volume du filtrat et de la masse sèche des particules, nous avons: **L a s** = $(C.V.100)/1000M_0((100/(100-e))$ où L a s est la concentration de la lignine soluble à l'acide sulfurique dans les particules sèches non-extraites en %, C est la concentration de la lignine dans le filtrat en g/l, V est le volume total du filtrat (87 ml dans notre cas), M₀ est la masse anhydre des particules extraites, e est le pourcentage d'extraits contenus dans la sciure.

3.2.3.2 Procédure de détermination du taux de cellulose

Les particules d'écorces sont soumises à l'attaque d'un mélange d'acide nitrique et d'éthanol. La lignine est transformée en produits nitrés, solubles dans l'éthanol. Les

hémicelluloses sont en grande partie hydrolysées, dégradées et passent en solution. La cellulose subit également une dégradation, mais moins importante, l'éthanol jouant un rôle de protecteur vis-à-vis de cette dernière. La cellulose obtenue est impure et dégradée, mais la méthode est rapide et conduit à un indice de même ordre de grandeur que la cellulose de Cross et Bévan ou Sieber et Walter (attaque par Cl_2). Des particules précédemment extraites, environ 1g de chaque type est pesé avec précision dans une erlenmeyer de 250 ml. (Méthode appliquée pour les feuillus). Dans un bécher de 100 ml sont versés 15 ml de HNO_3 en même temps que 60 ml d'éthanol, mesurés préalablement dans des éprouvettes graduées. Le mélange est rapidement versé dans le ballon contenant les particules d'écorces. Le ballon est déposé dans un bain-marie avec réfrigérant à reflux. Le mélange est porté à ébullition sous la hotte. Après une heure d'ébullition, le ballon est sorti du bain et le liquide surnageant est décanté au dessus du creuset « c ». Dans un ballon sont introduits 50 ml d'un mélange frais d'éthanol et d'acide nitrique dans les proportions 40-10 qui est une seconde fois porté à ébullition dans le bain marie pendant une heure. L'opération est répétée une troisième fois. À la fin la totalité des particules restant dans le ballon est versée dans le creuset avant d'être filtrée et soigneusement lavée sous vide à l'eau chaude. Environ un litre d'eau chaude est utilisé pour laver les particules de chaque creuset. Les creusets et leur contenu sont enfin portés à l'étuve à la température de 103°C pendant 24 heures avant d'être pesés pour la détermination du taux de la cellulose dans les particules d'écorces sèches. Trois mesures sont faites pour chaque type d'écorce.

3.2.3.3 Procédure de détermination du taux de pentosanes

Environ 1,2 g de particules d'écorce externe et 0,3 g de celle d'écorce interne estimées suffisantes à la formation de 50 à 70 mg de furfural sont pesées avec précision (à 0,1 mg près), dans le ballon de 250 ml. Suivant les espèces, ceci correspond à environ 300 à 500 mg de sciure pour une essence de bois feuillus et de 700 à 1000 mg pour une essence de bois résineux. Dans le cas spécifique des particules d'écorces de bouleau cela correspondrait environ à 500 mg de particules d'écorces internes et à plus de 3000 mg de particules d'écorces externes. Quelques grains de pierre ponce sont introduits pour régulariser l'ébullition et 120 ml d'acide à 131 g/l. Le ballon est disposé sur le dispositif à pentosanes et 30 ml d'acide à 131 g/l sont également introduits dans la fiole à décanter, le

robinet de cette dernière étant resté fermé. Le contenu du ballon est porté à ébullition qui est réglée de manière à obtenir environ 30 ml de distillat (acide à 131 g/l + furfural) en 10 minutes (repère sur l'éprouvette qui recueille le distillat). À ce moment, le contenu de la fiole à décanter est introduit en ouvrant le robinet, quelques gouttes sont laissées au dessus du robinet afin d'éviter toute perte de furfural. On remet à nouveau 30 ml d'acide dans la fiole à décanter. La distillation est poursuivie jusqu'à l'obtention de 270 ml de distillat. À ce moment l'absence de furfural (test à la dinitrophénylhydrazine DNPH, qui est un test caractéristique des aldéhydes et des cétones) est vérifiée avec un tube à essai sur une petite fraction de distillat. Le contenu est transvasé de l'éprouvette graduée dans le bécher de 600 ml. Cette dernière est rincée avec une solution 2 N d'acide chlorhydrique. Un volume de 150 ml de la solution de DNPH préalablement filtré sur un creuset F est ajouté dans le bécher. Le contenu du bécher est agité en frottant les parois avec un agitateur avant d'être laissé au repos pendant au moins 18 heures. L'hydrazone cristallise et se dépose au fond du bécher. Le creuset F préalablement taré est disposé sur la fiole à vide et le contenu du bécher est passé avec le minimum de vide possible. Le précipité est lavé avec 50 ml de solution 2 N d'acide chlorhydrique (dissolution de l'excès de DNPH), puis lavé à l'eau jusqu'à la disparition des ions Cl⁻ (test négatif à AgNO₃). Durant le lavage, le précipité n'est pas amené à sec pour éviter les risques de fendillement qui amoindrissent la qualité du lavage. Après séchage à l'étuve à 102° C pendant 24 heures, le creuset et son contenu sont pesés et le taux de pentosanes par rapport aux particules d'écorces sèches est déterminé. Le poids de furfural est donné par la formule : **masse de furfural = masse du précipité × 0,348**. Pour passer aux taux de pentosanes un rendement moyen de 80,5% pour le furfural est utilisé (un rendement de 88,4% pour le xylanes et 74,3% pour les arabanes sont utilisés) d'où **la masse de pentosanes = masse de furfural × 1,71**.

3.2.3.4 Résultats

Tableau 3. 3 Taux de cellulose, de pentosanes et de lignine dans les écorces de bouleau blanc

	Cellulose (%)	Pentosanes (%)	Lignine (%)
Écorces externes	5	1,8	20
Écorces internes	25	16,7	20

3.2.4 Mesure de pH et du pouvoir tampon

L'acidité (pH et pouvoir tampon) des particules est une propriété à investiguer avant leur utilisation dans la fabrication de panneaux parce que la réticulation de la colle urée formaldéhyde utilisée pour leur encollage dépend du pH. Dans cette étude, l'acidité des particules d'écorce et des particules de bois utilisées comme renfort aux écorces dans la fabrication de panneaux a été mesurée.

3.2.4.1 Provenance des particules et objectif des tests

Les écorces de bouleau blanc provenaient de la scierie Thomas Louis Tremblay Inc. de Ste-Monique au Québec, Canada, les particules de bois de Tafisa localisé au Lac Mégantic au Québec, les fibres de l'épinette noire de l'usine de MDF de la Ville de La-Baie, Québec, les lamelles de bois de bouleau blanc et du peuplier faux-tremble de l'usine des panneaux à lamelles orientées (PLO) de Louisiana-Pacific Canada, division Québec à Chambord. La mesure de l'acidité de toutes ces particules utilisées avait pour objectif de déterminer à l'aide d'une analyse statistique les différences significatives parmi les valeurs de pH et du pouvoir tampon afin de pouvoir ajuster le pH de la colle UF et la température des plateaux lors de l'encollage et du pressage des panneaux constitués de mélanges de ces particules. Les particules destinées aux tests ont été préparées comme décrit à la section 3.2.1.

3.2.4.2 Dispositif expérimental

La planification de l'expérience a été faite dans un plan en blocs complets afin de prévenir les variabilités d'un facteur de nuisance connu et contrôlable (*Montgomery, 2005*). L'unité

expérimentale est un spécimen recevant un traitement, qui dans ce cas est la procédure de la mesure de pH. Chaque bloc a sept unités expérimentales qui sont répétées quatre fois pour donner un total de quatre blocs et vingt-huit unités expérimentales. La décomposition de la source de variation se trouve au Tableau 4.2 du chapitre 4. Une randomisation des traitements a été faite pour établir le plan d'expérience afin d'éviter les facteurs de nuisance connus mais incontrôlables et pour avoir une analyse de variance valide (*Montgomery, 2005*). Dans le cas de ce travail, la randomisation a été faite en utilisant la procédure PLAN du logiciel SAS pour générer les chiffres au hasard dans chaque bloc comme illustré au Tableau 4.3 du chapitre 4

3.2.4.3 Mesure de pH et du pouvoir tampon

L'extrait aqueux est préparé en ajoutant 25 g anhydres de chaque type de particule dans 250 ml d'eau déminéralisée au reflux pendant 20 minutes. Le mélange est filtré à l'aide du papier filtre (Whatman #1) sous vide. L'extrait est refroidi à la température ambiante. Puis le pH-mètre est calibré en utilisant une solution normalisée au pH 4 et 7. Par la suite 50 ml de solution d'extrait sont ensuite introduits dans un bécher de 100 ml à l'aide d'une pipette. L'agitateur magnétique placé au fond du bécher est mis en marche et le pH initial de la solution est enregistré. Enfin la solution est titrée au pH 3 avec la solution nominale d'acide sulfurique 0,025N pour la mesure du pouvoir tampon basique ou au pH 7 avec la solution nominale de soude 0,025N pour la mesure du pouvoir tampon acide. Quatre répétitions sont faites pour chaque mesure.

3.2.4.4 Choix des contrastes pour l'analyse de variance (ANOVA)

Il y a sept traitements correspondant aux sept spécimens (les codes d'identification des spécimens sont présentés au Tableau 4.1) du chapitre 4, ce qui donne lieu à six degrés de liberté. Donc six contrastes possibles peuvent être choisis. D'après l'objectif pour cette partie d'étude, les contrastes suivants sont choisis :

1. (A, B) versus C, D, E, F, G : le pH et le pouvoir tampon des particules d'écorce sont comparés à ceux des particules et fibres de bois utilisées;
2. A versus B : le pH et le pouvoir tampon des particules d'écorce interne sont comparés à ceux des particules d'écorce externe;

3. F versus G;
4. C versus D;
5. D versus E;
6. C versus E.

3.2.4.5 Résultats

Les résultats de l'ANOVA du Tableau 4.4 du chapitre 4 ont donné une valeur de F non significative pour le bloc, ce qui signifie que le facteur de nuisance n'a pas eu d'impact. L'ANOVA montre aussi par l'intermédiaire de la valeur de F qui est hautement significative, qu'il y a une différence entre les sept spécimens utilisés en ce qui concerne leurs mesures de pH et des pouvoirs tampons acide et basique. Les résultats des contrastes choisis montrent que les écorces de bouleau blanc sont totalement différents des autres particules et que la partie externe de cette écorce est différente de sa partie interne lorsque les mesures susmentionnées sont considérées. Une autre comparaison importante concerne F (particules fines mixtes de bois destinées aux couches couvrantes des panneaux) et G (particules mixtes grossières de bois destinées à la couche médiane des panneaux) qui ne montre aucune différence significative, ce qui permet de dire que la granulométrie de ces particules n'affecte pas leur acidité. Le Tableau 4.5 du chapitre 4 montre que les pouvoirs tampons acide et basique des particules d'écorce sont dans leur grande majorité plus élevés que ceux du bois alors que leurs valeurs de pH sont plus faibles que ceux des différentes particules de bois en présence. Le pH des fibres de l'épinette noire est le plus bas parce que le processus de production de ces fibres se fait à température élevée et les acides volatils comme l'acide acétique et l'acide formique se libèrent, ce qui contribue à l'abaissement du pH des fibres (*Schneider, 1999*).

3.2.4.5 Discussion

La différence significative entre les particules d'écorce de bouleau blanc et les particules de bois (en ce qui concerne leur pH et leur pouvoir tampon) utilisées dans la fabrication de panneaux mixtes nous a permis de comprendre pourquoi il y a eu pré-cuisson de la résine UF à la surface des panneaux où les particules d'écorce externe de bouleau blanc sont utilisées. La raison est que ces particules ont un pH inférieur à celui du bois, ce qui favorise

la polymérisation plus rapide de la colle. Il était donc nécessaire d'abaisser la température des plateaux pour éviter ce problème. Puisque le pH de l'écorce interne est plus faible que celui du bois, ce serait un avantage de les utiliser dans la couche centrale des panneaux mixtes avec les particules de bois plutôt à la surface comme renfort parce que la polymérisation de l'UF est plus rapide quand le pH des particules est bas (*Maloney, 1993*). Les valeurs élevées de cohésion interne obtenues pour les panneaux ayant les particules d'écorce interne dans la couche médiane justifient la polymérisation complète de la résine UF. La grande valeur du pouvoir tampon acide des particules d'écorce n'est pas du tout un avantage lorsque l'utilisation d'un catalyseur acide est requise pour réduire le pH parce que d'après *Maloney (1993)* une grande quantité de ce catalyseur sera utilisée.

Le pouvoir tampon acide absolu est défini comme étant la différence entre le pouvoir tampon acide et le pouvoir tampon basique alors que le pouvoir tampon relatif est le ratio du pouvoir tampon acide sur le pouvoir tampon basique.

Les valeurs de F de la régression pH versus pouvoir tampon acide et pH versus pouvoir tampon basique ne sont pas significatives (Tableau 4.6) du chapitre 4 donc il n'y a pas de relation linéaire entre le pH et le pouvoir tampon acide ou basique. Mais les Figures 4.1 et 4.2 du chapitre 4 montrent l'existence d'une relation linéaire entre le pH et le pouvoir tampon acide absolu d'une part et entre le pH et le pouvoir tampon relatif d'autre part. Cette relation linéaire se confirme par la valeur de F associée à la régression du Tableau 4.6 qui est significative dans le cas du pouvoir tampon acide absolu et hautement significative dans le cas du pouvoir tampon relatif. Le même résultat fut trouvé par *Xing et al. (2004)*.

On peut critiquer cette méthode en remarquant que ce que l'on mesure est le pH des extractibles (solubles dans l'eau) du bois et de l'écorce, et non le pH réel des écorces.

3.2.4.6 Conclusion

Cette étude a permis, par l'entremise de l'ANOVA, de trouver les différences significatives entre l'acidité des particules d'écorce de bouleau blanc et celle des particules de bois utilisées dans la fabrication de panneaux mixtes à trois couches. Il est donc nécessaire d'ajuster certains paramètres de pressage comme la température des plateaux qui doit être réduite lorsque les particules d'écorce externe de bouleau sont utilisées à la surface des panneaux. Cette différence significative de pH entre les particules a permis de comprendre

que pour la fabrication de panneaux mixtes, il faut utiliser un seul type de particule par couche. Par exemple l'écorce externe a été séparée de l'écorce interne et utilisée dans les couches de surface des panneaux avec les particules de bois dans le centre alors que l'écorce interne a été utilisée dans la couche médiane des panneaux avec les fibres de bois dans les couches couvrantes. Cette étude a aussi confirmé l'existence d'une relation linéaire entre le pH et le pouvoir tampon acide absolu d'une part, et entre le pH et le pouvoir tampon relatif d'autre part.

3.2.5 Extraction quantitative des extractibles d'écorce

Afin de déterminer le type d'extraction le plus efficace éliminant le plus d'extractibles des écorces, trois types d'extraction ont été faits :

1. L'extraction à l'eau chaude (reflux trois heures);
2. L'extraction au méthanol (reflux trois heures);
3. L'extraction au méthanol à la température de la pièce (trois heures).

Étant donné que les extractions se font sur les écorces internes et externes, il y a donc présence de deux facteurs qui sont la méthode d'extraction et le type d'écorce. Une analyse factorielle des données obtenues permettra de choisir le type d'extraction le plus efficace et le moins coûteux. Cette analyse sera faite dans un plan en blocs complets. Le nombre de répétition des unités expérimentales est de quatre.

3.2.5.1 Identification des traitements

Tableau 3. 4 Code d'identification des traitements

#	Code	Description
1	A	Écorces externes extraites à l'eau chaude, méthode de reflux 3 heures
2	B	Écorces externes extraites au méthanol, méthode de reflux 3 heures
3	C	Écorces externes extraites au méthanol : méthode d'agitateur 3 heures à la température de la pièce
4	D	Écorces internes extraites à l'eau chaude, méthode de reflux 3 heures
5	E	Écorces internes extraites au méthanol, méthode de reflux 3 heures
6	F	Écorces internes extraites au méthanol : méthode d'agitateur 3 heures à la température de la pièce

3.2.5.2 Description des contrastes

Nous avons une expérience factorielle de type 2×3 . Le premier facteur est le type d'écorce (qui a deux niveaux) : l'écorce externe (E_1) et l'écorce interne (E_2). Le second facteur est la méthode d'extraction identifiée ici par le type de solvant utilisé, et a trois niveaux qui sont : l'extraction à l'eau chaude trois heures méthode reflux (S_1), l'extraction au méthanol trois heures méthode de reflux (S_2) et l'extraction au méthanol trois heures méthode d'agitateur à la température de la pièce (S_3).

Il y a six traitements, soit cinq contrastes possibles qui sont :

- I. Particules d'écorce externe comparées à celle d'écorce interne (E_1 Vs E_2);
- II. La méthode d'extraction à l'eau chaude comparée aux deux méthodes d'extraction au méthanol S_1 Vs (S_2 S_3);
- III. La méthode d'extraction au méthanol reflux trois heures comparée à la méthode d'extraction au méthanol par agitation à la température de la pièce S_2 Vs S_3 ;
- IV. L'interaction type d'écorce \times type de tous les solvants utilisés pour l'extraction;
- V. L'interaction type d'écorce \times type de solvant méthanol (méthanol chaud ou froid).

Ces contrastes ont permis l'établissement du tableau de signes des coefficients nécessaire à la programmation dans le logiciel SAS.

3.2.5.3 Plan d'expérience

La randomisation est utilisée pour dresser le plan d'expérience. La randomisation permet chaque unité expérimentale (qui est le type d'écorce et la méthode d'extraction qui lui est associée) de recevoir au hasard un traitement (qui est le processus d'extraction). Les unités expérimentales sont numérotées de 1 à 6 et la procédure « plan » de SAS les a générées de manière aléatoire dans chaque bloc comme l'indique le **Tableau 3.5**.

Tableau 3. 5 Plan d'expérience utilisé

#blocs	Unités expérimentales					
1	6 = F	2 = B	4 = D	1 = A	3 = C	5 = E
2	5 = E	6 = F	1 = A	4 = D	3 = C	2 = B
3	3 = C	6 = F	5 = E	2 = B	1 = A	4 = D
4	6 = F	3 = C	5 = E	1 = A	4 = D	2 = B

3.2.5.4 Décomposition de la source de variation

Tableau 3. 6 Décomposition de la source de variation

Source de variation (SV)		Degrés de liberté (dl)	
Bloc			3
Traitement	Type d'écorce (Écorce)	1	5
	Type d'extraction (Solvant)	2	
	(Écorce) × (solvant)	2	
Erreur expérimentale			15
Total			23

3.2.5.5 Réalisation de l'expérience

Deux grammes anhydres de particules obtenues de la préparation décrite à la section 3.2.1 sont pesées dans un ballon de 250 ml dans lequel on ajoute 100 ml d'eau déminéralisée. Le ballon est porté au reflux pendant trois heures. Les particules sont ensuite filtrées dans un creuset et lessivées à l'eau chaude afin d'éliminer tous les produits extraits à l'eau chaude. Elles sont enfin placées à l'étuve pendant 24 heures pour la détermination de leur masse anhydre. La différence entre la masse anhydre de l'écorce non extraite et sa masse anhydre extraite donne la masse des extractibles à l'eau chaude. Quatre répétitions sont faites pour chaque type de particule d'écorce. L'extraction au méthanol par la méthode de reflux est faite de la même manière que celle à l'eau chaude. Le second type d'extraction au méthanol s'est fait à la température de la pièce où 2 g de particules d'écorce sont mis dans un erlenmeyer au long de 250 ml, on y ajoute 100 ml de méthanol et l'ensemble est déposé sur un agitateur de 200 tours par minute. Après trois heures d'extraction, les particules sont filtrées et placées à l'étuve pour la détermination de leur masse anhydre.

3.2.5.6 Résultat de l'analyse de variance

Tableau 3. 7 Tableau d'ANOVA

Source de variation (SV)	Degré de liberté (dl)	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur de F	Pr>F
Modèle	8	1511,752	188,969	2556,87**	<0,0001
Bloc	3	0,178	0,0594	0,80 ns	0,510
E	1	177,942	177,942	2407,68**	<0,0001
S	2	1023,947	511,974	6927,33**	<0,0001
E×S	2	309,684	154,842	2095,11**	<0,0001
Erreur	15	1,108	0,0739		
Total corrigé	23	1512,860			

E = type de particules d'écorce, S = type de solvant, ns = non significatif, * significatif à 95 %, **hautement significatif (à 99 %)

La variable dépendante mesurée est le pourcentage d'extractible obtenu. Le tableau d'ANOVA (Tableau 3.7) donne une valeur de F du modèle (traitement et bloc) hautement significative, ce qui veut dire qu'il y a bien une différence qui existe quelque part entre les traitements. Ce sont les contrastes qui permettront de voir à quel niveau se situent ces différences. La valeur de F liée au blocage n'est pas significatif, ce qui veut dire qu'il n'y a pas eu influence du blocage. L'analyse des données de l'expérience pouvait donc aussi se faire dans un plan entièrement aléatoire. Les résultats des contrastes sont présentés dans le Tableau 3.8

3.2.5.7 Résultat des contrastes et discussion

Tableau 3.8 Sommaire des contrastes

Contrastes	Degré de liberté (dl)	Somme des carrés	Moyenne des carrés	Valeur de F	Pr>F
Écorce	1	177,942	177,942	2407,68**	<0,0001
Tous les solvants	1	1014,024	1014,024	13720,4**	<0,0001
Solvant-méthanol	1	9,922	9,922	134,26**	<0,0001
Écorce × tous les solvants	1	309,572	309,572	4188,75**	<0,0001
Écorces × solvant-méthanol	1	0,109	0,109	1,47ns	0,2

ns = non significatif, * significatif à 95 %, **hautement significatif (à 99 %)

Seule l'interaction type d'écorce par méthode d'extraction incluant tous les solvants est hautement significative et fera objet d'une interprétation.

Afin de mieux interpréter l'interaction hautement significative (écorce * tous les solvants), des histogrammes d'interaction (Figure 3.1) ont été construits. De ces histogrammes, il ressort que le pourcentage d'extractible obtenu par la méthode à l'eau chaude est plus élevé dans les particules d'écorce interne que dans celles d'écorce externe alors que l'inverse se produit lorsque le méthanol est utilisé. Le méthanol utilisé par la méthode de reflux ou à la température de la pièce enlève globalement plus d'extractibles des écorces que l'eau

chaude. L'erreur type liée aux interactions est calculées par la formule : $E.T. = \sqrt{\frac{2C.M.E}{r}}$

où C.M.E est le carré moyen de l'erreur et r le nombre de répétitions, (Collin, 2003). $r = 4$ et $C.M.E = 0,0739$. Donc l'erreur type vaut 0,192. La grandeur de deux erreurs types est représentée sur les histogrammes d'interaction par les barres d'erreur. Si en rapprochant ces barres d'erreur elles se recouvrent partiellement, cela signifie que l'interaction est non significative.

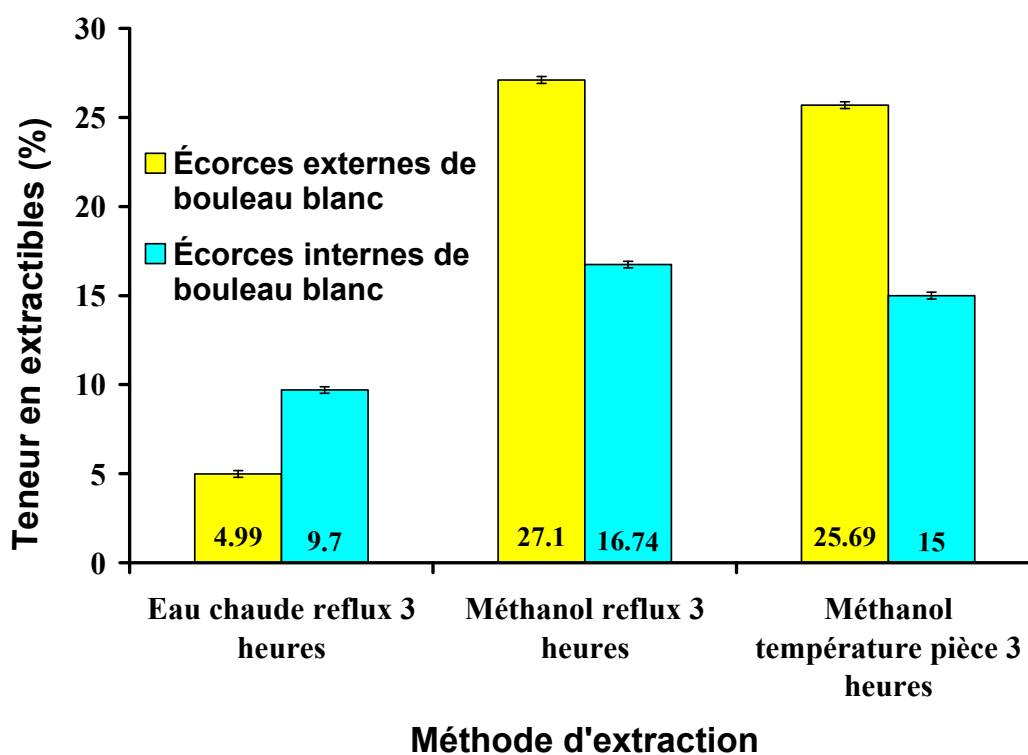


Figure 3.1 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et la méthode d'extraction pour la teneur en extractibles

3.2.5.8 Conclusion

Le méthanol enlève plus d'extractibles de l'écorce que l'eau chaude. C'est donc le solvant qu'il faut choisir pour extraire les extractibles d'écorce externe et interne. Quant à la méthode d'extraction à utiliser, les résultats des contrastes montrent que l'interaction [écorce * (solvant méthanol)] est non significative, ceci amène à choisir la méthode d'extraction au méthanol à la température de la pièce comme mode d'extraction parce qu'en plus d'avoir le même rendement que l'extraction au méthanol au reflux, elle est peu coûteuse (peu d'énergie utilisée, matériel d'extraction peu complexe) et moins polluante (pas de dégagement de vapeur).

3.2.6 Effet de l'extraction qualitative à l'eau chaude des particules d'écorce sur leur acidité

L'extraction qualitative est la méthode utilisée pour extraire les grandes quantités des particules d'écorce destinées à la fabrication de panneaux. Cette méthode a été utilisée lors de la phase d'essais pour extraire à l'eau chaude les particules d'écorce en utilisant le ratio 100 ml d'eau pour deux grammes de particules. D'un point de vue chimique, l'objet de cette extraction consistait à déterminer son effet sur l'acidité des particules d'écorce. Dans cette expérience, deux types de particules d'écorce (écorce interne et écorce externe de bouleau blanc) ainsi que deux types de traitement (écorces non extraites et écorces extraites à l'eau chaude) sont utilisés, ce qui a amené à planifier l'expérience dans un plan factoriel.

3.2.6.1 Dispositif experimental

Nous sommes en présence d'une expérience factorielle avec deux facteurs qualitatifs. Le premier facteur est le type d'écorce avec deux niveaux qui sont : l'écorce externe et l'écorce interne. Le second facteur est le type de traitement avec deux niveaux qui sont : les écorces non extraites et les écorces extraites à l'eau chaude. Cinq répétitions ont été faites pour chaque unité expérimentale dans la mesure de l'acidité; ce qui a engendré un total de $2 \times 2 \times 5 = 20$ mesures. L'unité expérimentale est définie par l'association : type de particules d'écorce – extraites ou non. La variable dépendante mesurée est l'acidité (pH et pouvoir tampon acide et pouvoir tampon basique).

3.2.6.2 Identification des traitements

Tableau 3. 9 Code d'identification des traitements

#	Description des traitements	Code
1	Écorce interne non extraite	A
2	Écorce externe non extraite	B
3	Écorce interne extraite	C
4	Écorce externe extraite	D

3.2.6.3 Plan d'expérience

Afin de respecter le premier principe de Fisher qui est la randomisation des unités expérimentales, le plan d'expérience a été dressé à l'aide de la procédure plan de SAS.

Tableau 3. 10 Randomisation des unités expérimentales

# bloc	Traitements			
1	3 = C	1 = A	4 = D	2 = B
2	2 = B	1 = A	3 = C	4 = D
3	2 = B	3 = C	4 = D	1 = A
4	4 = D	2 = B	3 = C	1 = A
5	2 = B	1 = A	4 = D	3 = C

3.2.6.4 Décomposition de la source de variation

Tableau 3. 11 Décomposition de la source de variation

Source of variation	Degré de liberté
Bloc	4
Traitement	3
Écorces	1
Extraction	1
Écorces × extraction	1
Erreur	12
Total	19

3.2.6.5 Résumé du tableau d'ANOVA et des contrastes

Tableau 3. 12 Tableau d'ANOVA et contrastes

Variables dépendantes mesurées	Source de variation	Degré de liberté	Valeur de F	Pr>F
pH	Modèle	7	58.48**	<.0001
	❖ Bloc	4	1.72 ns	0.2098
	❖ Écorce	1	0.02 ns	0.8935
	❖ Extraction	1	375.65 **	<.0001
	❖ Écorce × Extract	1	12.82**	0.0038
Pouvoir tampon acide	Modèle	7	970.96**	<.0001
	❖ Bloc	4	2.69 ns	0.0826
	❖ Écorce	1	94.38**	<.0001
	❖ extraction	1	6559.74**	<.0001
	❖ Écorce × Extract	1	93.87**	<.0001
Pouvoir tampon basique	Modèle	7	52.54**	<.0001
	❖ Bloc	4	3.51*	0.0405
	❖ Écorce	1	133.62**	<.0001
	❖ Extraction	1	18.43**	0.0010
	❖ Écorce × Extract	1	201.68**	<.0001

* = F significatif à 0,05 niveau de probabilité; **= F est hautement significatif ou significatif à 0,01 niveau de probabilité; ns = non significatif. Le modèle se décompose en bloc, écorce, extraction et écorce × extraction.

3.2.6.6 Discussion

Les valeurs de F liées aux modèles en ce qui concerne la mesure du pH, du pouvoir tampon acide et du pouvoir tampon basique sont tous très significatifs, ce qui signifie qu'il existe une différence quelque part entre les facteurs étudiés.

- L'analyse des contrastes pour la variable dépendante (pH) montre que la valeur de F liée à l'interaction particule*extraction est hautement significative et que dans cette interaction seul l'effet « extraction » est hautement significatif. Les résultats de cette interaction sont présentés dans la Figure 3.2. L'erreur type liée aux interactions est calculées par la formule : $E.T. = \sqrt{\frac{2C.M.E}{r}}$ où C.M.E est le carré moyen de l'erreur et r le nombre de répétitions. Comme $r = 5$ et $C.M.E = 0,00669$, alors l'erreur type vaut 0,052.

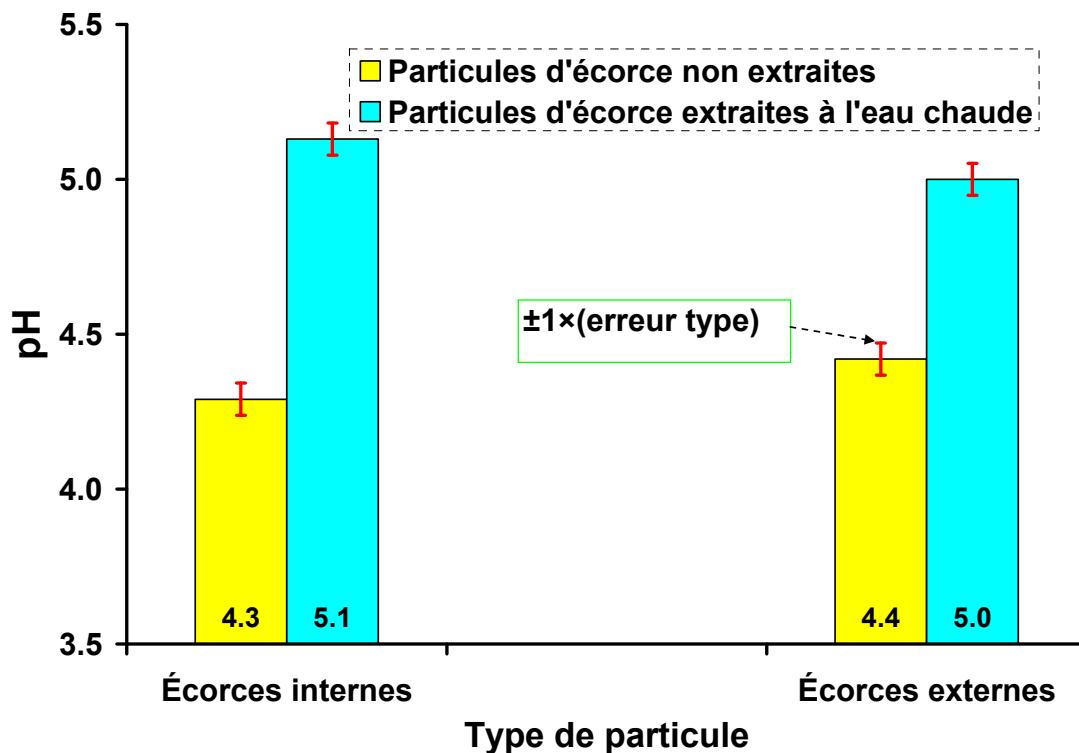


Figure 3.2 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pH

- La valeur de F liée à l'interaction particule*extraction est hautement significative en ce qui concerne la mesure du pouvoir tampon acide. Dans cette interaction, les effets de « type de particules » et de « l'extraction » sont tous deux hautement significatifs. Les résultats de cette interaction sont présentés à la Figure 3.3.

L'erreur type liée aux interactions est calculée par la formule : $E.T. = \sqrt{\frac{2C.M.E}{r}}$ où

C.M.E est le carré moyen de l'erreur et r le nombre de répétition. Comme $r = 5$ et $C.M.E = 0,00704$, alors l'erreur type vaut 0,053

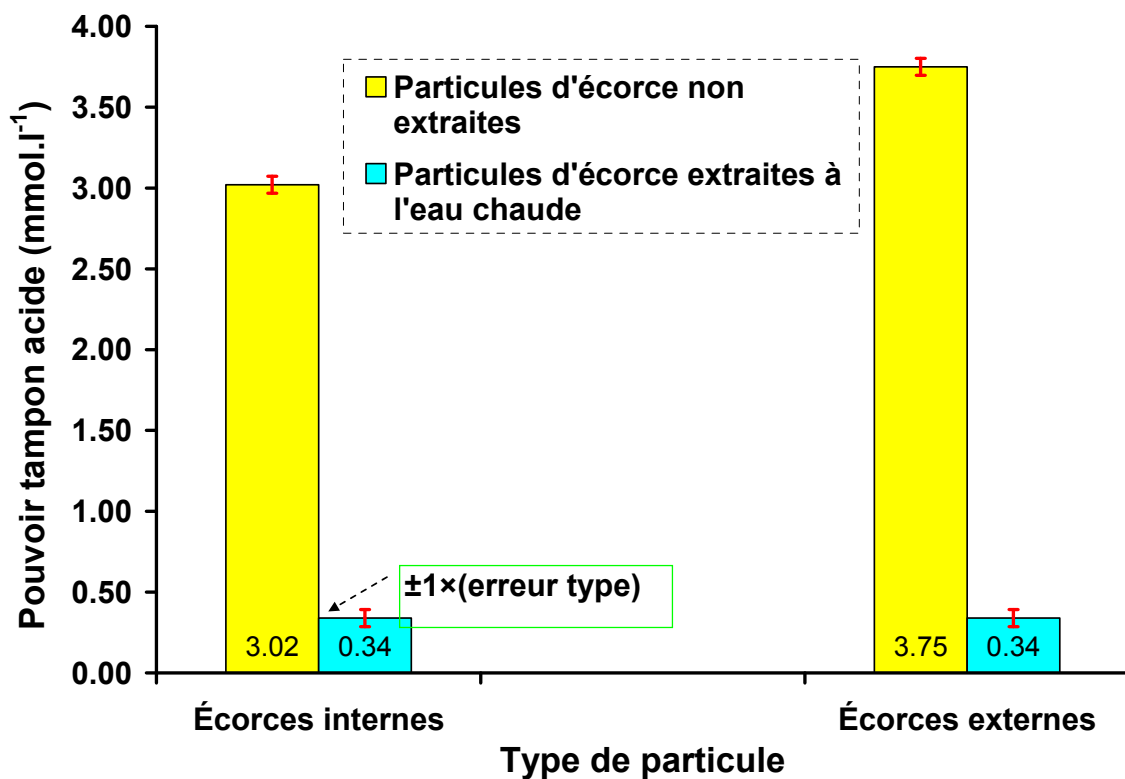


Figure 3. 3 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pouvoir tampon acide

- La valeur de F liée à l'interaction (particule × extraction) est hautement significative en ce qui concerne la mesure du pouvoir tampon basique. Dans cette interaction les effets du type de particules et de l'extraction sont tous deux hautement significatifs. Les résultats de cette interaction sont présentés à la Figure 3.4. L'erreur type liée

aux interactions est calculée par la formule : $E.T. = \sqrt{\frac{2C.M.E}{r}}$ où C.M.E est le carré moyen de l'erreur et r le nombre de répétitions. Comme $r = 5$ et $C.M.E = 0,005547$. Alors l'erreur type vaut 0,047.

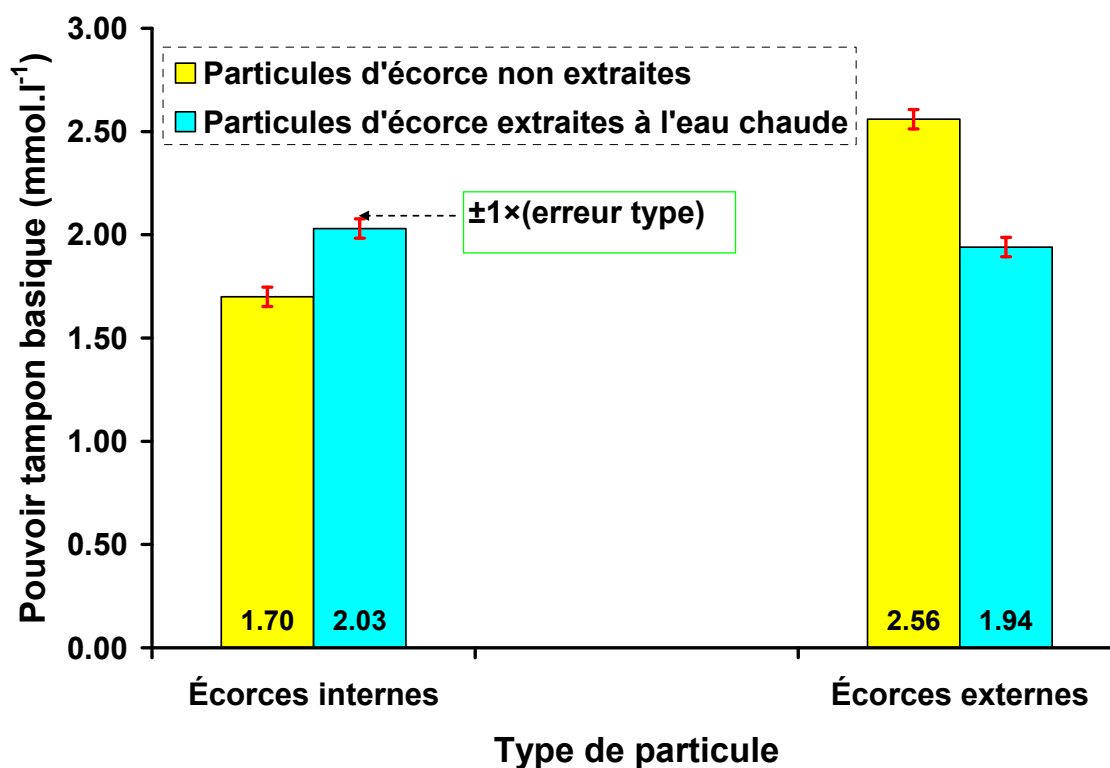


Figure 3. 4 Histogrammes d'interaction entre les types de particules d'écorce de bouleau blanc et l'extraction pour la variable pouvoir tampon basique

3.2.6.7 Conclusion

L'extraction à l'eau chaude augmente de manière significative le pH des particules d'écorce interne et externe de bouleau blanc. Elle diminue de manière hautement significative le pouvoir tampon acide des deux types d'écorce. En ce qui concerne le pouvoir tampon basique, l'extraction à l'eau chaude l'augmente de façon hautement significative dans les cas des particules d'écorce interne alors qu'elle le diminue de manière hautement significative dans le cas des particules d'écorce externe.

CHAPITRE 4: MEASUREMENT OF WOOD AND BARK PARTICLES ACIDITY AND THEIR IMPACT ON THE CURING OF UREA FORMALDEHYDE RESIN DURING THE HOT PRESSING OF MIXED PANELS

Abstract

In the manufacture of panels, pH value is an important property, especially when a pH-dependent resin like urea-formaldehyde (UF) is used. It has been proven that UF cures very well and faster in an acid environment. In this study the acidity (pH value and buffering capacity) of White birch inner and outer bark particles as well as that of wood particles or fibres used as reinforcement for the manufacture of 3-layer wood-bark particleboards was measured. The results show a significant difference between the acidity of white birch bark and wood of different species. Barks have a lower pH as well as higher acid buffering capacity. It was also found out that the pH value of inner white birch bark is lower than that of the outer part. The significant differences obtained led to the conclusion that, inner bark should be separated from outer bark and used separately in mixed panels manufacture. The platens temperature should be reduced when the outer bark is used in the surface of mixed panels to avoid UF resin pre-cure or over-cure. This study confirms the linear relationship between the pH and the absolute and relative buffering capacities.

4.1 Introduction

At Université Laval in Québec, there is an ongoing project to add value to white birch barks in the panels manufacture. It is the first time that this raw material, with properties different from those of wood, is used in the manufacture of panels. The preliminary tests showed that it is very difficult to manufacture panels made up exclusively of these barks, which fulfill the mechanical properties requirements of M-1 panel types for interior use. Thus, a new method was set up by reinforcing white birch bark particles with different wood particles and fibres to manufacture several types of mixed 3-layer panels which meet the requirements of the standard. Since urea formaldehyde (UF) is used to bind the particles it is therefore necessary to determine the pH and the buffering capacity of wood and bark

particles involved, because UF is a pH-dependent resin that cures in acid pH environment is acidic. The pH and the buffering capacity play an important role in the dimensional stability of panels (*Hsu, 1997*). The internal bond of panels like MDF bonded with UF resin can be affected by the acidity of fibres (*Park et al., 2001*). In previous studies *Xing et al. (2004)* show that pH and buffering capacity vary with the type of raw material. They didn't find a linear relationship between the pH value and both alkaline and acid buffering capacity, but they found a linear relationship between the pH value and both absolute and relative buffering capacity. The other important aspect of their work was the proof of a linear relationship between the pH value of species used and the gel time of UF resin which decreases as the pH value is decreasing. Earlier studies by *Johns and Niazi (1980)*, *Peng and Li (1983)* as well as *Guo et al. (1998)* revealed the similar results.

The measurement of the pH and buffering capacity of inner and outer barks of white birch and their impact on the curing of UF resin have not been studied in the past. Therefore the first objective of this study was to carry out these measurements and at the same time perform measurements for wood particles and fibres combined with white birch barks as reinforcement in panels manufacture. The second objective was to investigate with the help of statistical analysis the significant differences among the pH values and the buffering capacities respectively in order to adjust the pH value of UF resin, the curing time and the platens temperature to avoid problems of UF resin pre-cure or over-cure during the hot pressing process. The third objective was to check if there is also a linear relationship between the pH-value and the absolute and relative buffering capacities of raw materials used.

4.2 Materials and Methods

The method used for acidity measurement in the study is similar to that of *Johns and Niazi (1980)*.

4.2.1 Samples preparation

The barks of white birch (*Betula papyrifera*) were obtained from sawmill Thomas Louis Tremblay Inc. of Ste-Monique in Quebec, the mixed wood particles from Tafisa located in

Lac Mégantic in Quebec, the wood fibres of black spruce (*Picea mariana*) from MDF mill of the city La-Baie in Quebec, the wood particles of paper birch (*Betula papyrifera*) and poplar (*Populus tremuloides*) from OSB Mill of Louisiana-Pacific, Canada, division Québec à Chambord. The codes of the seven raw material types used for this study are presented in Table 4.1. These materials were taken from particles prepared for panels' fabrication. Each specimen was ground to pass a 0.425mm (40 mesh) using a milling machine (FRITSCH Pulverisette 19). Only particles with diameter lower than 0.425 mm and greater than or equal 0.250 mm were taken for this study. The particles were kept in plastic bags until they were used for testing.

4.2.2 Experimental design

The planning of the experiment was made in a complete block design (CBD) to prevent variability arising from a known and controllable nuisance factor (*Montgomery, 2005*). The experimental unit was each specimen receiving one treatment. Each block has seven experimental units which are replicated four times to give four blocks with a total of 28 experimental units. The decomposition of variation source is presented in Table 4.2. A randomization of treatments must be done to set up the experiment design in order to guard against known but uncontrollable nuisance factor and to get a valid analysis of variance (ANOVA) (*Montgomery, 2005*). The PLAN procedure of SAS software was used in this study to generate randomly the seven numbers in each block of experimental design as presented in Table 4.3.

Table 4.1 Type and code of raw material

#	Type of raw material	Code
1	Inner bark of white birch	A
2	Outer bark of white birch	B
3	Wood fibres of black spruce	C
4	Wood particles of poplar	D
5	Wood particles of white birch	E
6	Mixed coarse wood particles (spruce, pine, fir...) for panels surface layers	F
7	Mixed fine wood particles (spruce, pine, fir...) for panels core layer	G

Table 4.2 Decomposition of source of variation

Source of variation	Degrees of freedom
Block	3
Treatment	6
Error	18
Total	27

Table 4.3 Results of the Plan procedure of SAS for the experimental design

# block	Treatments						
1	4 = D	1 = A	2 = B	6 = F	7 = G	3 = C	5 = E
2	4 = D	3 = C	2 = B	5 = E	7 = G	6 = F	1 = A
3	4 = D	3 = C	5 = E	6 = F	1 = A	2 = B	7 = G
4	7 = G	3 = C	5 = E	2 = B	6 = F	1 = A	4 = D

4.2.3 Measurement of pH value and buffering capacity

4.2.3.1 Definitions

Buffering capacity can be defined in many ways. In the website of Chembuddy (*Anonymous, 2005*), acid buffering and alkaline buffering capacities are defined in the most reasonable way: acid buffering capacity is the quantity of strong base that must be added to change the pH of one litre of solution by one pH unit; alkaline buffering capacity is the quantity of strong acid that must be added to change the pH of one litre solution by one pH unit.

The absolute acid buffering capacity is defined as the difference between the acid buffering capacity and the alkaline buffering capacity, whereas relative buffering capacity is the ratio of acid buffering capacity to alkaline buffering capacity.

4.2.3.2 Preparation of aqueous extract

The aqueous extract was prepared by refluxing 25g of dry particles of each sample in 250 ml distilled water for 20 minutes. Then the mixture was filtered with the help of a filter paper (Whatman #1) using vacuum. The extract was cooled to room temperature. The pH meter was calibrated using standardized buffer solution to a pH of 4 and 7. After this calibration, 50 ml of extract solution was pipetted into a 100 ml beaker and kept stirred. The initial pH of the solution was recorded, and it was then titrated to a pH of 3 (for alkaline buffering capacity) or 7 (for acid buffering capacity) with nominal 0.025 N H₂SO₄ or 0.025 N NaOH solution. For each titration, four replicate measurements were done.

4.2.4 Selected contrasts for the analysis of variance (ANOVA)

There were seven treatments corresponding to seven specimens therefore six possible contrasts could be selected. According to the objectives of this study, the following contrasts were selected:

- (A, B) versus C, D, E, F, G : the pH value and the buffering capacity of bark particles are compared with those of wood particles and fibres;
- A versus B: the pH value and the buffering capacity of inner bark particles are compared with those of outer bark particles of white birch;

- F versus G;
- C versus D;
- D versus E;
- C versus E.

4.2.5 Results

The results of variance analysis (ANOVA) in Table 4.4 gave a non significant F value for blocking, which means that the known and controllable nuisance factor which was the day that the measurements took place in the case of this study doesn't impact statistical comparisons among treatments. The results of ANOVA also show very well that there is a highly significant difference among the seven specimens used in this study with regard to the measurements of the pH value, the acid and alkaline buffering capacities. The selected contrasts (simple comparison) also show that the inner and outer white birch barks are totally different from other raw material used in the study, and that the inner white birch bark is different from the outer part when the above mentioned measurements are taken into consideration. Another important point concerns the comparison F (mixed fine wood particles for panel surface layers) versus G (mixed coarse wood particles for panel core layer), which shows in Table 4.5, that there is no significant difference between them. This leads to the conclusion that, the particles size (coarse particles in the core and fine particles in the surface layers of reference panel) doesn't impact their pH and buffering capacity. The Table 4.5, shows that the pH values of inner and outer white birch barks are lower than those of wood particles and also that their acid buffering capacities are the highest: approximately two to three times higher than those of wood particles. The pH value of black spruce fibres is the lowest because their production is at higher temperature and the acetic and formic acids which are released contribute to the lowering of fibres pH value (*Schneider, 1999*).

Table 4.4 Results of ANOVA (F values) for pH, acid and alkaline buffering capacities

	F value for pH value	F value for acid buffering capacity	F value for alkaline buffering capacity
Source of Variation			
Blocks	1.49 ^{ns}	1.27 ^{ns}	1.49 ^{ns}
Treatments	202.38**	555.91**	95.11**
Contrasts			
AB versus CDEFG	319.43**	2834.35**	278.83**
A versus B	12.22**	114.94**	181.90**
F versus G	4.08 ^{ns}	2.87 ^{ns}	0.00 ^{ns}
C versus D	669.29**	299.84**	36.72**
D versus E	5.43*	28.93**	0.15ns
C versus E	554.13**	142.49**	32.13**

ns: not significant; * significant at 0.05 probability level; ** significant at 0.01 probability level.

Table 4.5 pH value, acid and alkaline buffering capacities, LSD results

Treatments	pH value		Acid buffering capacity		Alkaline buffering capacity	
	Means	LSD*	Means	LSD*	Means	LSD*
A	4.30 (0.06)	e	3.03 (0.12)	b	1.72 (0.08)	b
B	4.41 (0.06)	d	3.77 (0.14)	a	2.59 (0.14)	a
C	4.10 (0.00)	f	1.78 (0.07)	c	1.14 (0.08)	d
D	4.94 (0.03)	a	0.61 (0.02)	f	1.53 (0.01)	c
E	4.86 (0.04)	b	0.97 (0.02)	e	1.50 (0.07)	c
F	4.76 (0.04)	c	1.54 (0.03)	d	1.72 (0.05)	b
G	4.83 (0.03)	cb	1.43 (0.09)	d	1.72 (0.07)	b

* Least significant difference; standard deviation is in the brackets; means with the same letter are not significantly different

4.2.6 Discussion

4.2.6.1 Impact of pH and buffering capacity differences between white birch bark particles and wood particles on the mixed particleboards

The significant difference between pH value and buffering capacity of white birch bark particles and wood particles used in the manufacture of 3-layer mixed panels enabled to understand why there was UF resin pre-cure in the surface layers of panels to which outer birch bark particles were used. The reason was the lower pH value of these particles

compared with those of wood particles. Therefore, it would have been necessary to lower the platens temperature to avoid this UF pre-cure problem noticed. The pH value of white birch inner bark particles being significantly lower than those of wood particles, it is an advantage for UF resin curing in these particles during the hot pressing of particleboards, because the curing of UF resin is faster and its curing rate is higher in the particles with low pH value during the hot pressing of panels (*Maloney, 1993*). Thus, the high internal bond values for panels produced from 100 % white birch inner bark particles in the preliminary tests can partially be explained by the high curing rate of the UF resin. The high value of acid buffering capacity of both inner and white birch outer bark particles is not an advantage when an acid catalyst is required to reduce the pH to an optimum level, because, according to *Maloney (1993)*, a great quantity of that catalyst will be required.

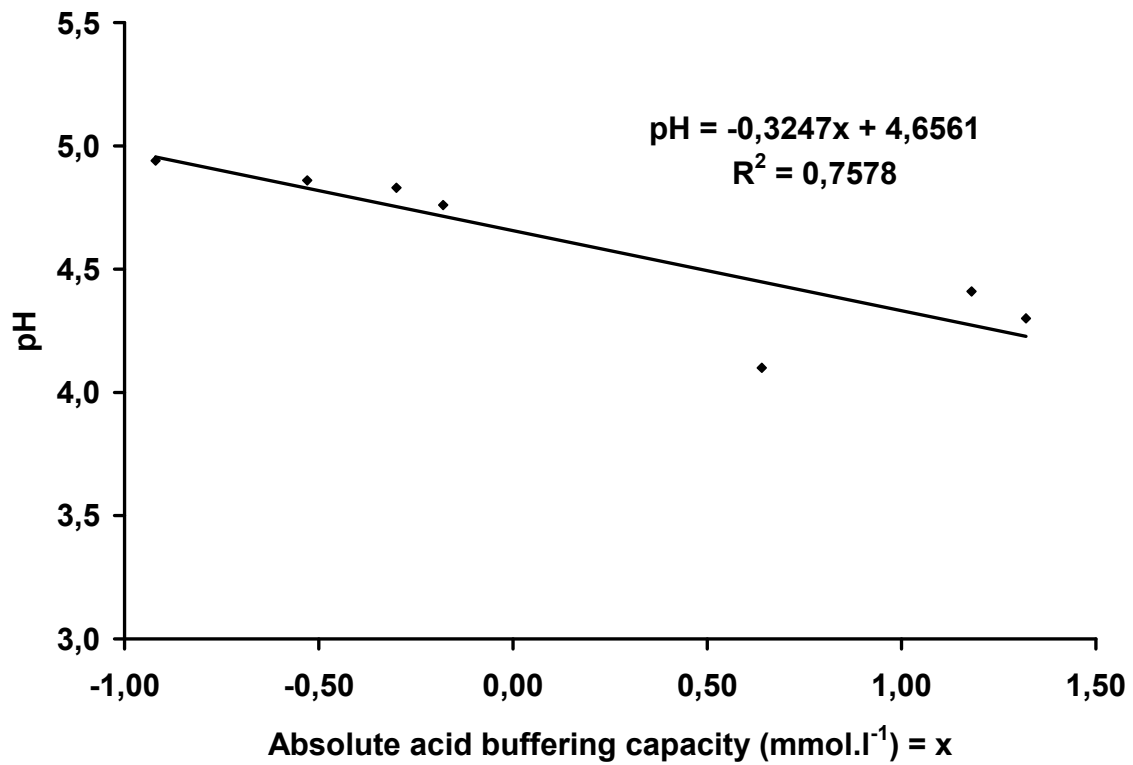
4.2.6.2 Impact of buffering capacity on pH

The F values of the regression pH versus acid buffering capacity and pH versus alkaline buffering capacity are not significant as shown in Table 4.6. However Figures 4.1 and 4.2 show that there are linear relationships between the pH values and the absolute or relative buffering capacities. This linear relationship is confirmed in Table 4.6, where the F value associated to the corresponding regression is significant in the case of absolute acid buffering capacity and highly significant in the case of relative buffering capacity. The absolute and relative acid buffering capacities decrease, when the pH value increases. The same results were found by *Xing et al (2004)*.

Table 4. 6 Summary of statistical tests for relationship

Relationship	pH vs. acid buffering capacity	pH vs. alkaline buffering capacity	pH absolute vs. acid buffering capacity	pH vs. relative acid buffering capacity
F value	4.07 ^{ns}	0.00 ^{ns}	15.57*	40.39**
R ²	0.45	0.00	0.76	0.89

Ns: not significant; * significant at 0.05 probability level; **significant at 0.01 probability level

**Figure 4.1** Relationship between pH value and absolute acid buffering capacity

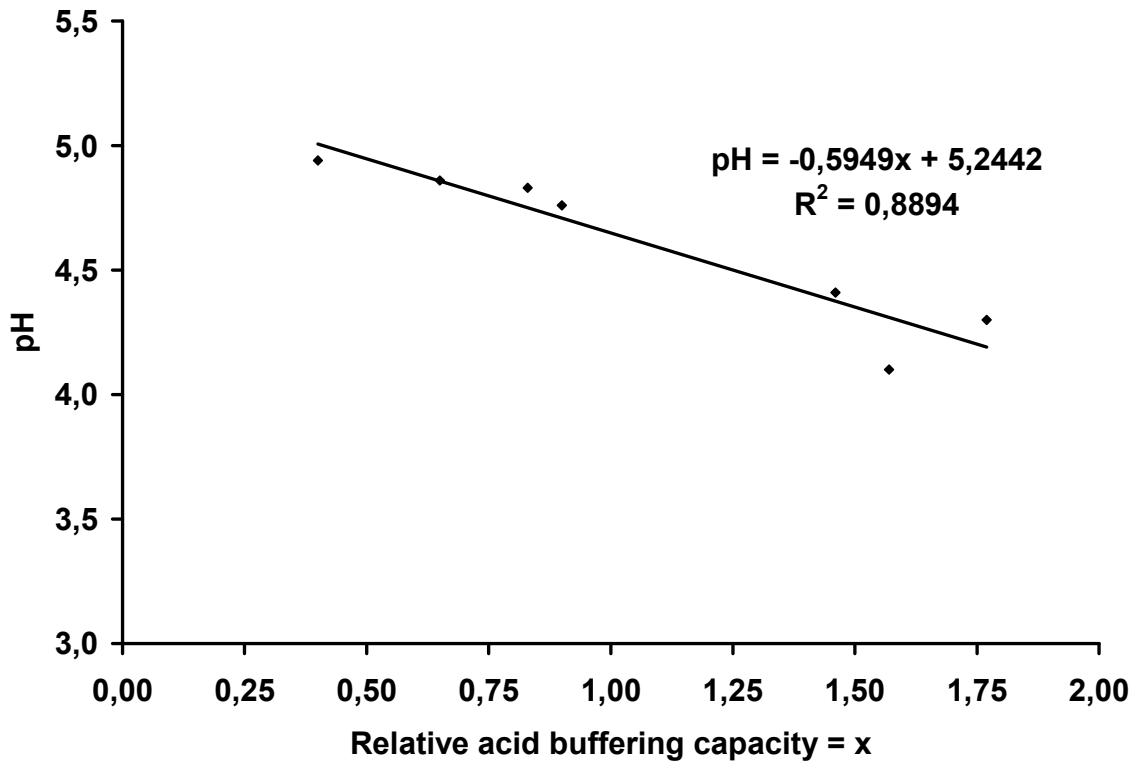


Figure 4.2 Relationship between pH value and relative acid buffering capacity

4.3 Conclusion

This study enabled us to find out with the help of ANOVA, significant differences between the acidity of white birch bark particles and that of wood particles used in the manufacture of 3-layer mixed panels. Therefore, some pressing parameters were adjusted: for example the curing time and the platens temperature were reduced in the case where the white birch outer bark particles were used in the surface layers. The significant difference among pH values of various particles also enables the manufacture of 3- layer mixed panels by using only one type of particles in each layer. A typical example was the white birch outer bark particles which were separated from the inner part by screening and used in the surface layers of panels with coarse wood particles in the core, whereas the inner barks were used in the core of panels with wood fibres on the surface. This study also confirms that there is linear relationship between the pH value and the absolute acid or relative buffering capacity.

CHAPITRE 5: PROPERTIES OF PARTICLEBOARDS BASED ON INNER BARK OF WHITE BIRCH (*Betula papyrifera*) AND REINFORCED WITH WOOD FIBRES

Abstract

About 96 000 tons of white birch barks (*Betula papyrifera*) produced annually in Quebec are used mainly for energy production. The objective of this study was to find other alternative use (more advantageous) for this raw material. Therefore, the white birch inner bark was used to manufacture three layers particleboards reinforced with wood fibres. Wood fibres were used as reinforcement because the single layer panels made up of 100% inner barks showed very weak values of modulus of rupture and modulus of elasticity. Particleboards measuring 560 × 460 × 11 mm were made following a factorial design with two manufacturing factors: 1) the percentage of wood fibres in the surface layers (with two levels), 2) the percentage of wood fibres mixed with inner bark particles used in the core layer (with three levels). This factorial design presents six different combinations with four repetitions resulting in a total of 24 boards. Manufactured panels showed physical and mechanical properties meeting the American National Standard Institute indoor requirements for particleboards. The panel with 25% wood fibres in the surface layers and 9% wood fibres added to the inner bark particles in the core layer was the best with regard to mechanical properties.

Résumé

Environ 96000 tonnes métriques anhydres d'écorce de bouleau blanc produites annuellement au Québec sont principalement utilisées dans la production de l'énergie. L'objectif de cette étude est de trouver d'autres alternatives plus rentables d'utilisation de cette abondante matière première. Une de ces alternatives consiste à utiliser la partie interne de cette écorce pour la fabrication de panneaux de particules à trois couches avec renfort des fibres de bois. Les fibres de bois sont utilisées comme renfort parce que lors de la phase d'essais préliminaires, les panneaux monocouches fabriqués exclusivement avec les particules d'écorce interne de bouleau ont eu des valeurs de module de rupture et de module d'élasticité très faibles. Les panneaux de dimensions 560×460×11mm sont

fabriqués suivant un plan factoriel avec deux facteurs décrits comme suit : 1) le pourcentage des fibres de bois utilisé dans les couches couvrantes (avec deux niveaux) et 2) le pourcentage de fibres de bois mélangées aux particules d'écorce interne utilisées dans la couche médiane (avec trois niveaux). Ce plan factoriel présente six combinaisons différentes avec quatre répétitions, ce qui résulte en un total de 24 panneaux. Les panneaux fabriqués ont montré des propriétés mécaniques et physiques en accord avec les exigences de la norme ANSI (1999) pour usage interne. Le panneau avec 25% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% de fibres de bois mélangées aux particules d'écorce interne de la couche médiane ont présentés les meilleures propriétés mécaniques.

5.1 Introduction

About 96 000 tons of white birch bark (*Betula papyrifera*) are produced annually in Québec, Canada (*Anonymous, 2004c*). White birch bark has two different parts: the inner part and the outer part which are totally different from each other in terms of structure, physical, chemical and mechanical properties (*Fengel and Wegener, 1989*). The color of white birch inner bark is orange; it has a granular form with a density of about 1 000 kg/m³ (this density was measured by using a densitometer). The outer bark is white in color, with several layers, and has a paper sheet form. The densitometer gave an average density of 600 kg/m³ for the outer layers. Actually, the Université du Québec à Chicoutimi is engaged in studies about betuleninic acid extracted from birch bark, which can be used for cancer treatments. White birch bark is also used as folk medicines. With the increased demand of wood-based composite products (*Seller, 2000; Youngquist, 1999*), wood will become rare and the best alternative will be to use value-added products like barks or agricultural and recycled residues (*Sampathrajan et al., 1992; Kozlowski and Helwig, 1998; Roffael et al., 2003*). For instance *Boquillon et al. (2004)* investigated the properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin and concluded that there is a high compatibility between straw and oil-based resin. If it is known that bark has some advantages over wood when used as mulch or in other soil amelioration approaches (*Allison, 1965*), it is not the same situation with its utilization in particleboard manufacture because of poor mechanical properties of the these particleboards (*Blanchet, 2000;*

Villeneuve, 2004). Thus, these types of panel are not yet fabricated industrially. In the case of this research project, the inner bark of white birch was used for panels manufacture at the laboratory scale. The results of preliminary tests show that it is impossible to manufacture panels made up exclusively of white birch inner bark particles. After several tests, it was found out that it can be possible to reinforce those white birch inner bark particles with wood fibres in three layers mixed panels meeting the requirements of M1-Panels type for internal use. Therefore, the following hypothesis was formulated: the use of wood fibres in the surface layers and a mix of white birch inner bark particles with different proportions of wood fibres in the core layer of a three layers panel can permit to reach the mechanical properties of M-1 panel types. The main objective of this study was to investigate the mechanical and physical properties of all mixed panels fabricated and to select the best one with the help of a factorial experiment in a complete block design.

5.2 Material and methods

5.2.1 White birch inner bark particles preparation

The barks were obtained from sawmill Thomas Louis Tremblay Inc. of Ste-Monique located in the North of Québec, Canada. The proportion of sapwood in those barks was approximately 8% of their oven-dried weight. They were dried at room temperature for ten days to 9% moisture content and then reduced to chips with the help of hammer mill (Jeffrey) and refiner (Pallmann). The inner bark was separated from the outer one by sieving. The dust was eliminated by the means of 0.25 mm mesh vibrating horizontal sieve. The size of inner bark particles finally obtained was between 0.25 mm and 1 mm. They were dried to 3% moisture content in a laboratory-type dryer. The black spruce fibres used were obtained from Uniboard Canada Inc, MDF La-Baie, Ville-de-la-Baie, Québec, Canada.

5.2.2 Experimental design

The preliminary tests enable us to set up a three layers mixed panel with white birch inner bark particles in the core and wood fibres in the surface. Its target density is 750 kg/m^3 and

its thickness 11 mm. A factorial design with two manufacturing factors in a complete block design (CBD) was used. Blocking is used to prevent nuisance factor from known and controllable sources of variability (*Montgomery, 2005*). In the case of this study, the nuisance factor was the day that panels were fabricated because the masses of particles weighed to manufacture the same type of panel can slightly vary from one day to another. The first factor of the experiment was the percentage of wood fibres used in the surface layer. This factor has two levels: 22% and 25% (by weight, based on oven-dry weight of all particles used). The choice of these two percentages, although closer, was made from the preliminary tests as follows: with 30 % or more of wood fibres, the internal bond of manufactured panel was weak and with 20% wood fibres or less, the modulus of rupture and the modulus of elasticity were weak. The second factor is the percentage of wood fibres added to white birch inner bark particles used in the core layer with three levels: 5, 9 and 13% (based on oven-dry weight of particles used in the core layer). Wood fibres were added to white birch inner bark particles used in the core layer of mixed panels to improve its bending strength. This experimental design resulted in six treatments with four replicates giving a total of 24 panels. The identification of six treatments corresponding to six panel types per block is presented in Table 5.1. The experiment design (Table 2) was set up using the Plan procedure of SAS software to fulfill the randomisation, principle that eliminates subjectivity and ensure the independency of errors. Three-layer reference wood panels were produced in order to compare its properties with those of mixed panels by using the least significance difference test (LSD) in a complete random design (CRD).

Table 5.1 Description of panel types

#	Types	Description
1	P ₂₂₋₅	Wood fibres in the surface layers represent 22% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 78% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 95% are inner bark particles of birch and 5% are wood fibres
2	P ₂₂₋₉	Wood fibres in the surface layers represent 22% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 78% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 91% are inner bark particles of birch and 9% are wood fibres
3	P ₂₂₋₁₃	Wood fibres in the surface layers represent 22% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 78% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 87% are inner bark particles of birch and 13% are wood fibres
4	P ₂₅₋₅	Wood fibres in the surface layers represent 25% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 75% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 95% are inner bark particles of birch and 5% are wood fibres
5	P ₂₅₋₉	Wood fibres in the surface layers represent 25% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 75% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 81% are inner bark particles of birch and 9% are wood fibres
6	P ₂₅₋₁₃	Wood fibres in the surface layers represent 25% of oven-dry weight of all particles used. The core layer is 75% of oven-dry weight of all particles used. Based on oven-dry weight of particles used in the core layer, 87% are inner bark particles of birch and 13% are wood fibres

Table 5.2 Experiment design obtained from the randomization

Number of block	Treatments					
	1	4= P ₂₅₋₅	1= P ₂₂₋₅	5= P ₂₅₋₉	6= P ₂₅₋₁₃	2= P ₂₂₋₉
2	6= P ₂₅₋₁₃	4= P ₂₅₋₄	2= P ₂₂₋₉	1= P ₂₂₋₅	5= P ₂₅₋₉	3= P ₂₂₋₁₃
3	2= P ₂₂₋₉	1= P ₂₂₋₅	4= P ₂₅₋₅	6= P ₂₅₋₁₃	3= P ₂₂₋₁₃	5= P ₂₅₋₉
4	2= P ₂₂₋₉	6= P ₂₅₋₁₃	1= P ₂₂₋₅	3= P ₂₂₋₁₃	5= P ₂₅₋₉	4= P ₂₅₋₅

5.2.3 Panel manufacture and tests

The manufacturing parameters are presented in Table 5.3. The particles for each panel were mixed in a rotating-drum mixer for 5 minutes. Panels were manually formed in a frame of 0.56×0.46 m. and pressed using a 600×600 mm Becker & Van Hüller hot press available at Centre de recherche sur le bois (CRB), Université Laval, Québec City, Québec, Canada. The panels were conditioned at a temperature of 20°C and 65% relative humidity until they reached their equilibrium moisture content (two weeks). Then, they were sanded to 11mm final thickness before any test was carried out. Figure 5.1 represents the cross section of panels P₂₅₋₅, P₂₅₋₉ and P₂₅₋₁₃.

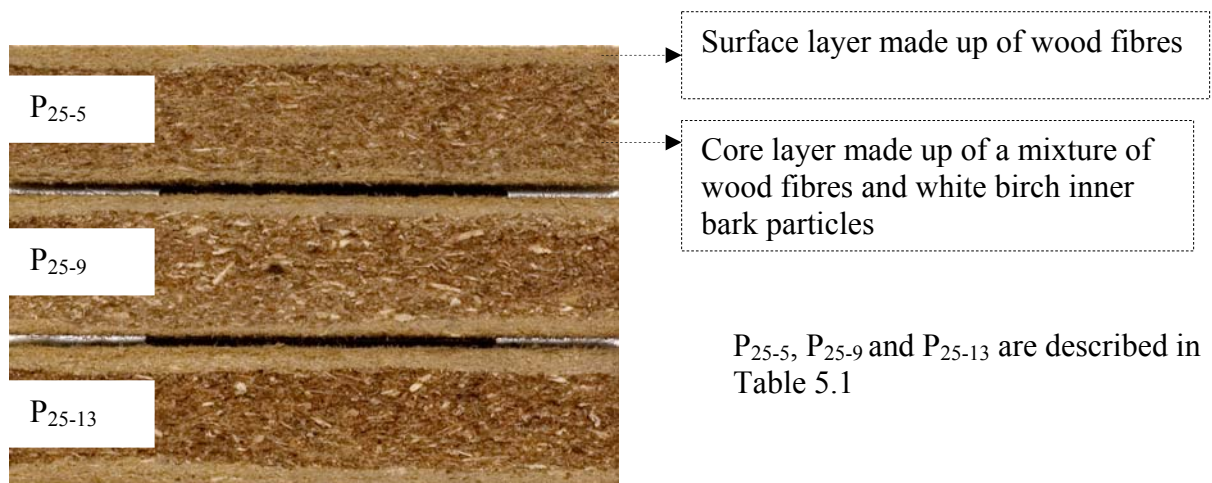
**Figure 5.1** Samples of panels P₂₅₋₅, P₂₅₋₉ and P₂₅₋₁₃

Table 5.3 Manufacturing parameters

Board size (width × length × thickness)	0.56 × 0.46 × 0.012 m (non-sanded) and 0.56 × 0.46 × 0.011 m (sanded)
Target board density	750 kg/m ³
Compaction ratio (Cr)*	65 / 12 = 5.4 (Cr was the same for all mixed panels and 3.5 for reference panel)
Press platen temperature	180° C
Press pressure	180 KPa
Wax	0.5% (based on oven-dry particles) in the particles of core layer and 1% (on oven-dry basis fibres) in the surface layers fibres
Resin	Urea formaldehyde (Borden Casco-Resin TL-105, solid content: 65%). 12% UF (based on oven-dry particles and fibres) used for core and surface layers
Catalyst added to UF used in the core to lower its pH-value from 7.8 to 7	Ammonium chloride (30%), [30 g NH ₄ Cl in 100 ml water solution]
Press closing time	26 seconds
Curing time	4 minutes
Press opening time	1 minute in three steps

*Cr = mat thickness (in mm)/panel thickness (in mm)

5.2.4 Determination of mechanical and physical properties

Tests samples were prepared based on ASTM D-1037-99 specifications and the result of each test was compared with the value of ANSI A208.1-1999. Vertical density profiles were determined from internal bond samples with a QMS X-ray density profiler, Model QDP-01X. The surface density was obtained from the maximum density point and the core density was obtained from the minimum point of each respective zone of the vertical density profile. The modulus of elasticity (MOE) and the modulus of rupture (MOR) were obtained from an average of three 314 × 75 mm samples for each panel. Internal bond (IB) was obtained from an average of five 50 × 50 mm samples for each panel. Thickness

swelling (TS) and water soaking (WA) were obtained from an average of two 150×150 mm samples for each sample. Linear expansion (LE) and thickness swelling (TSw) were obtained from an average of two 150×75 mm samples for each panel. LE and TSw were measured following a desorption from 65 to 50 % relative humidity (RH) and an adsorption from 50 to 80% RH. The RH conditions were obtained using a climatic chamber, model N0. WM – 906 – MP2H – 5 - SC/WC from Cincinnati Sub-Zero (CSZ).

LE and TSw were calculated as follows:

$$LE = [(L_2 - L_1) / L_1] \times 100$$

Where LE is the linear expansion between 50 and 80 % RH (%); L_1 is the sample length at equilibrium of 50 % RH (mm); L_2 is the final sample length after reconditioning to 80 % RH (mm).

$$TSw = [(T_2 - T_1) / T_1] \times 100$$

Where TSw is the thickness swelling between 50 and 80 % RH (%); T_1 is the sample thickness at equilibrium of 50 % RH (mm); T_2 is the final sample thickness after reconditioning to 80 % RH (mm).

5.3 Results and discussion

5.3.1 Results of mechanical properties

5.3.1.1 Density profile

The density profiles of the six panel types had similar shape. Therefore, only one density profile of mixed panel is drawn and compared with that of reference panel (Figure 5.2). The density profile of mixed panel is flatter than that of reference and its value in the core layer is greater than that of reference panel. The reason is that, the density of white birch inner bark used in the core of mixed panel is very high (approximately 1000 kg/m^3). The maximum density value in the surface layers of mixed panel is greater than that of reference panel because wood fibres used in the surface of mixed panel has a compaction ratio higher than that of wood particles used in the surface layers of reference panel.

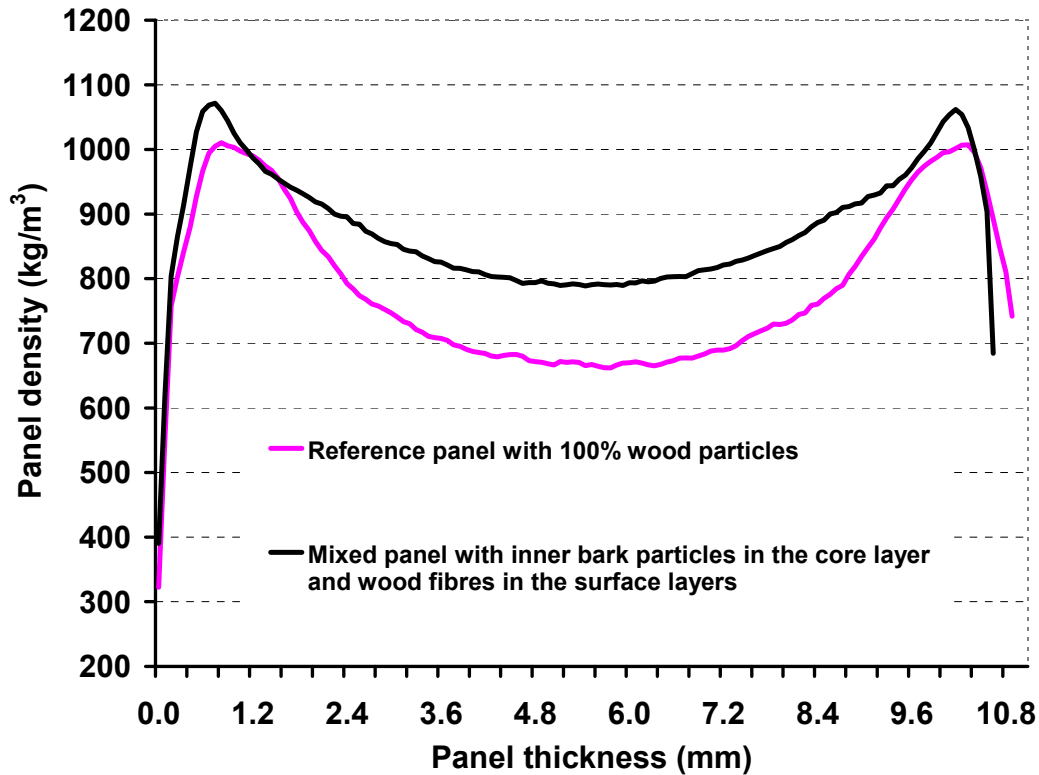


Figure 5.2 Typical density profiles of reference panel made from 100% wood particles and mixed panel with white birch inner bark particle in the core layer and wood fibres in the surface layer

5.3.1.2 Specific density of panels

The Figure 5.3 represents the density of each panel type. This density is an average value of three samples used for each panel to determine modulus of elasticity and modulus of rupture. The measured density of each panel is higher than the target density of 750 kg/m^3 represented by the red line in Figure 5.3. The first reason was the sanding which has lowered the thickness of panels used in such a way the final thickness was lower than 11 mm. It would have been better to fabricate panel thicker than 12 mm in order to get the final target thickness of 11 mm after sanding. The second reason was the difficulty to level mat thickness because it was formed manually. The reference panel made with 100% wood particles had the density closer to the target density because it was easy to level wood particles during the mat formation.

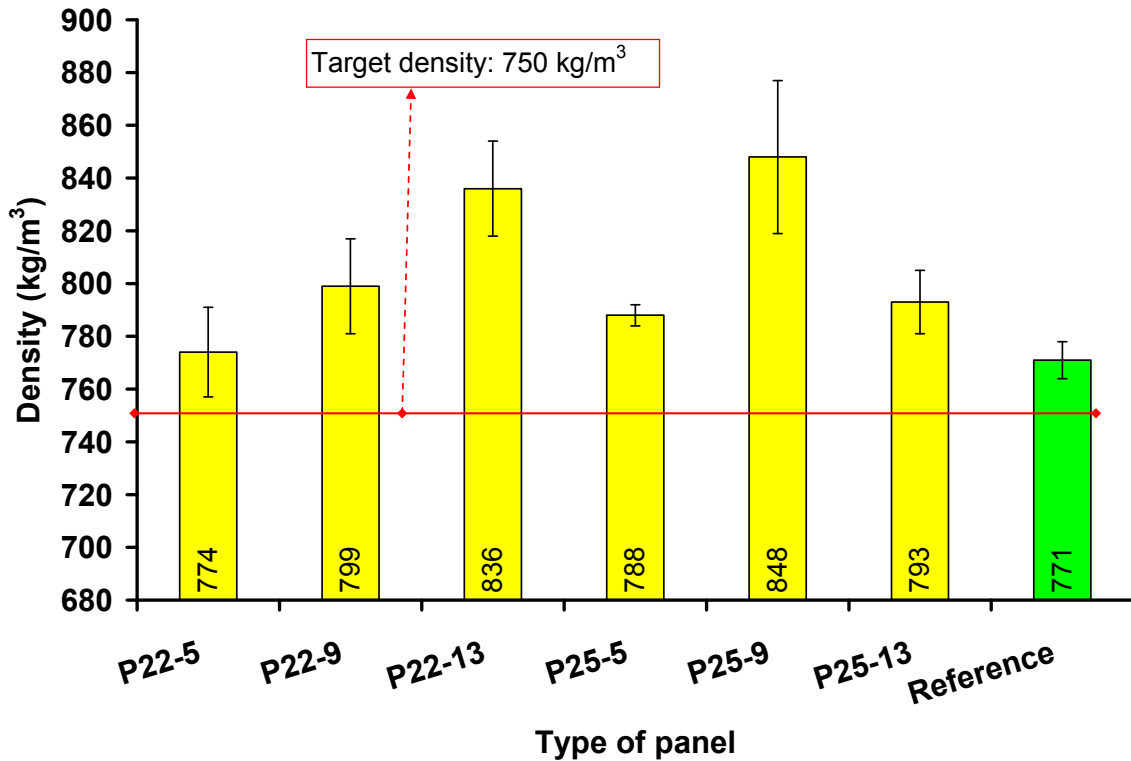


Figure 5.3 Average density of panels (mean values and standard deviations)

5.3.1.3 Modulus of elasticity

The results obtained for the modulus of elasticity are presented in Figure 5.4. The modulus of elasticity (MOE) values of all panels met the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 1725 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. However, all mixed panels presented lower MOE values than those of reference panel. The results of variance analysis (ANOVA) for MOE (Table 5.4) showed that the percentage of wood fibres in the surface layers of mixed panel was not significant, but the interaction between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer was significant. The best MOE value was selected by taking into account the percentage of wood fibres added to inner bark particles used in the core layer. Figure 5.4 showed that 9% was the optimum value. Therefore, the panel P₂₅₋₉ with 25% wood fibres in the surface layers and 9% wood fibres added to inner bark

particles in the core layer was the one with the highest value of MOE in the mixed panels group.

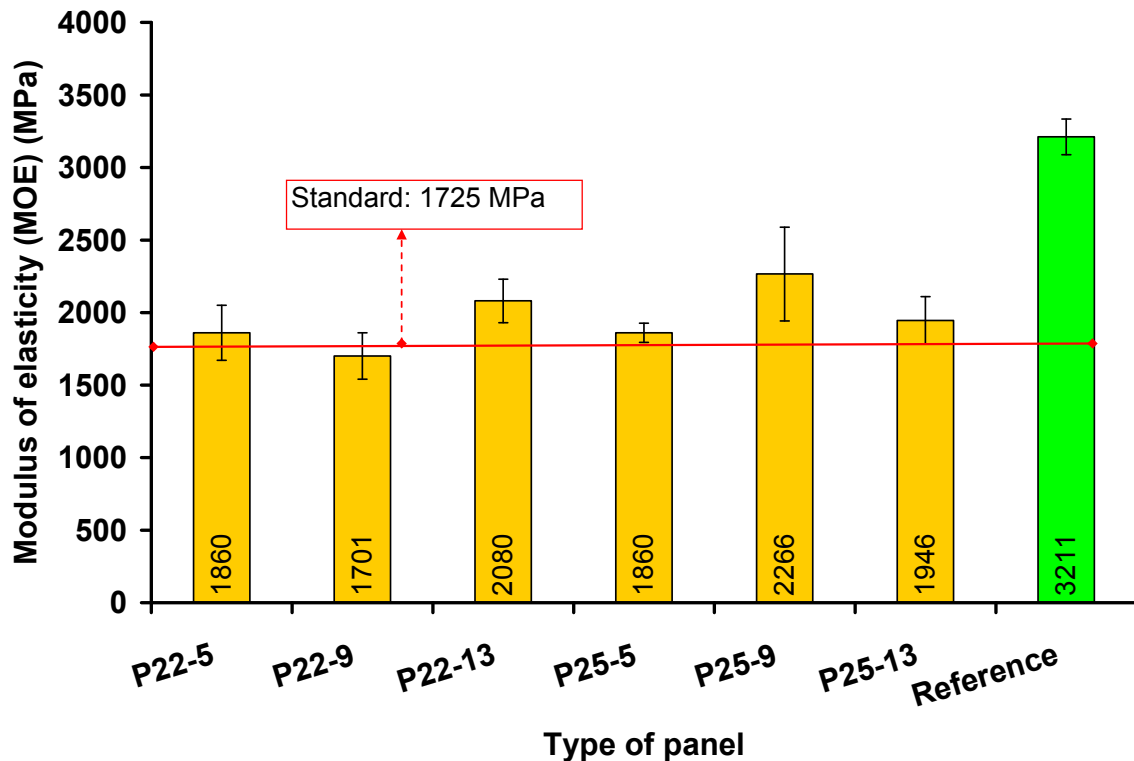


Figure 5.4 Modulus of elasticity (MOE) (mean values and standard deviations)

5.3.1.4 Modulus of rupture

The results obtained for the modulus of rupture (MOR) are presented in Figure 5.5. The MOR values of all panels met the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 11 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. However, all panels presented lower MOR values than that of reference panel. The results of variance analysis (ANOVA) for MOR (Table 5.4) showed that the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer of mixed panels was not significant, but the interaction between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer was highly significant. The best MOR value was selected by taking into account the percentage of wood fibres in the surface layers which was significant. Figure 5.4 showed that 25% was the optimum value. Therefore, the panel

P₂₅₋₉ with 25% wood fibres in the surface layers and 9% wood fibres added to inner bark particles in the core layer was the one with the highest value of MOR in the mixed panels group.

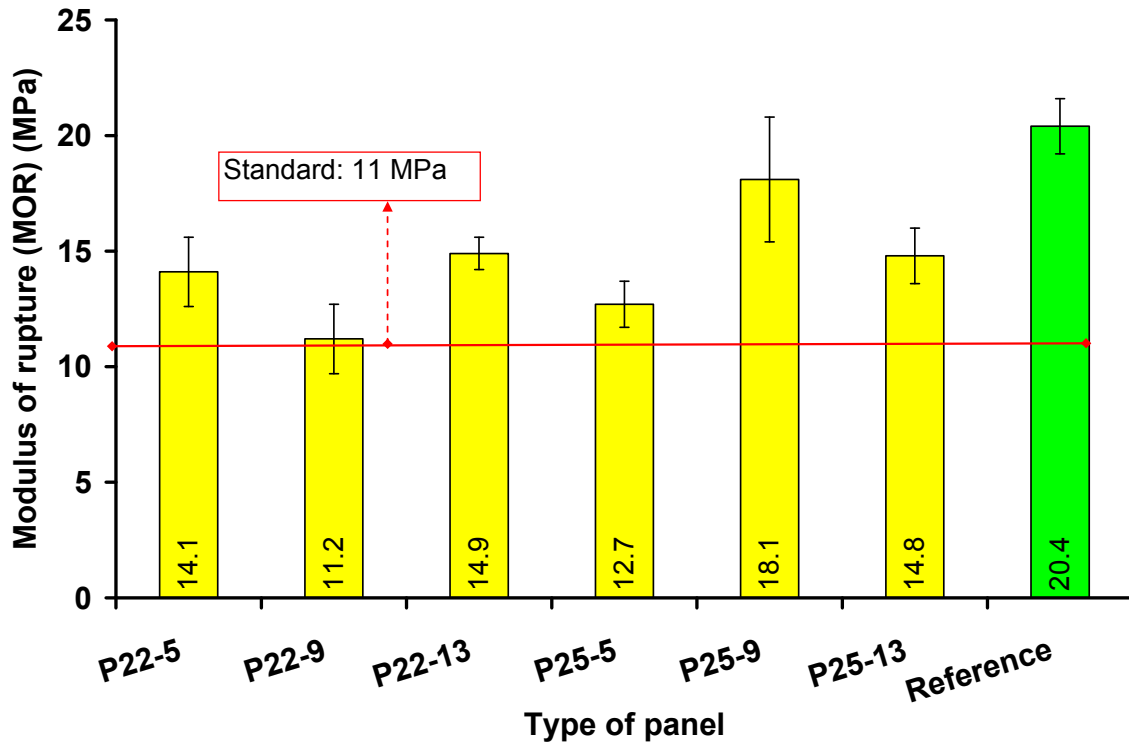


Figure 5.5 Modulus of rupture (MOR) (mean values and standard deviations)

5.3.1.5 Internal bond

The results obtained for internal bond (IB) are presented in Figure 5.6. The IB values of all panels meet the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 0.40 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. However, the IB values of mixed panels are lower than that found for reference panel. The results of variance analysis (ANOVA) for IB (Table 5.4) showed that the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer were highly significant. The interaction between them was also highly significant. Figure 5.6 showed that 25% and 9% were the optimum value. Therefore, the panel P₂₅₋₉ with 25% wood fibres

in the surface layers and 9% wood fibres added to inner bark particles in the core layer was the one with the highest value of IB in the mixed panels group.

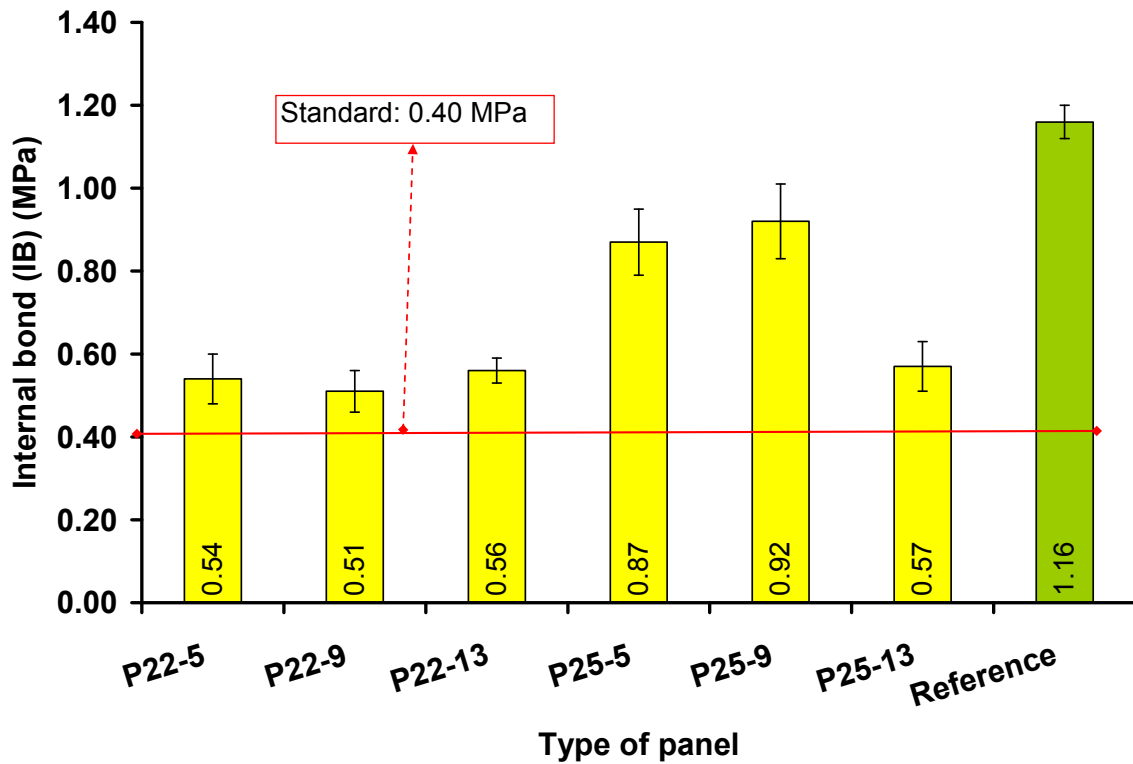


Figure 5.6 Internal bond (IB) (mean values and standard deviations)

All mechanical properties of mixed panels are weaker than those of reference panel. It means that, the use of inner bark particles decreases of mechanical properties of manufactured panels, which is in agreement with other authors (*Blanchet et al. 2000*, *Villeneuve et al. 2004*). *Xing et al. (2007)* made the same observation by manufacturing 3-layer panels with wood fibres in the surface and spruce bark fibres in the core layer. They noticed that an increase of bark fibres in the core has a negative effect on the mechanical properties.

5.3.2 Results of physical properties

5.3.2.1 Thickness swelling

The results obtained for the thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking are presented in Figure 5.7. There is no specification for this property according to ANSI A208.1-1999. The results of mixed panels for TS are compared with those of reference panel. All mixed panels have swelled more than the reference panel after 2 and 24 hours water soaking. No statistical difference was found among the mixed panels on one hand and on the other hand between the mixed panels and the reference panel. However the TS values of panels P₂₅₋₉ and P₂₅₋₁₃ were higher than that of reference panel. The reason is difficult to explain.

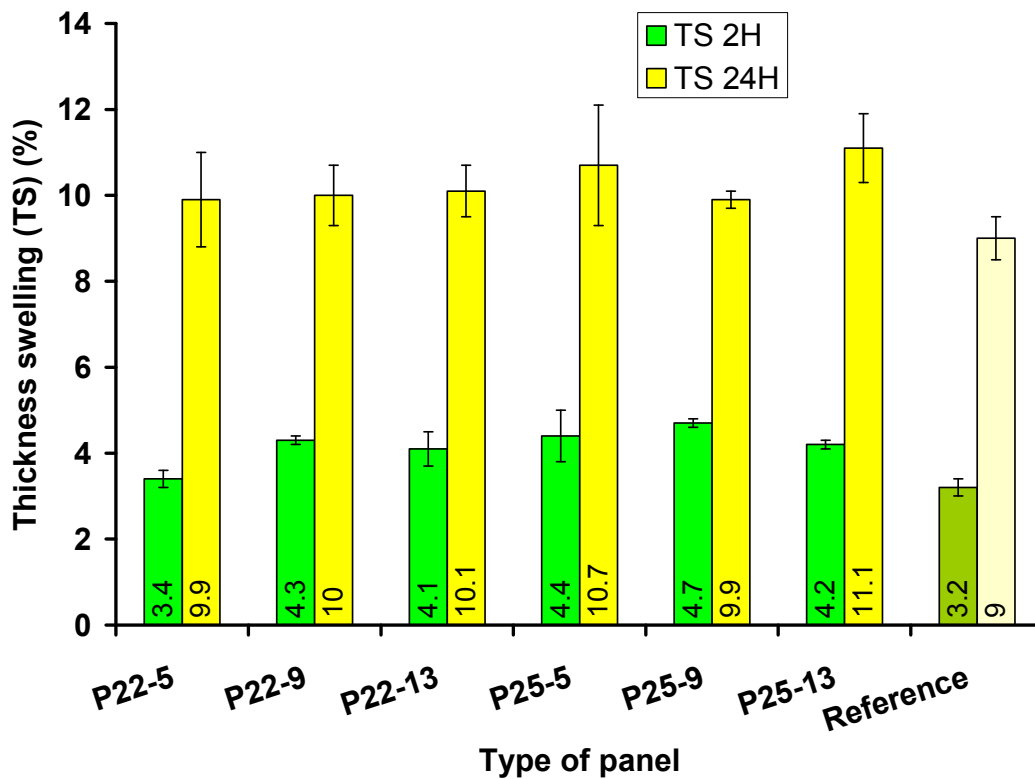


Figure 5.7 Thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)

5.3.2.2 Water absorption

The statistical analysis was not done for water absorption (WA) because it derives from thickness swelling and there is no specification for this property according to ANSI A208.1-1999 standard. The results obtained WA after 2 and 24 hours water soaking are presented in Figure 5.8. Within the group of mixed panels with 22% wood fibres in the surface layers, WA decreases with an increase of wood fibres percentage added to inner bark particles in the core layer. The results of mixed panels for WA are compared with those of reference panel. All mixed panels have absorbed more water than the reference panel after 2 and 24 hours water soaking. The reason can be explained by the mixture of wood fibres and white birch inner bark particles that absorbs more water than wood particles.

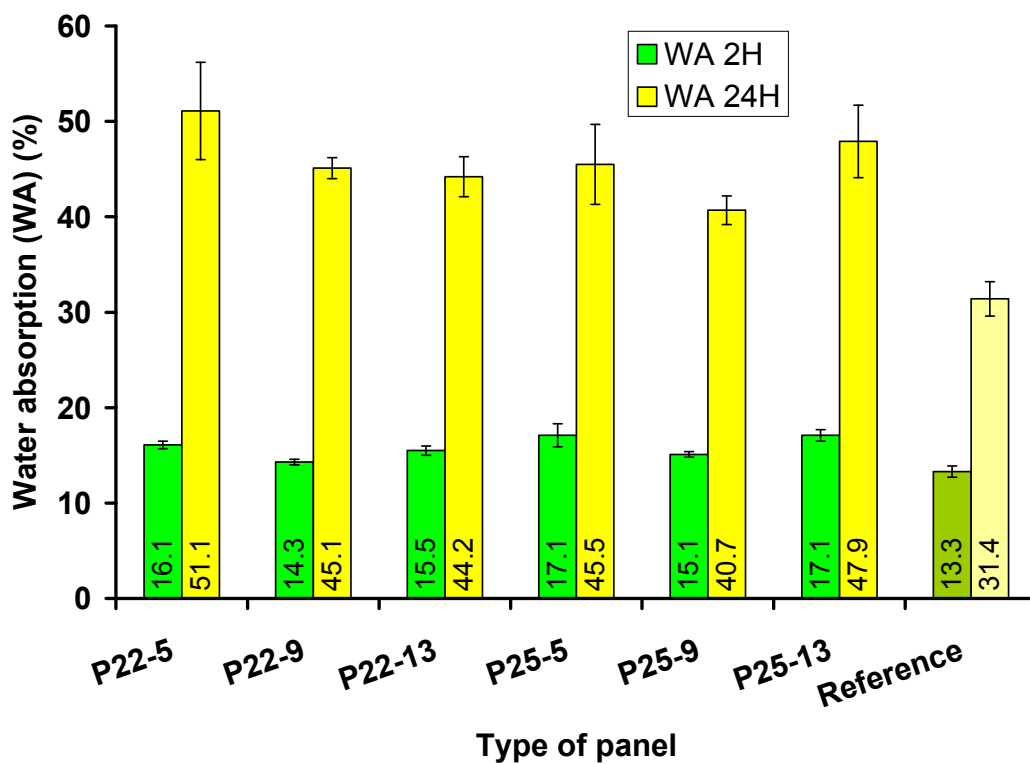


Figure 5.8 Water absorption (WA) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)

5.3.2.3 Linear expansion

The results obtained for linear expansion (LE) are presented in Figure 5.9. Only the LE of panel P₂₂₋₅ with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres added to inner bark particles in the core layer meets the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 0.35% according to ANSI A208.1-1999 standard. The results of variance analysis (ANOVA) for LE (Table 5.4) showed that the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer were highly significant. The interaction between them was also highly significant. Figure 5.9 showed that 22% and 5% were the optimum value. Therefore, the panel P₂₂₋₅ with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres added to inner bark particles in the core layer was the one with the lowest value of LE within the mixed panels group. However the LE value of this panel is almost twice higher than that of reference panel. The reason could be the mixture of inner bark particles of white birch and wood fibres.

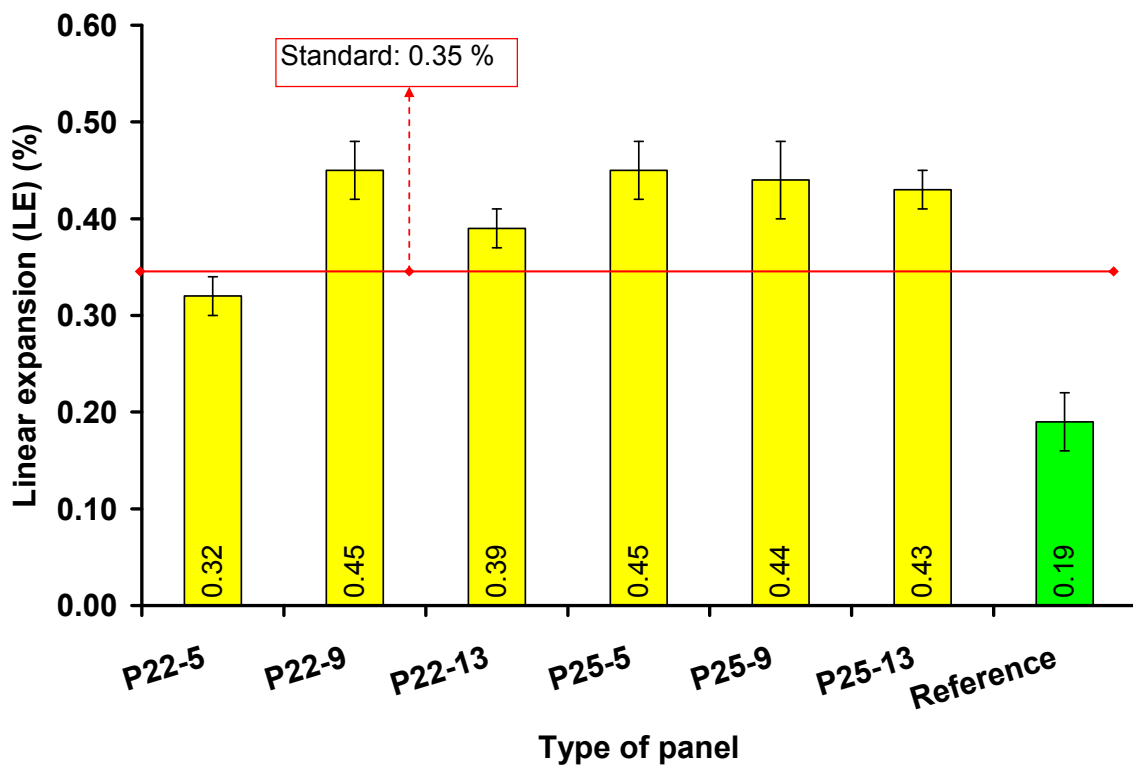


Figure 5.9 Linear expansion (LE) (mean values and standard deviations)

5.3.2.4 Thickness swelling (TSw)

The statistical analysis was not done for thickness swelling (TSw) because there is no specification for this property according to ANSI A208.1-1999 standard. The values obtained for TSw are presented in Figure 5.10. The TSw of all mixed panels were very close except that of panel P₂₅₋₁₃ with 25% wood fibres in the surface layers and 13% wood fibres added to inner bark particles in the core layer the reason was the higher total percentage of wood fibres in the whole panel. The TSw values of mixed panels were smaller than that of reference panel. It means that the mixed panels were more stable than the reference panel when the thickness direction was taken into account. This observation is difficult to explain because the opposite phenomenon was observed for the measurement of TS after 24 h water soaking. The panel P₂₂₋₅ with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres added to inner bark particles in the core layer was the one with the lowest value of TSw within the mixed panels group.

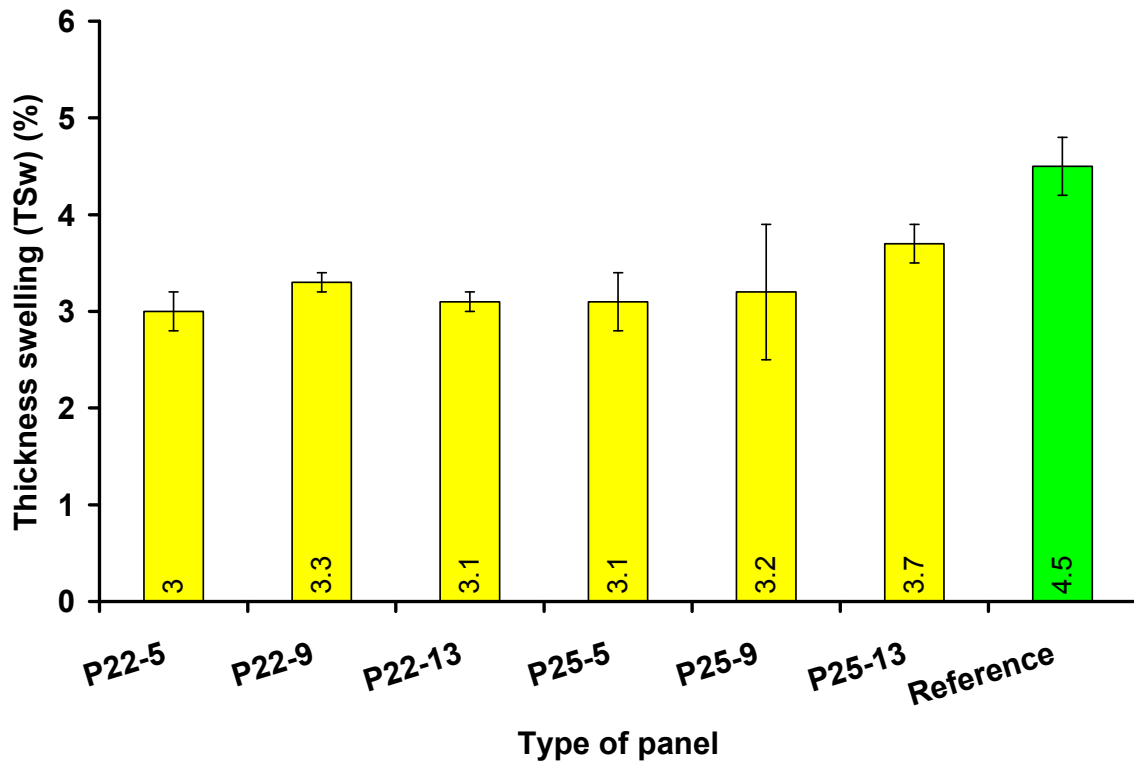


Figure 5.10 Thickness swelling (TSw) (mean values and standard deviations)

5.3.3 Analysis of variance

The summary of analysis of variance (ANOVA) is presented in Table 5.4. In this study, ANOVA was applied only on the main properties described by the standard (MOR, MOE, IB, TS and LE). The F values associated to treatments for all tested properties were significant but the F value associated to blocking for each tested property was not significant.

Table 5.4 Summary of variance analysis (ANOVA). MOR= modulus of rupture, MOE= modulus of elasticity, IB= internal bond, TS= thickness swell, LE= linear expansion

Source of Variation	Mechanical and physical properties (F values)					
	df	MOR	MOE	IB	TS	LE
Blocks	3	1.04 ns	1.60 ns	2.21 ns	0.19 ns	0.95 ns
pfs	1	5.87*	2.79 ns	80.32**	1.65 ns	15.42**
pfc	2	1.46 ns	1.19 ns	12.15**	0.70 ns	6.57**
pfs×pfc	2	12.61**	6.23*	19.19**	0.60 ns	8.54**
Contrasts						
pfs	1	5.87*	2.79 ns	80.32**	1.65 ns	15.42**
pfcL	1	2.52 ns	2.10 ns	16.28*	0.32 ns	3.15*
pfcQ	1	0.39 ns	0.27 ns	8.03*	1.08 ns	3.99**
pfs×pfcL	1	0.49 ns	0.40 ns	21.98**	0.06 ns	7.09*
pfs×pfcQ	1	24.73**	12.05**	16.40**	1.14 ns	9.99**

Meaning of abbreviations used in the table: **df**= degree of freedom; **pfs**= percentage of wood fibres used in the surface layers (22 versus 25%); **pfc**= percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer (5, 9, 13%); **pfcL**= linear effect of pfc; **pfcQ**= quadratic effect of pfc; **pfs*pfcL**= interaction between pfs and pfcL; **pfs*pfcQ**= interaction between pfs and pfcQ; ns= non-significant; * significant at 0.05 probability level, ** significant at 0.01 probability level

Figures 5.11, 5.12, 5.13 and 5.14 illustrate all significant interactions presented in Table 5.4. The standard errors (S.E) associated with these interactions were computed using the formula

$$S.E. = \sqrt{\frac{M.S.E}{r * n}}$$

where M.S.E is the mean square of experimental error of ANOVA, r the

number of replicate and n the number of hidden replicates (*Collin, 2003*). In the case of this study n= 1 because there are only two factors. The results are presented in Table 5.5. The S.E. are represented on the interaction plots of Figures 5.11, 5.12, 5.13 and 5.14 by the bars which length is twice the standard error value. The bars overlap where the interaction is not significant. Figures 5.11, 5.12, 5.13 and 5.14 enabled to do the following interpretation: the mechanical properties (MOR, MOE and IB) of mixed panels are the highest when 25% wood fibres are used in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles in the core layer is 9. But when that percentage is above 9, those mechanical properties decrease. The opposite phenomenon happens when 22% wood fibres are used in the surface layers. For linear expansion, the panel with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres added to inner bark particles in the core layer was the best because its value was the lowest among the mixed panels and was also the only value fulfilling the standard requirements (Figure 5.14)

Table 5.5 Standard error (S.E) associated with significant interactions

Interactions	Standard error associated with significant interactions				
	MOR	MOE	IB	TS	LE
Pfs × pfc	0.900	0.105	0.034	ns	0.017

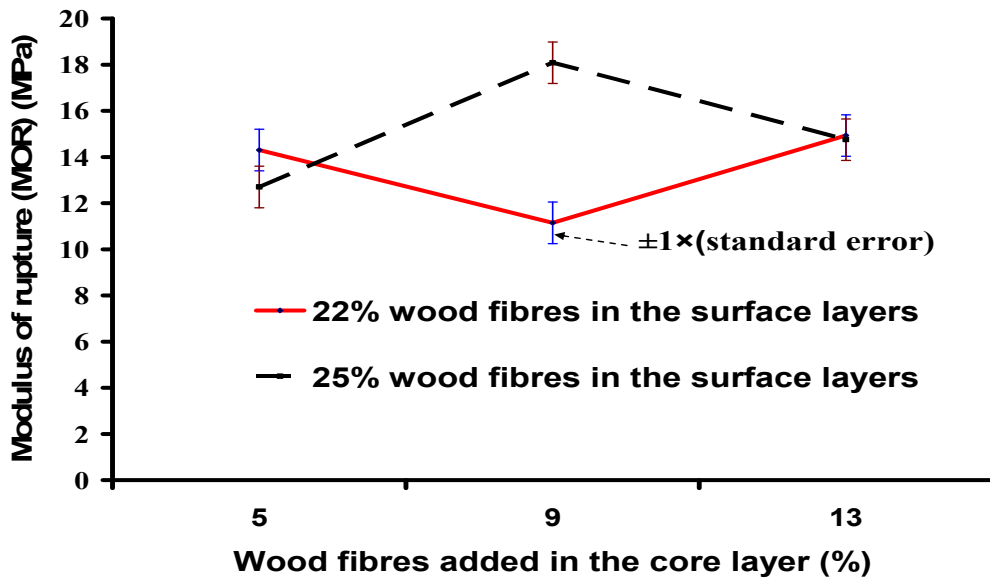


Figure 5.11 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for the modulus of rupture

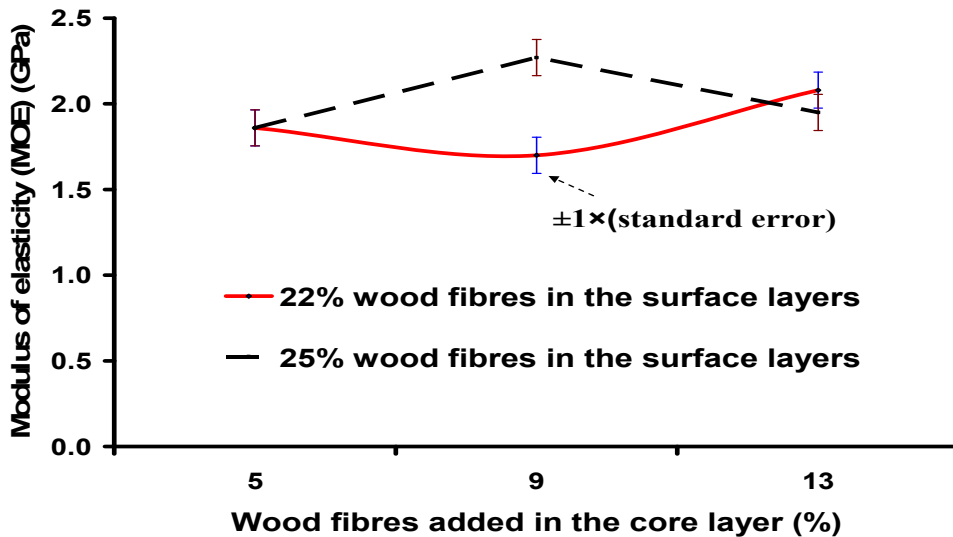


Figure 5.12 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for the modulus of elasticity

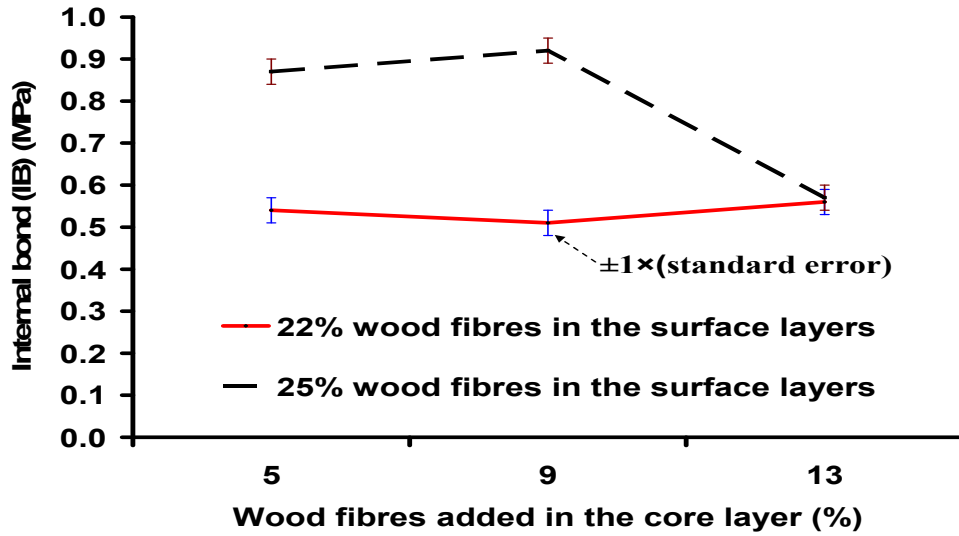


Figure 5.13 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for internal bond

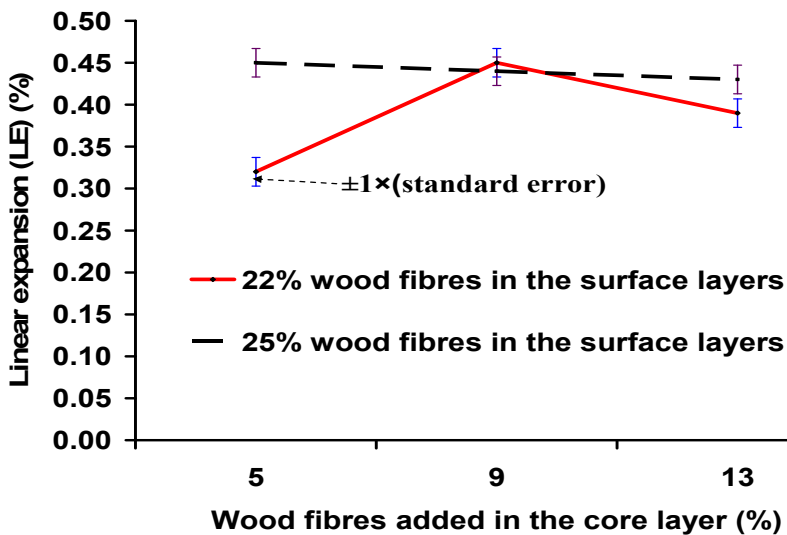


Figure 5.14 Interaction plots between the percentage of wood fibres in the surface layers and the percentage of wood fibres added to inner bark particles of white birch in the core layer of mixed panels for linear expansion

5.3.4 Result of comparison test using LSD (least significant difference) test

LSD was used to compare only mixed panels with reference panel but not to compare mixed panels among them because the statistical analysis has already been done in a factorial design. The results are presented in Table 5.6. Mixed panel sharing the same letter with the reference panel is no different from this latter for the measured property. The reference panel has the best properties as far as the modulus of elasticity, the internal bond and the linear expansion are concerned. The TS after 24 h water soaking of panels P₂₅₋₅ and P₂₅₋₁₃ with 25% wood fibres in the surface layers and respectively 5 and 13% wood fibres added to inner bark particles in the core layers are significantly higher than that of reference panel. The IB of panels P₂₂₋₅ and P₂₂₋₉ with 22% wood fibres in the surface layers and respectively 5 and 9% wood fibres added to inner bark particles in the core layers are significantly lower than that of reference panel.

Table 5.6 Comparison of mixed panels with the reference panel (100% wood particles) with the help of LSD (least significant difference) test

Types of panels	Means				
	MOR (MPa)	MOE(GPa)	IB (MPa)	TS (%) (after 24 hours water soaking)	LE (%)
P ₂₂₋₅	14.1 bcd	1.860 cd	0.53 c	9.9 ab	0.32 c
P ₂₂₋₉	11.1 d	1.700 d	0.51 c	10.0 ab	0.45 a
P ₂₂₋₁₃	15.2 abc	2.080 cb	0.56 c	10.0 ab	0.39 b
P ₂₅₋₅	12.9 cd	1.860 cd	0.87 b	10.7 a	0.45 a
P ₂₅₋₉	17.0 ab	2.267 b	0.92 b	9.9 ab	0.44 ab
P ₂₅₋₁₃	16.0 abc	1.945 cd	0.57 c	11.1 a	0.43 ab
P _{reference}	18.1 a	3.211 a	1.16 a	9.0 b	0.19 d

Means with the same letter are not significantly different, MOR = modulus of rupture, MOE = modulus of elasticity, IB = internal bond, TS = thickness swelling, LE = linear expansion

5.3.5 Regression

A regression was done between each measured property and the density of samples used in order to check if a variation observed the measured property could be explained by the samples density. The results are presented in Table 5.7. A significant F value for the regression between the modulus of elasticity and the density of samples used was obtained. It means that the variation observed in the measurement of MOE can be explained at 67% ($R^2 = 0.67$) by the density of samples used.

Table 5.7 Regression

Regression	MOR versus density	MOE versus density	IB versus density	TS versus density	LE versus density
F-value	3.21 ns	7.96*	3.08 ns	0.87 ns	0.19 ns
R^2	0.45	0.66	0.43	0.18	0.04

*: significant at 0.05 probability level; ns: not significant

5.4 Conclusion

Since preliminary investigations showed that it was not possible to manufacture panels which meet requirements of standard for the panels of type M-1 for interior use by using only white birch inner bark particles, an alternative method was developed in order to manufacture grade M-1 mixed panels, based on these bark particles and reinforced with wood fibres at various percentages which meet the standard requirements.

The method set up enabled us to valorize more than 60% inner bark particles of white birch in each panel fabricated.

The statistical analysis method used to facilitate the interpretation of physical and mechanical properties results permitted to choose the panel with 25% wood fibres in the surface layers and 9% wood fibres added to inner bark particles in the core layer as the best if only the mechanical properties are taken into account. But the choice would fall rather on panels with 22% wood fibres in the surface layers and 5% wood fibres in the core layer if both mechanical and physical properties are taken into account.

The regression used in the experimental design enables to conclude that the variation observed in the measurement of all physical and mechanical properties foreseen by the standard is not linked to the density of samples used except the modulus of elasticity which variation can be explained at 67% ($R^2 = 0.67$) by the density variation of samples used.

CHAPITRE 6: PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PANEL BASED ON OUTER BIRCH BARK: MIXED PANELS WITH WOOD PARTICLES VERSUS WOOD FIBRES

Abstract

The use of white birch outer bark in canoes is an example of its oldest use by the first nations in Canada. This use confirms the hydrophobic characteristics of this bark which can be capitalized on by using it in the surface of three - layer mixed composite panels in order to protect them from water infiltration through their surface. Thus, the project of three - layer mixed panel manufacture was set up to evaluate its technical potential and its industrial feasibility. These panels were made up of white birch outer bark particles in the surface layers, with coarse wood particles or wood fibres in the core layer. A factorial experiment used in a complete block design permitted to carry out a suitable statistical analysis of measured properties. The two factors considered were respectively the bark percentages in the surface layers with three levels (35, 40, 45%) and the type of material used in the core with two levels (coarse wood particles and wood fibres). Four replicates were done for each panel. The panels with wood particles in the core gave physical and mechanical properties satisfying the indoor requirements for particleboards and those with wood fibres in the core layer passed the requirement of medium fibres density board (MDF). The thickness swelling after 24 hours water soaking is largely attributed to wood particles and wood fibres in the core of panels tested and to the weak adhesion at the interface wood particles – bark particles and wood fibres – bark particles. An increase of white birch outer bark particles in the surface layers led to a decrease of mechanical properties of manufactured mixed panels. Especially based on the dimensional stability, the best panel among the mixed panels was that with 45% outer bark particles of white birch in the surface layers and wood particles in the core layer.

Résumé

L'utilisation de l'écorce externe de bouleau blanc pour la fabrication des canots par les premières nations du Canada constitue certainement l'exemple de mise en valeur le plus ancien et le plus connu. Ceci confirme le fort caractère hydrophobe de cette écorce. Cette caractéristique de l'écorce externe de bouleau blanc peut être exploitée en l'utilisant dans les couches couvrantes des panneaux mixtes trois couches afin de les protéger efficacement contre les infiltrations d'eau par la surface. Le projet de fabrication de panneaux mixtes trois couches a donc été mis sur pied pour en évaluer le potentiel technique et la faisabilité industrielle. Ce panneau est constitué des particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches de surface, de particules grossières de bois ou de fibres de bois dans la couche médiane. Un dispositif factoriel utilisé dans un plan en bloc complet a permis de réaliser le plan d'expérience et de faire l'analyse statistique appropriée des données obtenues. Les deux principaux facteurs considérés dans le dispositif sus mentionné sont : 1) Le pourcentage des particules d'écorce dans les couches couvrantes. Ce facteur a trois niveaux : 35, 40 et 45%. 2) Le type de matériau utilisé dans la couche médiane. Ce facteur a deux niveaux qui sont : les particules grossières de bois et les fibres de bois. Quatre répétitions sont faites pour chaque type de panneau. Les propriétés physiques et mécaniques des panneaux ayant les particules de bois dans leur couche médiane ont rencontré les exigences des normes en vigueur pour les panneaux destinés à l'usage intérieur, par contre les modules d'élasticité des panneaux avec les fibres de bois dans leur centre sont inférieurs à la valeur standard requise pour les panneaux de fibres de masse volumique moyenne (MDF). Le gonflement en épaisseur après 24 heures d'immersion dans l'eau des panneaux fabriqués est largement attribué soit aux particules de bois ou aux fibres de bois utilisées dans les couches couvrantes. Ce gonflement est aussi attribué en partie à la faible adhésion à l'interface particules d'écorce-particules de bois d'une part et particules d'écorce-fibres de bois d'autre part. L'augmentation du pourcentage des particules d'écorce dans les couches couvrantes a entraîné une baisse significative des propriétés mécaniques des panneaux mixtes fabriqués. Le panneau avec 45% de particules d'écorce externe dans les couches couvrantes et 55% de particules de bois dans la couche médiane est le meilleur panneau sélectionné du groupe, surtout en se basant sur le critère de la stabilité dimensionnelle, évaluée par la mesure de la dilatation linéaire.

6.1 Introduction

Outer bark of white birch has already been used in the past for panels manufacture at the laboratory scale. It is known that the outer bark of birch is not a structural material like wood, because it has less than 4% cellulose (*Lundqvist and Back, 1976*). During the preliminary tests single layer panels with white birch outer bark particles were fabricated but their mechanical properties were lower than those required the standard of M-1 grade particleboards for interior use. Only the thickness swelling after 24 hours water immersion of these panels was good (lower than 3%), confirming the hydrophobic characteristics of white birch outer bark. *Lundqvist and Back (1976)* suggested in their studies that, since it impossible to produce panels with 100% birch outer bark particles meeting the standard of M-1 grade particleboards, therefore it is advisable to use them rather in the core layer of mixed panels with wood particles in the surface layers. This suggestion was applied during the preliminary tests, where two sizes of white birch outer bark particles were used in the core of mixed panels with wood particles in the surface layers. The first panel was fabricated using white birch outer bark particles, which sizes were between 2 mm and 6 mm in the core and the second was fabricated using white birch outer bark particles of sizes between 0.25 mm and 1 mm in the core. The modulus of rupture (MOR) and the modulus of elasticity (MOE) of those panels didn't meet the standard requirements. The internal bond of panel with bark particles of sizes between 2 mm and 6 mm was very low but the internal bond of panel with bark particles of sizes between 0.25 mm and 1 mm was even higher than that of the standard for M-1 grade particleboards. From these results it was obvious that outer white birch particles should be used rather in the surface layer of mixed panels with a structural material in the core in order to improve their MOR and MOE. From these observations a factorial experimental design with two factors was set up for this study. The first factor is the type of structural material in the core layer of mixed panel; this factor is qualitative and has two levels: coarse wood particles versus wood fibres. The second factor is the ratio of white birch outer bark particles in the surface layers; this factor is quantitative and has three levels: 35, 40 and 45% (by weight of oven-dry material used to manufacture panel). The objective of this study is to manufacture all panels from the above mentioned factorial experiment, then to measure their physical and mechanical properties

and finally to select the best panel with the help of statistical analysis carried out in a randomized complete block design.

6.2 Material and methods

6.2.1 White birch outer bark particles preparation

The barks were obtained from sawmill Thomas Louis Tremblay Inc. of Ste-Monique located in the North of Québec, Canada. The proportion of sapwood in those barks was approximately 8% of their oven-dry weight. They were dried at room temperature for ten days to 9% moisture content and then reduced to bark particles with the help of hammer mill (Jeffrey) and refiner (Pallmann). The inner bark was separated from the outer one by screening. The dust was eliminated by the means of 0.25 mm mesh vibrating horizontal screen. The size of inner bark particles finally obtained was between 0.25 mm and 1 mm. They were dried to 3% moisture content in a laboratory-type dryer. The black spruce fibres used were obtained from Uniboard Canada Inc, MDF La-Baie, Ville-de-la-Baie, Québec, Canada. The wood particles used (a mixture of spruce, fir and pine) were obtained from TAFISA in Lac-Mégantic, Québec, Canada.

6.2.2 Experimental design

The preliminary tests enable to set up a three layers mixed panel with white birch outer bark particles in the surface layers and wood fibres or particles in the core layer. The target density was 750 kg/m^3 and the thickness 11 mm. A factorial design with two manufacturing factors in a complete block design (CBD) was used. Blocking was used to prevent nuisance factor from known and controllable sources of variability (*Montgomery, 2005*). The first factor of the experiment was the type of material used in the core layer. This factor has two levels: wood fibre and wood particles. The second factor is the percentage of white birch outer bark particles used in the surface layers with three levels: 45, 40 and 35% (of oven-dry weight material used for the panel manufacture). The choice of these three percentages was made from the preliminary tests as follows: with more than 45 % white birch outer bark particles in the surface layers, the modulus of rupture and the modulus of elasticity of manufactured panel were weak and with less than 35% white birch outer bark particles in

the surface layers, the thickness swelling of manufactured panel was high. The total number of treatments per block resulting from the multiplication of both factors levels was $2 \times 3 = 6$. Each panel considered as an experimental unit was replicated four times to give a total of 24 panels. The identification of six treatments corresponding to six panel types per block is presented in Table 6.1. The experimental design (Table 6.2) was set up with the help of Plan procedure of SAS software to fulfill the randomisation principle that eliminates subjectivity and ensure the independency of errors. Three-layers reference wood panels to which the properties of the above mentioned panels were compared using the least significance difference test (LSD) in a complete random design (CRD) were fabricated.

Table 6.1 Description of panels' types

#	Types	Description
1	P _{p-35}	Wood particles in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 35% (by weight of oven-dry material used)
2	P _{p-40}	Wood particles in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 40% (by weight of oven-dry material used)
3	P _{p-45}	Wood particles in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 45% (by weight of oven-dry material used)
4	P _{f-35}	Wood fibres in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 35% (by weight of oven-dry material used)
5	P _{f-40}	Wood fibres in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 40% (by weight of oven-dry material used)
6	P _{f-45}	Wood fibre in the core layer. White birch outer bark particles in the surface layers is 45% (by weight of oven-dry material used)

Table 6.2 Experiment design obtained from the randomization

Number of block	Treatments					
1	1= P _{p-35}	5= P _{f-40}	3= P _{p-45}	4= P _{f-35}	6= P _{f-45}	2= P _{p-40}
2	4= P _{f-35}	2= P _{p-40}	1= P _{p-35}	5= P _{f-40}	6= P _{f-45}	3= P _{p-45}
3	5= P _{f-40}	3= P _{p-45}	2= P _{p-40}	1= P _{p-35}	4= P _{f-35}	6= P _{f-45}
4	2= P _{p-40}	4= P _{f-35}	1= P _{p-35}	5= P _{f-40}	3= P _{p-45}	6= P _{f-45}

6.2.3 Panel manufacture and tests

The manufacturing parameters are presented in Table 6.3. The particles for each panel were mixed in a rotating-drum mixer for 5 minutes. The panels were manually formed in a frame prior to their pressing. Tests samples were prepared based on ASTM D-1037-99 specifications and the result of each test was compared with the value of ANSI A208.1-1999 and ANSI A208.2-2002. The panels were conditioned at a temperature of 21°C and 65% relative humidity until they reached their equilibrium moisture content (two weeks). Then they were sanded to 11 mm final thickness before any test was carried out. A few samples of manufactured panels are represented on Figure 6.1.

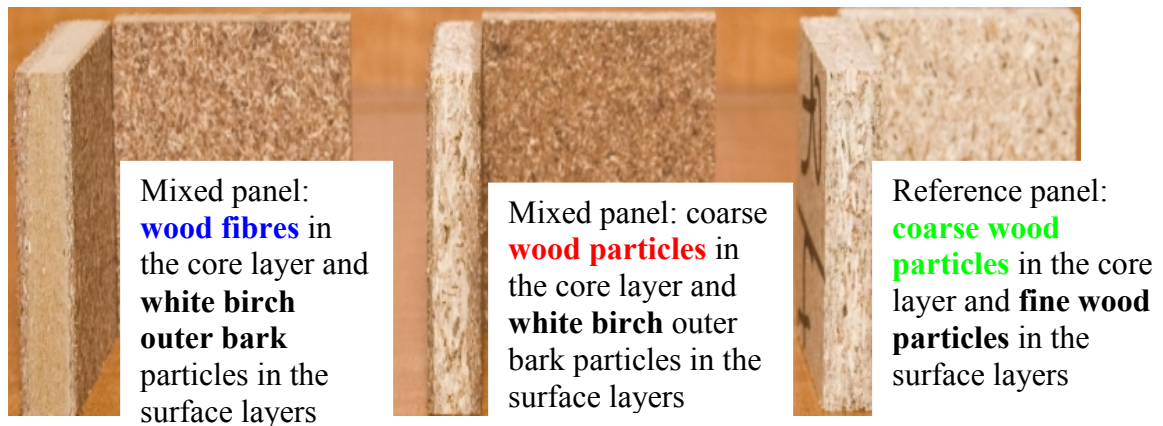
**Figure 6.1** Samples of manufactured panels

Table 6.3 Manufacturing parameters

Board size (width×length×thickness)	0.56 × 0.46 × 0.012 m (non-sanded) and 0.56 × 0.46 × 0.011 m (sanded)
Target board density	750 kg/m ³
Press platen temperature	180° C
Press pressure	180 KPa
The compaction ratio (Cr) = mat thickness / panel thickness was respectively: (85 mm) / (12mm) = 7 for panels with wood fibres in the core and (50 mm) / (12 mm) = 4 for panels with wood particles in the core	
Resin	Urea formaldehyde (Borden Casco-Resin TL-105, solid content: 65%). 11% UF (based on oven-dry material used) in the outer bark particles of surface layers, 7% in the wood particles of core layer and 14% in the wood fibres of core layer
Wax	0.5% (based on oven-dry material used) in the particles or fibres of core layer but no wax added to outer bark particles used in the surface layers because they are already hydrophobic
Catalyst added to UF used in the core to lower its pH-value from 7.8 to 7	Ammonium chloride (30%), [30 g NH ₄ Cl in 100 ml water solution]
Press closing time	26 seconds
Curing time	4 minutes
Press opening time	1 minute in three steps

6.2.4 Determination of mechanical and physical properties

The description of the method used is already done in section 5.2.4 of Chapter five.

6.3 Results and discussion

6.3.1 Results of mechanical properties

6.3.1.1 Density profile

The Figure 6.2 presents a typical density profile obtained from panels produced with wood particles and wood fibres in the core layer and from reference panel. Figure 6.2 shows that the substitution of wood particles by wood fibres in the core of mixed panels improves the regularity of density profile and increases the minimal value of the density in the core of manufactured panels. By comparing the density profile of mixed panel with bark particles in the surface layers with that of wood reference panel, it arises that the substitution of fine wood particles in the surface layers by white birch outer bark particles leads to a decreasing of the minimal density value and improves the flattening of density profile in the core layer of manufactured panels.

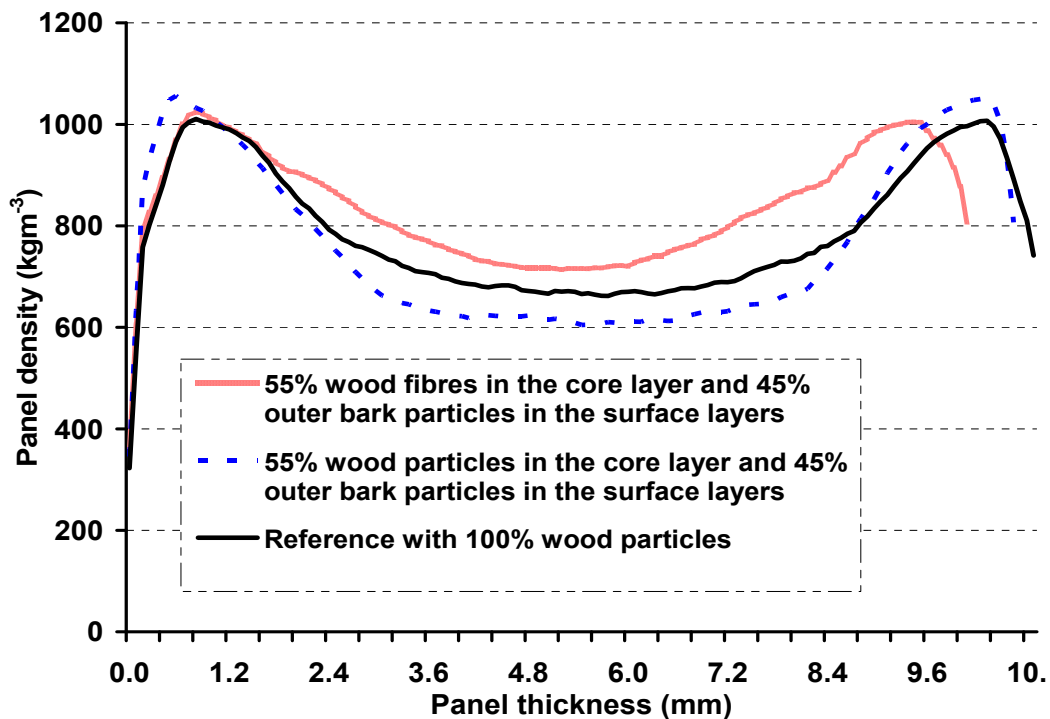


Figure 6.2 Typical density profiles of reference panel made from 100% wood particles and mixed panels with white birch outer bark particles in the surface layers, wood particles or wood fibres in the core layers

6.3.1.2 Specific density of panels

The Figure 6.3 represents the specific density of each type of panel. This density is an average value of three samples used for each panel to determine its modulus of elasticity and its modulus of rupture. The measured density of each panel is above the target density of 750 kg/m^3 represented by the red line in Figure 6.3, especially with the panels having wood fibres in their core. The first reason was the sanding which has lowered the thickness of panels used in such a way the final thickness was lower than 11 mm. It would have been better to fabricate panel thicker than 12 mm in order to get the final target thickness of 11 mm after sanding. The second reason was the difficulty to level mat thickness because it was formed manually. A solution to this problem would be to fabricate panels thicker than 12 mm in the aim of getting a final thickness close to the target value after sanding. Only the specific density of panel with 40% bark particles in the surface and wood particles in the core is almost the same as that of reference panel, and both panels have the lowest value of specific density close to the target. Panels with wood fibres in the core have the highest value of specific density and the highest value of standard deviation, which can be explain by the thickness shrinkage of core layers with wood fibres during their conditioning.

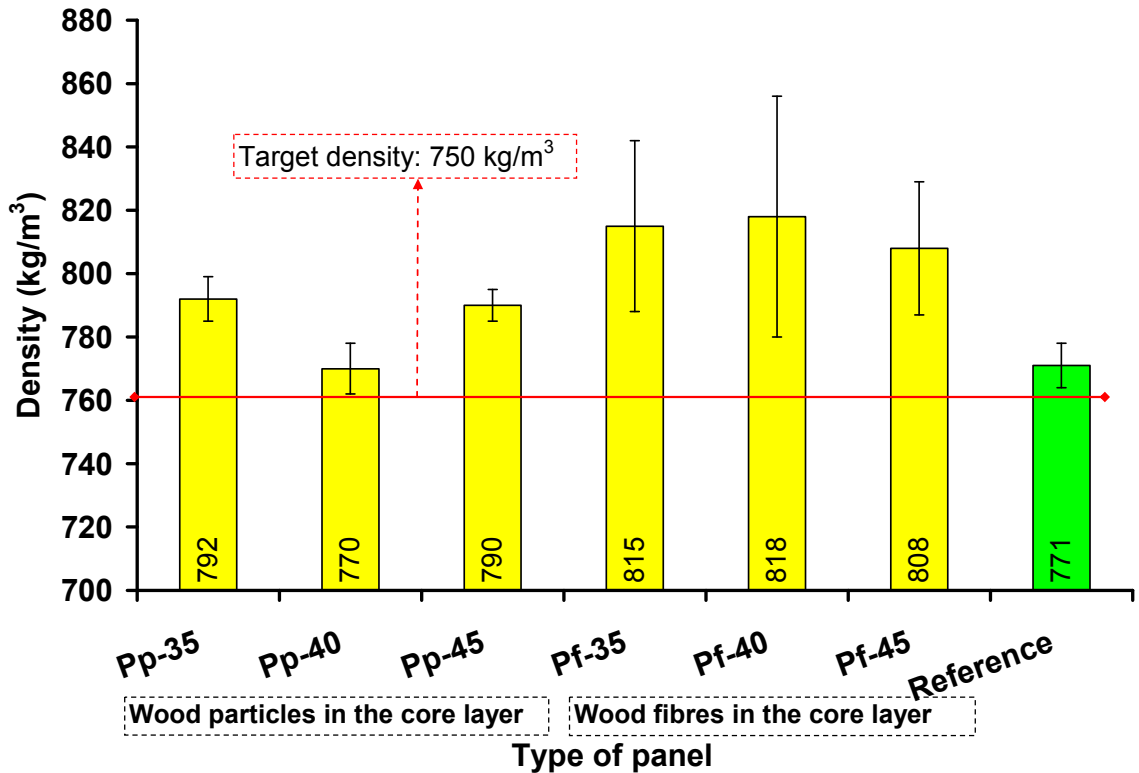


Figure 6.3 Average specific density of panels (mean values and standard deviations)

6.3.1.3 Modulus of elasticity

The results obtained for the modulus of elasticity (MOE) are presented in Figure 6.4. The MOE of all panels with wood particles in the core layer met the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 1725 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. The MOE of all panels with wood fibres in the core layer passed the grade 120 requirements for medium density fiberboards (MDF). But these MOE values are significantly lower than that of reference panel. The results of variance analysis (ANOVA) showed that the type wood material used in the core layer as well as the percentage of outer bark particles in the surface layers of mixed panels were highly significant but the interaction between them was not significant for the MOE (Table 6.4). Figure 6.4 shows that the best panel for MOE is P_{p-35}, panel with wood particles in the core layer and 35% outer bark particles in the surface layers.

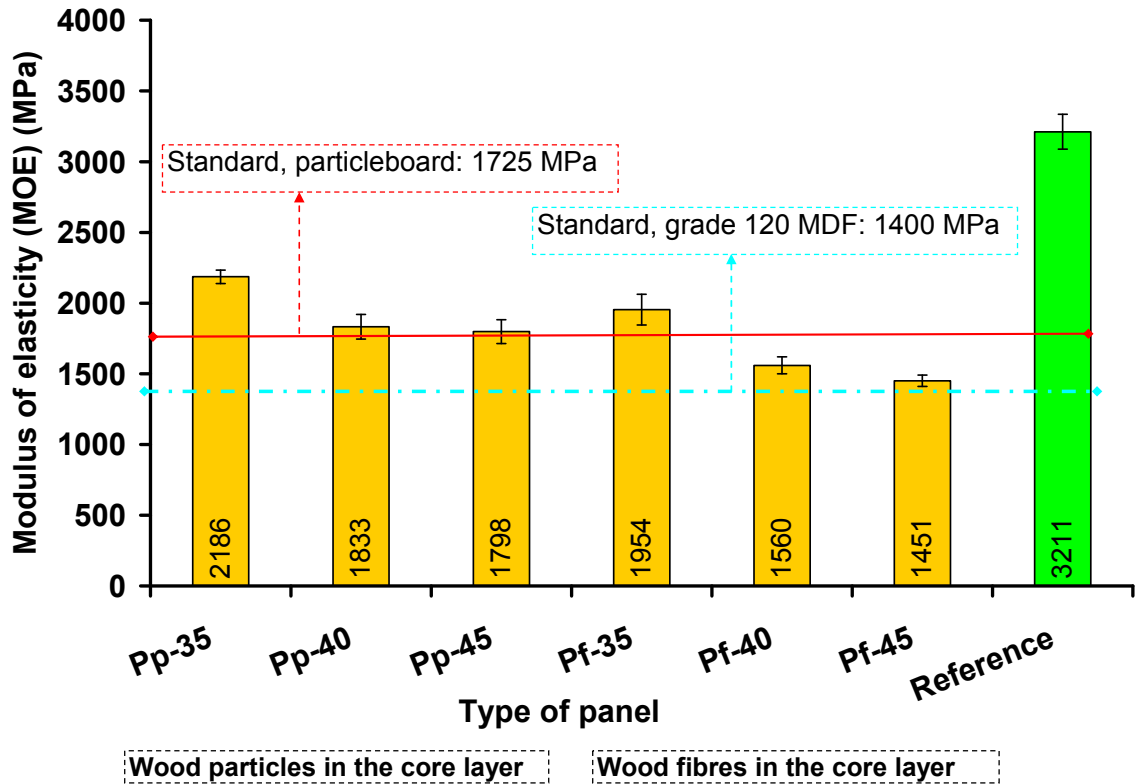


Figure 6.4 Modulus of elasticity (MOE) (mean values and standard deviations)

6.3.1.4 Modulus of rupture

The results obtained for the modulus of rupture (MOR) are presented in Figure 6.5. The MOR of all panels with wood particles in the core layer met the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 11 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. The MOR of all panels with wood fibres in the core layer passed the grade 120 requirements for MDF. The MOR values of panels with wood particles in the core were lower than that of reference. It is a proof that the substitution of fine wood particles in the surface layers of panels by bark particles lead to a decrease of MOR because outer bark particles of white birch are not structural materials like wood. Panels with respectively 35 and 40% bark particles in the surface and wood fibres in the core have a MOR greater than that of reference panel, although they have outer bark particles in their surface layers. The results of variance analysis (ANOVA) showed that the wood material used in the core layer, the percentage of outer bark particles in the surface layers of mixed panels were highly significant and the interaction between them was significant for the MOR (Table

6.4). Figure 6.6 shows that, the best panel for MOR is P_{f-35} (with 35% outer bark particles in the surface layers and wood fibres in the core layer).

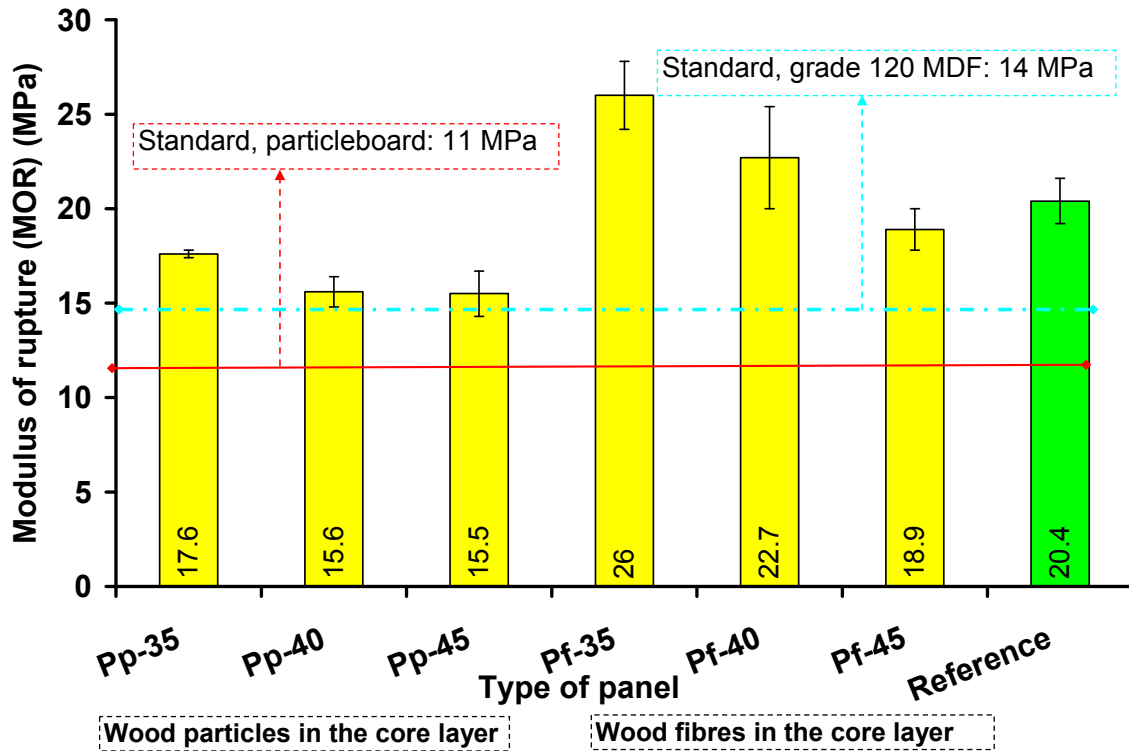


Figure 6.5 Modulus of rupture (MOR) (mean values and standard deviations)

6.3.1.5 Internal bond

The results obtained for the internal bond (IB) are presented in Figure 6.6. The IB of all panels with wood particles in the core layer met the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 0.40 MPa according to ANSI A208.1-1999 standard. The IB of all panels with wood fibres in the core layer passed the grade 120 requirements for MDF. The IB values of all panels except P_{p-35} (with 35% outer bark particles in the surface layers and wood particles in the core layer) are lower than that of reference panel. Figure 6.6 shows that, within the group of mixed panel with wood particles in the core layer, the IB decreases with an increase percentage of outer bark particles in the surface layers. It is a proof that the substitution of fine wood particles by outer bark particles in the surface layers of panel lead to a decrease of IB because outer bark of white birch is not a

structural material like wood. During the IB test, the rupture was mostly obtained in the outer bark particles of surface layers. The variance analysis (ANOVA) showed that the wood material used in the core layer, the percentage of outer bark particles in the surface layers of mixed panels and the interaction between them were highly significant for IB (Table 6.4). The highest value of IB was obtained with Panel P_{p-35} (with 35% outer bark particles in the surface layers and wood particles in the core layer).

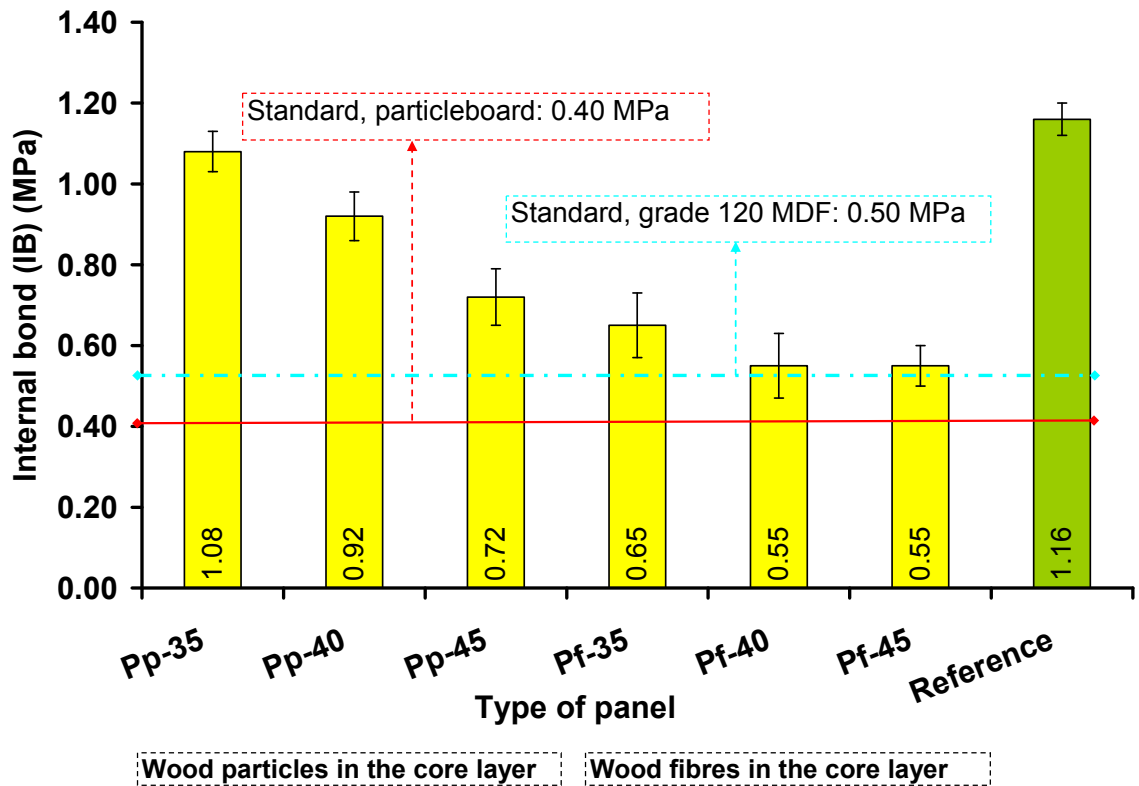


Figure 6.6 Internal bond (IB) (mean values and standard deviations)

6.3.2 Results of physical properties

6.3.2.1 Thickness swelling

The results obtained for the thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking are presented in Figure 6.7. There is no specification for this property for particleboards according to ANSI A208.1-1999. The TS of all panels with wood fibres in the core layer passed the grade 120 requirements for MDF [The specification of TS according to ANSI A208.2-2002 is normally 1.5 mm for grade 120 MDF. Its corresponding value in

percentage which is $100 \times (1.5/11) = 13.6\%$ was used in this study. 11 mm is the panel thickness]. All mixed panels swelled more than reference panel after 2 and 24 hours water soaking. The reason is the relative weak adhesion between wood particles and bark particles at the interface between the core layer and the surface layers. The variance analysis (ANOVA) showed that the type wood material used in the core layer was not significant, but the percentage of outer bark particles in the surface layers of mixed panels was highly significant. The interaction between the above mentioned two factors was highly significant for the TS (Table 6.4). Figure 6.7 shows that the best panel is P_{p-45} (with 45% outer bark particles in the surface layers and wood particles in the core layer).

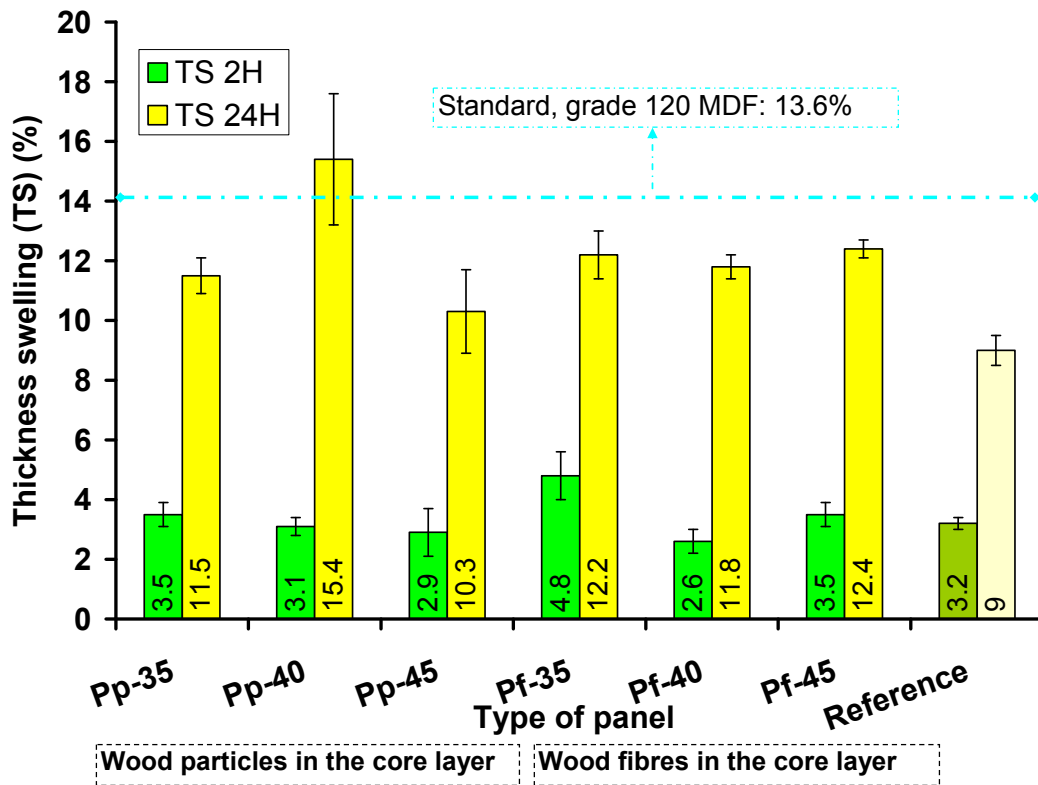


Figure 6.7 Thickness swelling (TS) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)

6.3.2.2 Water absorption

The results obtained for the water absorption after 2 and 24 hours water soaking are presented in Figure 6.8. There is no specification for this property according to ANSI A208.1-1999 standard. The results of mixed panels for the measured properties are compared with that of wood reference panel. Almost mixed panels have absorbed more water than the wood reference panel after 2 and 24 hours water soaking. The reason is the same as that explained in the above paragraph about thickness swelling. Water has been absorbed mainly absorbed from the panel side, because the outer with birch bark used in the surface layers is almost waterproof.

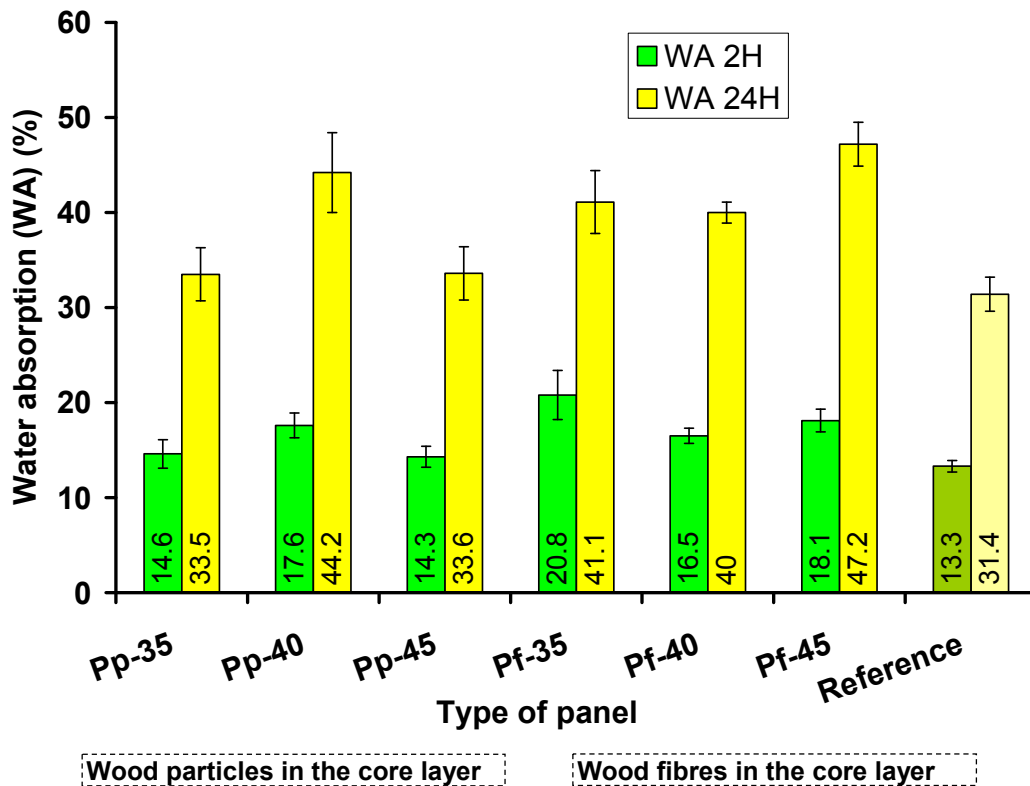


Figure 6.8 Water absorption (WA) after 2 and 24 hours water soaking (mean values and standard deviations)

6.3.2.3 Linear expansion

The results obtained for the linear expansion (LE) are presented in Figure 6.9. The most important information from these histograms is that all manufactured panels passed the requirements of M-1 grade particleboard for interior use which is 0.35% according to ANSI

A208.2-1999 standard. Panels with wood particles in the core were dimensionally more stable than those with wood fibres. Mixed panels with wood particles in the core were also dimensionally more stable than the wood reference panel.

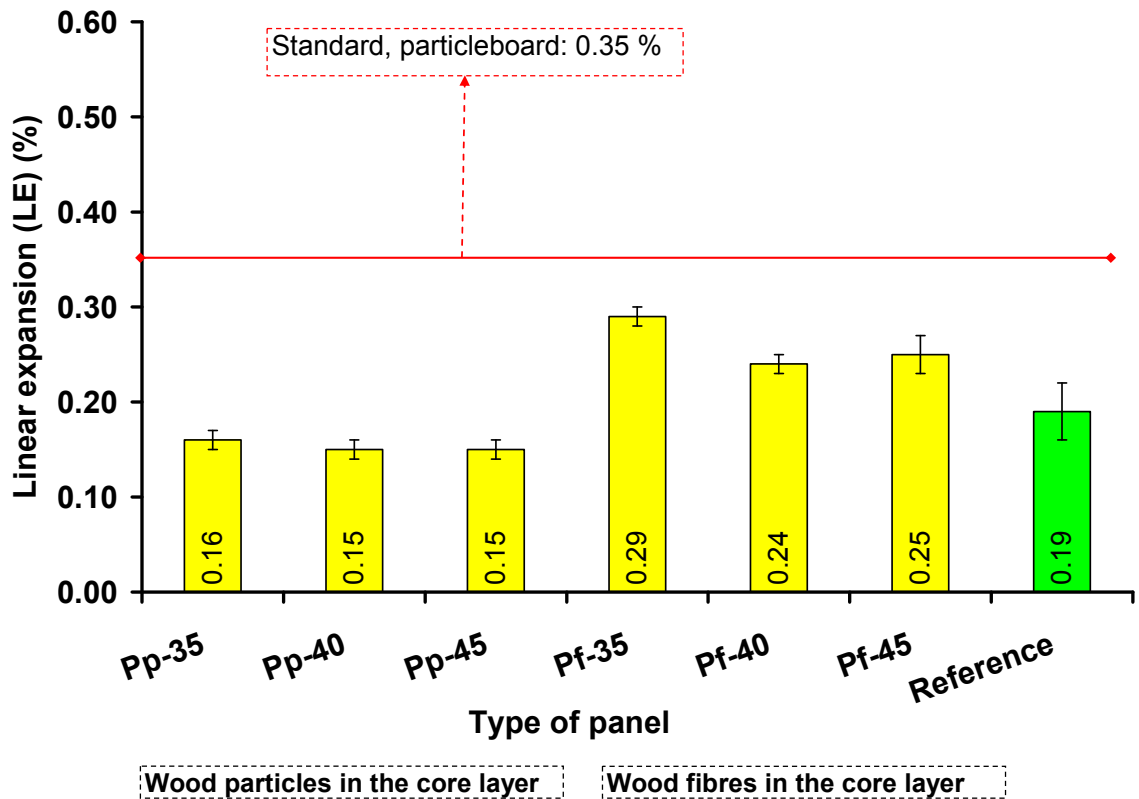


Figure 6.9 Linear expansion (LE) (mean values and standard deviations)

6.3.2.4 Thickness swelling

The results obtained for the thickness swelling (TSw) are presented in Figure 6.10. The TSw of all mixed panels is smaller than that of wood reference. It means that the mixed panels were more stable than the reference panel when the thickness direction was taken in to account. The TSw of panels with wood fibres in the core layer was lower than that of mixed panels with wood particles in the core layer. The reason of that difference can be explained by the good compaction of fibres in the core as showed in Figure 6.2 of density profile, where the curve representing the profile of panel with wood fibres in the core is above that representing the profile of panel with wood particles in the core. The TSw

decreased with an increase of outer bark particles ratio used in the surface layers (Figure 6.10).

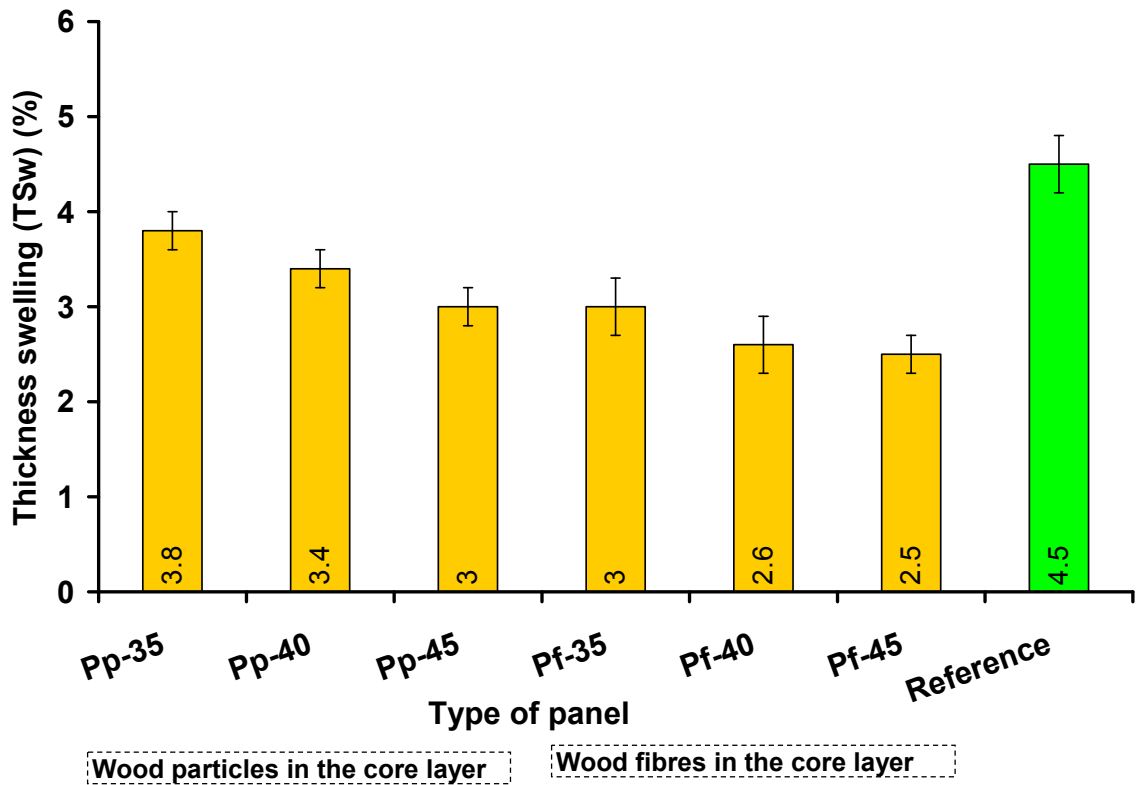


Figure 6.10 Thickness swelling (TSw) (mean values and standard deviations)

6.3.3 Analysis of variance

The summary of variance analysis (ANOVA) is presented in Table 6.4. In this study, ANOVA was applied only on the main properties described by the standard (MOR, MOE, IB, TS and LE). The F values of treatments of all properties tested were significant but the F value associated to blocking for each property tested was not significant. It is a proof that there was no blocking effect and that the results could have been also analysed in a complete random design (CRD). The wood material use in the core of manufactured panels has a highly significant effect on all the properties tested. It is therefore a proof that there is a significant difference between panels with respectively wood particles and wood fibres in their core. The variation of bark percentage used in the surface layers has a highly

significant effect on all physical and mechanical properties tested with the exception of thickness swelling, where this effect is not significant.

Table 6.4 Summary of variance analysis (ANOVA). MOR= modulus of rupture, MOE= modulus of elasticity, IB= internal bond, TS= thickness swell, LE= linear expansion,

Source of Variation	Mechanical and physical properties (F values)					
	df	MOR	MOE	IB	TS	LE
Blocks	3	1.30 ns	0.71 ns	1.35 ns	3.83 ns	0.50 ns
Wm	1	81.86**	61.09**	109.87**	0.23 ns	284.78**
%	2	14.52 **	51.88**	19.09**	9.22**	9.24**
Wm × %	2	4.53*	0.85ns	6.59**	13.93**	4.50*
Contrasts						
Wm	1	81.86**	61.09**	109.87**	0.23**	284.78**
%L	1	28.78 **	100.44**	37.84**	0.93 ns	13.23**
%Q	1	0.27 ns	15.32**	0.34ns	17.50**	5.25*
wm × %L	1	8.46 *	1.65 ns	12.09**	1.41 ns	5.36*
wm × %Q	1	0.59ns	0.05ns	1.09ns	26.44 **	3.65ns

Meaning of abbreviations used in the table: **df** = degree of freedom, **wm** = wood material in the core layer, **%**= percentage of outer bark particles of white birch in the surface layers. **%L**= linear effect of %, **%Q**= quadratic effect of %, **wm × %L**= interaction between wm and %L, **wm × %Q**= interaction between wm and %Q, ns= non-significant, * significant at 0.05 probability level, ** significant at 0.01 probability level.

The Figures 6.11, 6.12, 6.13 and 6.14 illustrate all significant interactions. The standard errors (S.E) associated with these interactions were computed using the formula

$$S.E. = \sqrt{\frac{M.S.E}{r * n}}$$

where M.S.E is the mean square of experimental error of ANOVA, r the

number of replicate and n the number of hidden replicates (Collin, 2003). In the case of this study n= 1 because there are only two factors. The results are presented in Table 6.5. The S.E. are represented on the interaction plots of Figures 6.11, 6.12, 6.13 and 6.14 by the bars

whose length is twice the standard error value. The bars overlap where the interaction is not significant. Figures 6.11, 6.12, 6.13 and 6.14 enable to do the following interpretation: the modulus of rupture (MOR) and the internal bond (IB) decrease when the percentage of bark particles in the surface increases. The MOR of panels with wood fibres in the core is higher than that of panels with wood particles in the core. The IB of panels with wood particles in the core is stronger than that of panels with wood fibres in the core. The value of thickness swelling (TS) increases in the panels with wood particles the core, when the percentage of bark particles in the surface increases from 35 to 40 % and decreases, when that percentage increases from 40% to 45%. The opposite phenomenon happens with the use of wood fibres in the core. Panel with wood particles in the core layer were stable dimensionally than those with wood fibres in the core layer.

Table 6.5 Standard error (S.E) associated with significant interactions

Interactions	Standard error associated with significant interactions				
	MOR	MOE	IB	TS	LE
wm × %	0.86	ns	0.037	0.668	0.008

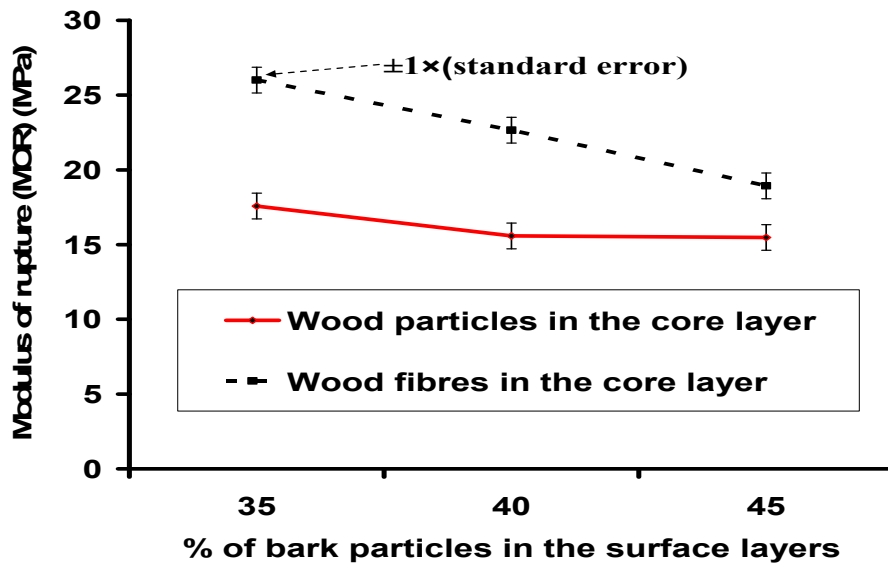


Figure 6.11 Interaction plots for modulus of rupture

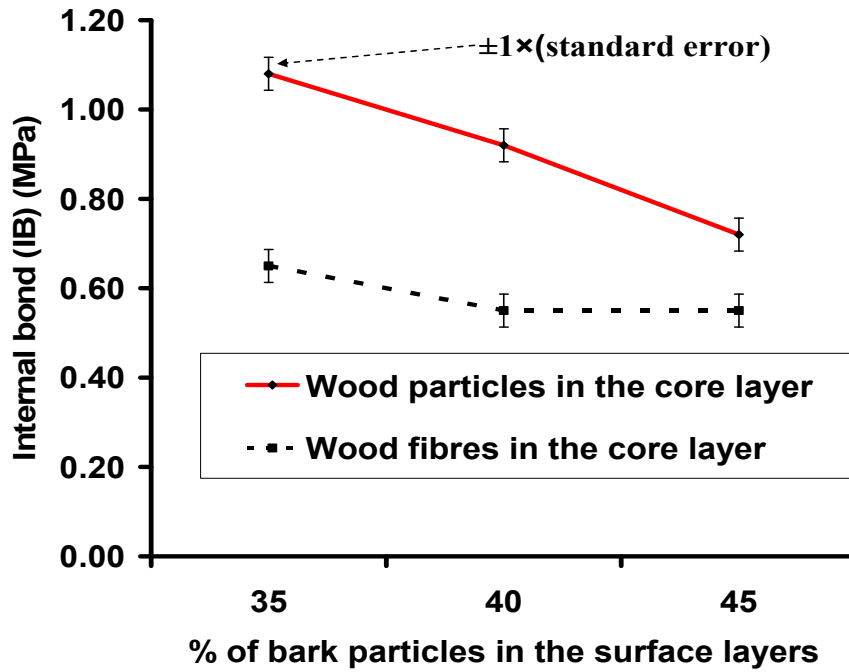


Figure 6.12 Interaction plots for internal bond

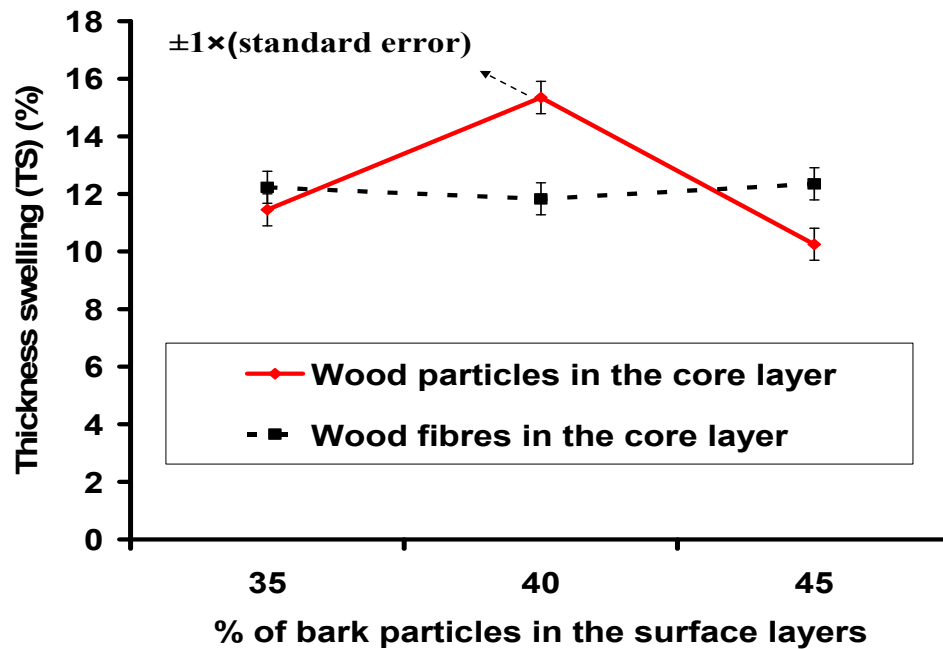


Figure 6.13 Interaction plots for thickness swelling (TS) after 24 hours water soaking

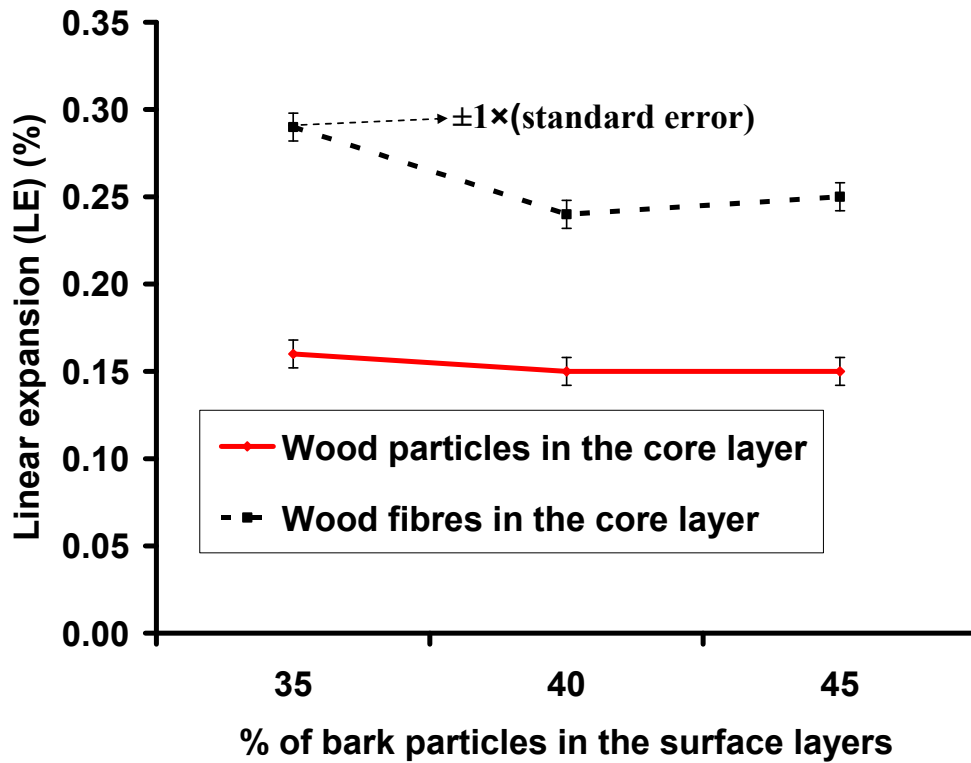


Figure 6.14 Interaction plots for linear expansion

6.3.4 Result of comparison test using LSD (least significant difference) test

LSD was used to compare only mixed panels with reference panel but not to compare mixed panels among them because the statistical analysis has already been done in a factorial design. The results are presented in Table 6.6. Mixed panel sharing the same letter with the reference panel is no different from this latter for the measured property. Therefore, the MOR and MOE values of mixed panels with wood particles in the core layer were significantly lower than those of reference panel, the IB and LE values of panel P_{p-35} with wood particles in the core layer and 35% bark particles in the surface layers were not different from those of reference panel and the TS of panel P_{p-45} with wood particles in the core layer and 45% bark particles in the surface layers was not different from that of reference panel.

Table 6.6 Comparison of mixed panels with the reference panel (100% wood particles) with the help of LSD (least significant difference) test

Types of panels	Means				
	MOR (MPa)	MOE(GPa)	IB (MPa)	TS (%) (after 24 hours water soaking)	LE (%)
P _{p-35}	17.6 de	2.186 b	1.08 a	11.45 cb	0.16 cd
P _{p-40}	15.6 e	1.832 cd	0.92 b	15.35 a	0.15 d
P _{p-45}	15.5 e	1.797 d	0.72 c	10.25 cd	0.15 d
P _{f-35}	26.0 a	1.954 c	0.65 cd	12.22 b	0.29 a
P _{f-40}	22.7 b	1.560 e	0.55 d	11.83 cb	0.24 b
P _{f-45}	18.9 cd	1.450 e	0.55 d	12.35 b	0.24 b
P _{reference}	20.4 bc	3.211 a	1.16 a	9.00 d	0.19 c

Means with the same letter are not significantly different, MOR = modulus of rupture, MOE = modulus of elasticity, IB = internal bond, TS = thickness swelling, LE = linear expansion

6.4 Conclusion

Preliminary investigations showed that it was not possible to manufacture panels which meet requirements of standard for the panels of type M-1 for interior use by using only white birch outer bark particles. An alternative method was to manufacture mixed panels (grade M-1) with white birch outer bark particles in the surface reinforced separately by wood particles and wood fibres in the core. Mixed panels with wood particles in the core met the requirements of ANSI A208.1-1999. Mixed panels with wood fibres in the core layer also passed the grade 120 requirements for MDF.

Mixed panels with wood particles in the core layer afforded the lowest values of MOR and LE, and the highest value of IB. The lowest value of TS was obtained with P_{p-45}, panel with wood particles in the core layer and 45% bark particles in the surface layers.

The statistical analysis method used to facilitate the interpretation of physical and mechanical properties results also enabled to choose all panels with wood particles in the core layer as the best especially by taking into account the dimensional stability from the measurement of linear expansion.

The method set up enabled to valorize more than 40% outer bark particles of white birch in each manufactured panel.

An alternative solution to improve the bonding quality of resin used at the interface between outer bark particles of white birch and wood particles would be to use pMDI (polymeric methylene bis(phenylisocyanate)). However, more researches are necessary at this point.

CHAPITRE 7: EFFET DE LA SUBSTITUTION DES PARTICULES FINES DE BOIS DES COUCHES COUVRANTES DES PANNEAUX PAR LES PARTICULES D'ÉCORCE EXTERNE DE BOULEAU BLANC SUR SES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES

Résumé

L'hydrophobicité des particules d'écorce externe de bouleau est un avantage pour leur utilisation dans les couches couvrantes des panneaux mixtes avec les particules de bois au centre et destinés à une utilisation en milieu humide. De ce constat fait lors de la phase d'essais, un panneau mixte de 8 mm d'épaisseur, de masse volumique cible 800 kg/m^3 a été conçu sur la base de deux facteurs. Le premier facteur est le traitement à la soude, il est qualitatif et a deux niveaux : les écorces non traitées versus les écorces traitées. Le second facteur est les pourcentages de la phénol-formaldéhyde (PF) utilisée pour encoller les particules d'écorce. Il est quantitatif et a trois niveaux (5, 6,5 et 8%). Ces deux facteurs ont permis d'analyser statistiquement les résultats des propriétés des panneaux fabriqués dans un plan factoriel en blocs complets. Tous les panneaux fabriqués ont rencontré les exigences de la norme des panneaux destinés à être utilisés comme sous-plancher. Le traitement à la soude faite sur les particules d'écorce a plutôt rabaissé les propriétés des panneaux mixtes fabriqués. L'utilisation des particules d'écorce non traitées a permis d'avoir des panneaux mixtes ayant des propriétés physiques supérieures à celles du panneau de référence en bois. L'analyse statistique a permis de choisir le panneau mixte avec les écorces non traitées et encollées avec le plus petit pourcentage de la PF (5%) comme le meilleur du groupe, surtout en se basant sur la stabilité dimensionnelle.

Abstract

The hydrophobicity of white birch outer bark particles is an advantage for their use in the surface layers of mixed panels with coarse wood particles in the core layer and for humid environment application. This observation was done when the preliminary tests were carried out and permitted in the case of this research project, to set up a mixed panel

described as follow: thickness 8 mm, target density targets 800 kg/m³. Two factors were used in its conception. The first factor was soda treatment which was qualitative and had two levels: untreated barks and soda-treated barks. The second factor was the phenol formaldehyde resin content used to bond bark particles which was quantitative and had three levels: 5, 6.5 and 8%. A statistical analysis of mechanical and physical properties of manufactured panels was performed in a complete block design. All manufactured panels met the standard requirements of sub floor panels. The soda treatment of bark particles lowered the properties of manufactured mixed panels. The use of untreated bark particles enabled to obtain mixed panels having better physical properties values than those of wood reference panel. With the help of statistical analysis, the mixed panel with untreated bark particles bonded with the lowest PF resin content (5%) was chosen as the best in the group, especially by taking into consideration the dimensional stability criterion.

7.1 Introduction

Dans le Chapitre 4 de cette thèse, les particules d'écorce interne de bouleau blanc ont été séparées des particules d'écorce externe de la même espèce. Elles ont été utilisées dans la couche médiane d'un panneau mixte renforcé dans les couches couvrantes avec les fibres de bois. Au chapitre 5, les particules de la partie externe de cette écorce ont été utilisées dans la fabrication d'un autre type de panneau mixte renforcé dans la couche médiane avec les particules grossières de bois ou les fibres de bois. L'utilisation séparée de ces deux parties d'écorce est due à la grande différence qui existe entre leurs propriétés. (*Fengel et Wegener, 1989*). Ce chapitre porte sur un troisième type de panneau de 8 mm d'épaisseur, où les particules d'écorce externe de bouleau remplacent dans les couches couvrantes les particules fines de bois. Ce type de panneau n'a jamais été fabriqué industriellement. L'écorce externe de bouleau n'est pas structural comme le bois parce que son taux de cellulose est très faible (*Lundqvist et Back, 1976*). C'est pour cette raison qu'il est difficile de fabriquer les panneaux trois couches constitués uniquement de ce type de matériau qui rencontrent les exigences de la norme des panneaux de grade PBU pour les sous-planchers (Tableau 7.1). *Lundqvist et Back (1976)* ont fabriqué des panneaux à base d'écorce externe de bouleau (*Betula verrucosa*) en les renforçant dans les couches couvrantes avec les particules de bois afin que leurs propriétés rencontrent la norme. Fort de ce constat, ces

auteurs affirment que la manière la plus raisonnable d'utiliser ce type d'écorce est de le mettre au centre d'un panneau avec les couches couvrantes en matériaux conventionnels.

Tableau 7.1 Exigence des panneaux sous-planchers (ANSI 208.1-1999)

Grade	MOR (MPa)	MOE (MPa)	CI (MPa)	Dureté (N)	GE	DL (%)	Émission FA (ppm)
PBU	11,0	1725	0,40	2225	1,6 mm	0,35	0,20
D-2	16,5	2750	0,55	2225	8%	0,30	
D-3	19,5	3100	0,55	2225	8%	0,30	

PBU= sous-plancher; **D**= toiture, **MOE**= module d'élasticité; **MOR**= module de rupture; **CI**= cohésion interne; **GE**= gonflement en épaisseur; **DL**= dilatation linéaire, **FA**= formaldéhyde

Plusieurs travaux sont de plus en plus effectués à l'échelle du laboratoire sur l'utilisation des matériaux non structuraux et des matériaux recyclés dans la fabrication de panneaux (*Youngquist et al., 1993a, 1993b, 1994*). Ces matériaux sont considérés en majorité comme des produits à valeur ajoutée. Tout comme les particules d'écorce externe de bouleau, les résidus agricoles sont aussi non structuraux, et utilisés des nos jours pour la fabrication de panneaux. Les plus connus sont : la paille du riz, la tige du coton, la bagasse de la canne à sucre (*Heslop, 1997; Pan et Cathcart, 2004*), la paille du blé (*Han et al., 1998; Wang et Sun, 2002; Mo et al., 2003*), les tiges du tournesol (*Khristova et al., 1998*), les cosses et les épis de maïs (*Sampathrajan et al., 1992*). Cette ruée vers la fabrication de panneaux à base des produits secondaires d'agriculture est une preuve de l'utilisation optimale de ces résidus (*Lehmann et Geimer, 1976*). Certains de ces produits secondaires comme la tige de coton ont des fibres similaires à celles des espèces feuillues (*Gencer et al., 2001*).

L'objectif de ce travail consiste à mettre sur pied un panneau mixte de 8 mm d'épaisseur avec les particules grossières de bois dans la couche médiane et les particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes dont les propriétés mécaniques et physiques rencontrent les exigences des panneaux sous-planchers. Pour cela une investigation de l'effet de traitement à la soude des particules d'écorce externe de bouleau

blanc utilisées et de la variation du pourcentage de la résine PF utilisée pour les encoller a été faite. Les tests physico-mécaniques ont été aussi faits sur tous les types de panneaux fabriqués afin de sélectionner le meilleur panneau du lot à l'aide d'une analyse statistique effectuée dans un plan en blocs complets.

7.2 Matériel et méthodes

7.2.1 Préparation des particules d'écorce externe de bouleau

La provenance des particules et leur préparation sont expliquées dans le chapitre 6 à la section 6.2.1.

7.2.1.1 Traitement à la soude des particules d'écorce externe de bouleau blanc

Le traitement à la soude utilisé a été adopté suite à une série d'essais. Le but de ce traitement (à la soude 1%) était d'altérer la couche de subérines à la surface des particules d'écorce externe de bouleau qui agit comme du téflon pour favoriser sa mouillabilité lors de l'encollage à l'adhésif PF. Lors de la première phase d'essai, l'écorce externe est extraite à l'échelle microscopique dans une solution de soude 1% dans la proportion 2 g d'écorce pour 100 ml de cette solution comme décrit la norme ASTM D 1109 (Standard Test Method for 1% Sodium Hydroxide Solubility of Wood). La solution et son contenu sont portés à ébullition pendant 30 minutes. Après ce temps tous les particules d'écorce se sont dissoutes et passées en solution. Ce traitement pourtant normé a été très sévère pour l'écorce externe de bouleau. Comme solution alternative, un traitement à froid a été fait. Une masse de 6 kg de particules d'écorce a été pesée et introduite dans le mélangeur rotatif. La solution de soude a été préparée au préalable en dissolvant 200 g de soude pure dans un litre d'eau déminéralisée. Cette solution a été projetée pendant trois minutes sur les particules d'écorce externe de bouleau par l'intermédiaire du pulvérisateur à pression du mélangeur. Par la suite, le mélangeur a été lassé en rotation pendant dix minutes afin que les surfaces des particules soient bien imprégnées. Enfin, les particules ont été enlevées du mélangeur et séchées d'abord à la température de la pièce et par la suite dans un petit séchoir à 70 ° C jusqu'à un taux d'humidité de 2%, avant d'être utilisées dans la fabrication de panneaux.

7.2.2 Essais préliminaires

Les résultats des essais préliminaires ont montré que seuls les panneaux monocouches fabriqués à base de particules d'écorce externe de bouleau avec une granulométrie inférieure à 1 mm avaient une cohésion interne qui rencontrait la norme. Mais le défaut de ces panneaux était leur module de rupture et leur module d'élasticité qui étaient restés faibles. Fort de ce constat, la meilleure solution à ce problème consistait à concevoir un panneau mixte à base d'écorce externe de bouleau renforcé par les particules de bois. Ce type de panneau devant être utilisé surtout comme un panneau sous-plancher ou un panneau mural, il a été jugé nécessaire de mettre les particules grossières de bois au centre et les particules d'écorce externe de bouleau dans les couches couvrantes afin de mieux le protéger contre l'humidité et les possibles infiltrations d'eau par la surface. La conception de ce panneau s'est faite sur la base de deux facteurs qui sont le pourcentage de la phénol-formaldéhyde (PF) utilisée pour encoller les particules d'écorce et le type de traitement subi par ces particules d'écorce. Le pourcentage de la résine phénol-formaldéhyde a été choisi comme un facteur afin de déterminer précisément la quantité de la colle à utiliser dans ces particules pour avoir des panneaux ayant des propriétés physico-mécaniques optimales. Des teneurs en résine PF de 5%, 6,5% et 8% (du poids des particules anhydres d'écorce à encoller) ont été choisis comme les trois niveaux de ce premier facteur. Le facteur pourcentage est quantitatif avec des espacements égaux (espacement de 1,5%) dans le but de faciliter l'analyse statistique. Le type de traitement est choisi comme second facteur afin d'évaluer son impact sur la mouillabilité des particules d'écorce externe de bouleau blanc qui sont par nature très hydrophobes. Ce facteur est qualitatif et a deux niveaux qui sont : les particules non traitées à la soude et les particules traitées à la soude.

7.2.3 Dispositif expérimental

La conception des panneaux de 8 mm d'épaisseur à trois couches avec les particules d'écorce externe de bouleau dans les couches couvrantes et les particules grossières de bois dans la couche médiane a été faite à partir des essais préliminaires tels que décrits à la section 7.2.2 de ce chapitre. La masse volumique cible de ce panneau était 800 kg/m^3 et son épaisseur 8 mm. Une expérience factorielle avec deux facteurs de fabrication comme décrite à la section 7.2.2 a été utilisée dans un plan en blocs complets pour mettre sur pieds

le plan d'expérience et faire une analyse statistique des résultats des tests effectués. Le blocage a été utilisé afin de prévenir le facteur de nuisance des sources de variabilité connues et contrôlables (*Montgomery, 2005*). L'expérience factorielle étant de type 2×3 il y a donc 6 traitements par bloc. Chaque bloc correspondant à une répétition, il y a un total de quatre répétitions puisque chaque type de panneau est répété quatre fois et un total de 24 panneaux ont été fabriqués. Chaque type de panneau est considéré comme une unité expérimentale. L'unité expérimentale est la plus petite unité qui reçoit un traitement (*Collin, 2003*). L'identification des six traitements est représentée dans le Tableau 7.2. Le plan d'expérience (Tableau 7.3) a été dressé à l'aide de la procédure plan du logiciel SAS afin de respecter le principe de la randomisation qui élimine la subjectivité et assure l'indépendance des erreurs. Un panneau de référence en bois a été fabriqué et les propriétés des panneaux mixtes fabriqués ont été comparées à celles de cette dernière à l'aide du test LSD (plus petite différence significative) dans un plan entièrement aléatoire.

Tableau 7.2 Description des types de panneau

	#	Types	Description
Écorces externes de bouleau blanc non traitées à la soude	1	P_{5%}	Panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 5% de colle PF
	2	P_{6,5%}	Panneau dont les particules d'écorce de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 6,5% de colle PF
	3	P_{8%}	Panneau dont les particules d'écorce de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 8% de colle PF
Écorces externes de bouleau blanc traitées à la soude	4	P_{s-5%}	Panneau dont les particules d'écorce de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 5% de colle PF
	5	P_{s-6,5%}	Panneau dont les particules d'écorce de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 6,5% de colle PF
	6	P_{s-8%}	Panneau dont les particules d'écorce de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 8% de colle PF

Tableau 7.3 Plan d'expérience obtenu de la randomisation

Numéro de bloc	Traitements					
1	4= P _{s-5%}	2= P _{6,5%}	5= P _{s-6,5%}	6= P _{s-8%}	1= P _{5%}	3= P _{8%}
2	1= P _{5%}	6= P _{s-8%}	2= P _{6,5%}	3= P _{8%}	4= P _{s-5%}	5= P _{s-6,5%}
3	5= P _{s-6,5%}	2= P _{6,5%}	1= P _{5%}	3= P _{8%}	4= P _{s-5%}	6= P _{s-8%}
4	5= P _{s-6,5%}	2= P _{6,5%}	3= P _{8%}	1= P _{5%}	6= P _{s-8%}	4= P _{s-5%}

7.2.4 Fabrication de panneaux et tests effectués

Les paramètres de fabrication sont présentés dans le Tableau 7.4. Les particules de chaque couche sont encollées dans un mélangeur rotatif pendant cinq minutes. L'ébauche de chaque panneau est faite manuellement dans une forme avant le pressage à chaud à l'aide de la presse Dieffenbacher équipée d'un système de contrôle de Press-Man ARC. Les panneaux sont conditionnés jusqu'au taux d'humidité d'équilibre dans une chambre où la température est 21°C et l'humidité relative 65%. Le conditionnement a duré un mois. Par la suite ils sont sablés jusqu'à l'épaisseur cible de 8 mm avant d'être découpés pour les différents tests. Quelques spécimens des panneaux fabriqués sont représentés à la Figure 7.1.

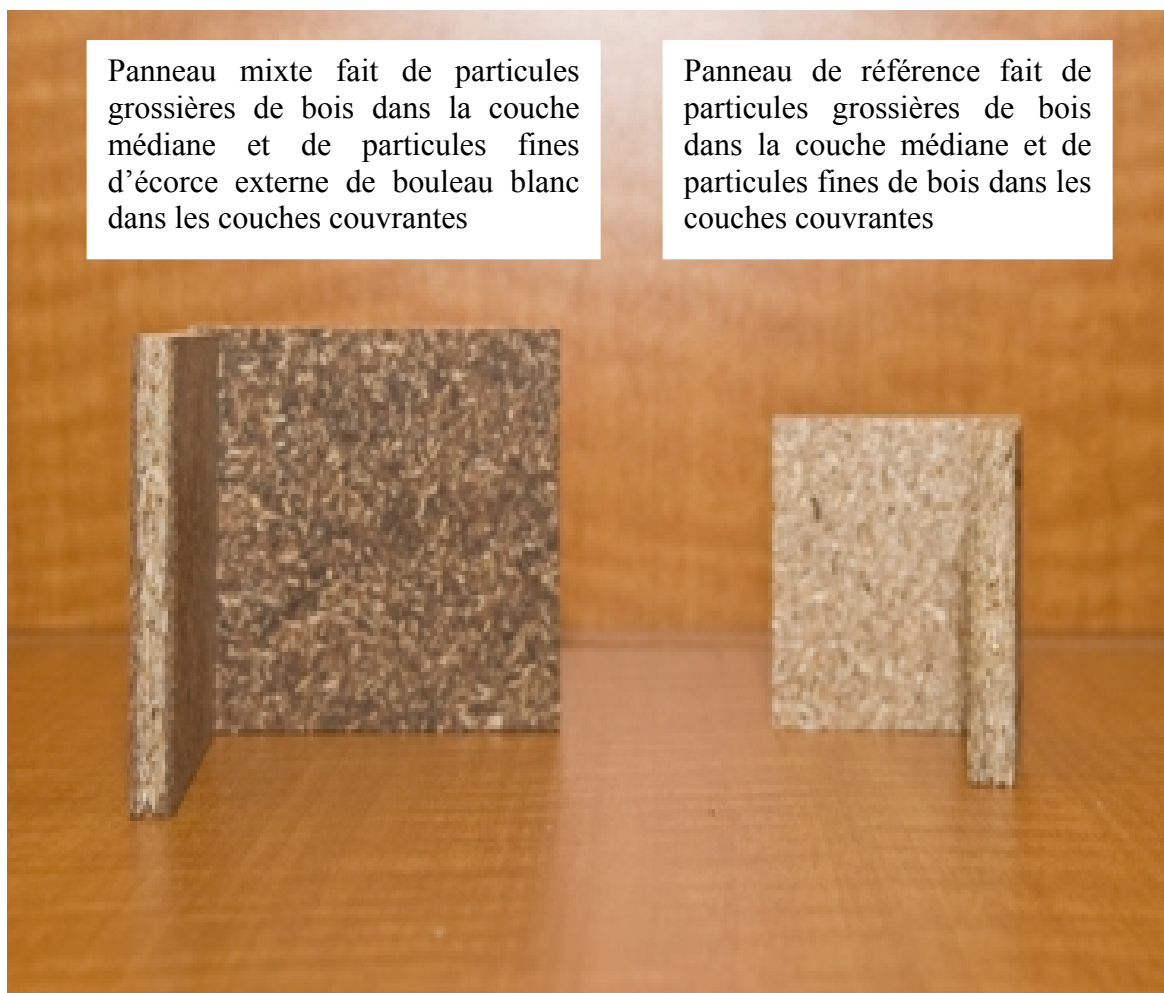


Figure 7. 1 Spécimens des panneaux fabriqués, vues de surface et de côté

Tableau 7.4 Paramètres de fabrication

Dimensions du panneau (longueur × largeur × épaisseur)	0,75 × 0,75 × 0,009 m (non-sablé) et 0,75 × 0,75 × 0,008 m (sablé)
Masse volumique cible	800 kg/m ³
Ratio de compression (Cr)*	5 panneaux avec particules d'écorce non traitées, 4,5 panneaux avec particules d'écorce traitées et 3,5 pour le panneau de référence
Proportion des couches couvrantes	45% (par rapport à la masse de toutes les particules sèches du panneau) pour tous les panneaux mixtes, 40% pour le panneau de référence
Proportion de la couche médiane	55% pour tous les panneaux mixtes, 60% pour le panneau de référence
Température des plateaux	180° C
Pression de la presse	180 KPa
Colle	Phénol-formaldéhyde (Borden Casco-Resin 52% de solide). 7% (basé sur la masse anhydre des particules) dans les particules grossières de bois de la couche médiane de tous les panneaux; 5; 5,6; ou 8% dans les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes; 9% dans les particules fines de bois des couches couvrantes du panneau de référence.
Temps de fermeture de la presse	26 secondes
Temps de polymérisation	4 minutes
Temps d'ouverture de la presse	1 minute avec trois paliers de décompression

*Cr = épaisseur de matelas/épaisseur de panneau

0,5% de cire (en masse anhydre des particules de la couche médiane) a été utilisé dans les particules de bois lors de leur encollage. Par contre elle n'a pas été utilisée dans les

particules d'écorce externe de bouleau blanc parce que ces particules sont déjà par nature très hydrophobes.

7.2.5 Détermination des propriétés physiques et mécaniques

Les spécimens pour les tests ont été préparés suivant les spécifications des normes ASTM D-1037-99 et le résultat de chaque test a été comparé à la valeur de la norme ANSI A208.1-1999. Les profils de masse volumique verticaux ont été faits à partir des spécimens destinés à la mesure de la cohésion interne avec un QMS X-ray density profiler, Model QDP-01X. Le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR) ont été obtenues d'une moyenne de 4 spécimens (2 dans le sens de la longueur et 2 dans le sens de la largeur du panneau) de 242 × 75 mm par panneau, La cohésion interne (CI) d'une moyenne de 6 spécimens de 50 × 50 mm par panneau, la dureté d'une moyenne de 3 spécimens de 150 × 75 mm par panneau, le gonflement en épaisseur (GE) et l'absorption d'eau (AE) d'une moyenne de 2 spécimens de 150 × 150 mm, la dilatation linéaire (DL) et la dilatation en épaisseur (DE) d'une moyenne de 4 spécimens (2 dans le sens de la longueur et deux dans le sens de la largeur) de 150 × 75 mm.

La dilatation linéaire et la dilatation en épaisseur ont été mesurées suivant une désorption de 65 à 50 % d'humidité relative (HR) et une adsorption de 50 à 80% HR. Les conditions d'humidité relative ont été obtenues en utilisant la chambre de climatisation ayant les caractéristiques suivantes : model N0. WM – 906 – MP2H – 5 - SC/WC from Cincinnati Sub-Zero (CSZ).

DL et DE ont été calculées comme suit:

$$DL = [(L_2 - L_1) / L_1] \times 100$$

Où DL est la dilatation linéaire entre 50 and 80 % HR (%); L_1 est la longueur de l'échantillon à l'équilibre à 50% RH (mm); L_2 est la longueur de l'échantillon après reconditionnement à 80 % HR (mm).

$$DE = [(E_2 - E_1) / T_1] \times 100$$

Où DE est la dilatation en épaisseur entre 50 and 80 % HR (%); E_1 est la l'épaisseur de l'échantillon à l'équilibre à 50% RH (mm); E_2 est la longueur de l'échantillon après reconditionnement à 80 % HR (mm).

7.3 Résultats et discussion

7.3.1 Résultats des propriétés mécaniques

7.3.1.1 Profil de masse volumique

Les panneaux mixtes ayant des particules d'écorce externe de bouleau blanc dans leurs couches couvrantes et encollées respectivement avec 5, 6,5 et 8% de résine PF ont la même forme de profil de masse volumique. Il en est de même des panneaux avec ces mêmes types de particules d'écorce traitées à la soude. Pour rendre plus lisible les différents profils de masse volumique sur le graphique, un profil représentant les panneaux avec les écorces non traitées et un autre représentant les panneaux avec les écorces traitées sont choisis et représentés sur une même figure (Figure 7.2) avec celui du panneau de référence, afin de mieux les comparer. La masse volumique au centre ou masse volumique minimale du panneau de référence est au dessus de celles de panneaux mixtes avec les particules d'écorce à la surface et les particules grossières de bois au centre. Donc la substitution des particules fines de bois des couches couvrantes par les particules d'écorce non traitées et traitées à la soude diminue la masse volumique au centre du panneau. Le profil de masse volumique des panneaux avec les particules d'écorce traitées dans leurs couches couvrantes est en chacun de ses points au dessus de celui représentant les panneaux avec les écorces non traitées. Cette différence pourrait s'expliquer par le ratio de compression du panneau mixte avec les particules d'écorce traitées à la soude dans les couches couvrantes qui est supérieur à celui du panneau ayant les particules d'écorce non traitées, ce qui amène à déduire que l'effet du traitement à la soude rend ces particules d'écorce externe de bouleau blanc plus compressibles. Le profil de masse volumique des panneaux mixtes paraît plus plat et plus homogène que celui du panneau de référence en bois. Il est difficile d'expliquer pourquoi le profil de masse volumique du panneau de référence est au dessus de ceux des panneaux mixtes d'autant plus son ration de compression est inférieure à ceux de ces panneaux mixtes.

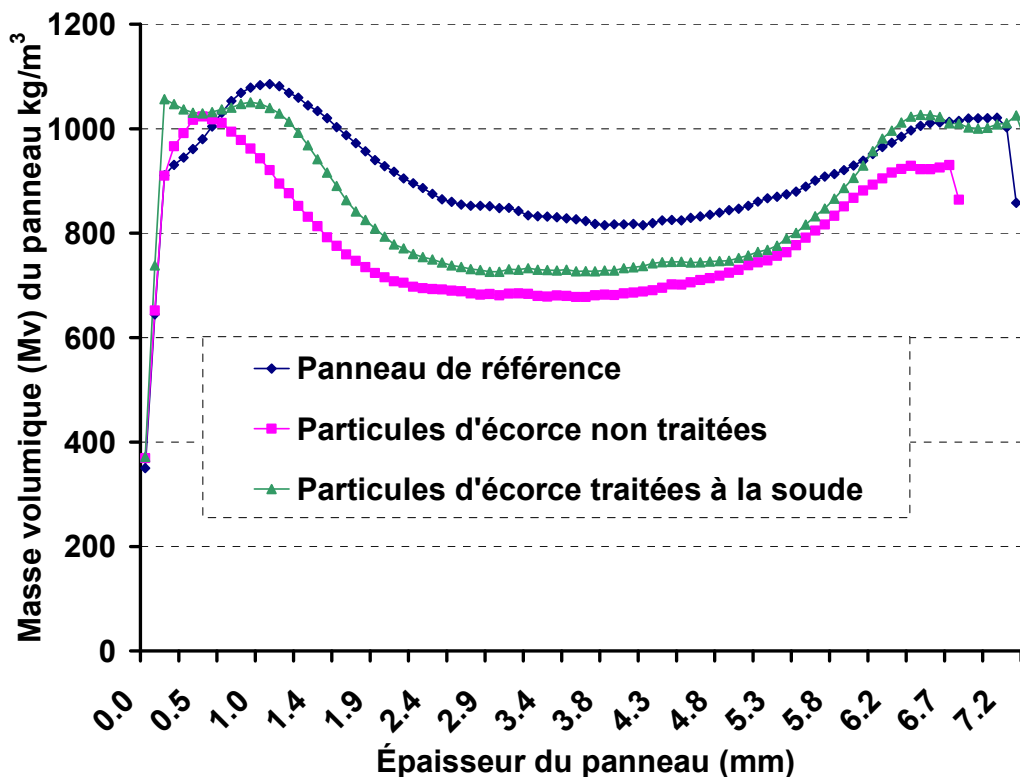


Figure 7.2 Profils de masse volumique typique du panneau de référence en bois et des panneaux mixtes avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans les couches couvrantes ou les particules des mêmes écorces traitées à la soude dans les couches couvrantes

7.3.1.2 Masse volumique moyenne des différents panneaux

Les histogrammes de la Figure 7.3 représentent la masse volumique moyenne de chaque type de panneau. Cette masse volumique est la moyenne arithmétique faite sur quatre spécimens destinés aux mesures de module de rupture et de module d'élasticité. La valeur de cette masse volumique moyenne pour tous les panneaux, excepté ceux ayant des particules d'écorce traitées à la soude, et encollées avec respectivement 5 et 6,5% de PF est au dessus de la masse volumique cible de 800 kg/m^3 . Cette variation est due en partie par la formation manuelle de l'ébauche et au sablage des panneaux ayant des épaisseurs inférieures à la cible de 8 mm. La masse volumique moyenne des panneaux ayant les particules d'écorce non traitées est supérieure à celle de ceux ayant des particules d'écorce

traitées. Les écorces traitées à la soude se rétractent à la sortie du pressage et le panneau diminue en épaisseur au niveau des couches couvrantes constituées de ces écorces.

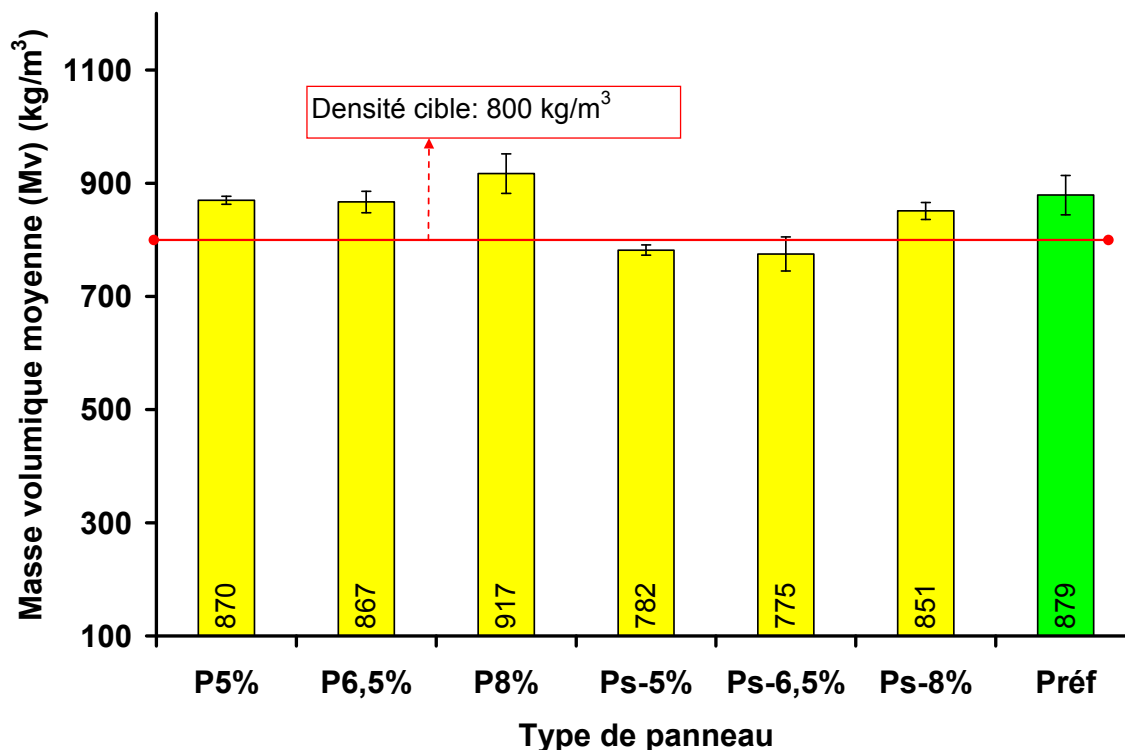


Figure 7.3 Masse volumique moyenne des panneaux (kg/m^3) (valeur moyenne et écart-type)

7.3.1.3 Module d'élasticité

Les résultats obtenus pour le module d'élasticité (MOE) sont représentés à la Figure 7.4. Le MOE de tous les panneaux rencontrent la norme PBU des panneaux sous-planchers. Mais ces valeurs sont largement en dessous du MOE du panneau de référence en bois et des valeurs normalisées des panneaux de types D-2 et D-3 utilisés pour la toiture. L'augmentation du pourcentage de la colle phénol-formaldéhyde (PF) dans l'encollage des particules d'écorce non traitées n'améliore pas le module d'élasticité. La tendance générale des histogrammes montre que seul le panneau avec les particules d'écorce traitées à la soude et encollées avec 6,5% de résine PF a un MOE plus faible. La valeur du panneau de référence montre que la substitution des particules fines de bois dans les couches

couvrantes du panneau par les particules d'écorce externe de bouleau abaisse beaucoup son module d'élasticité.

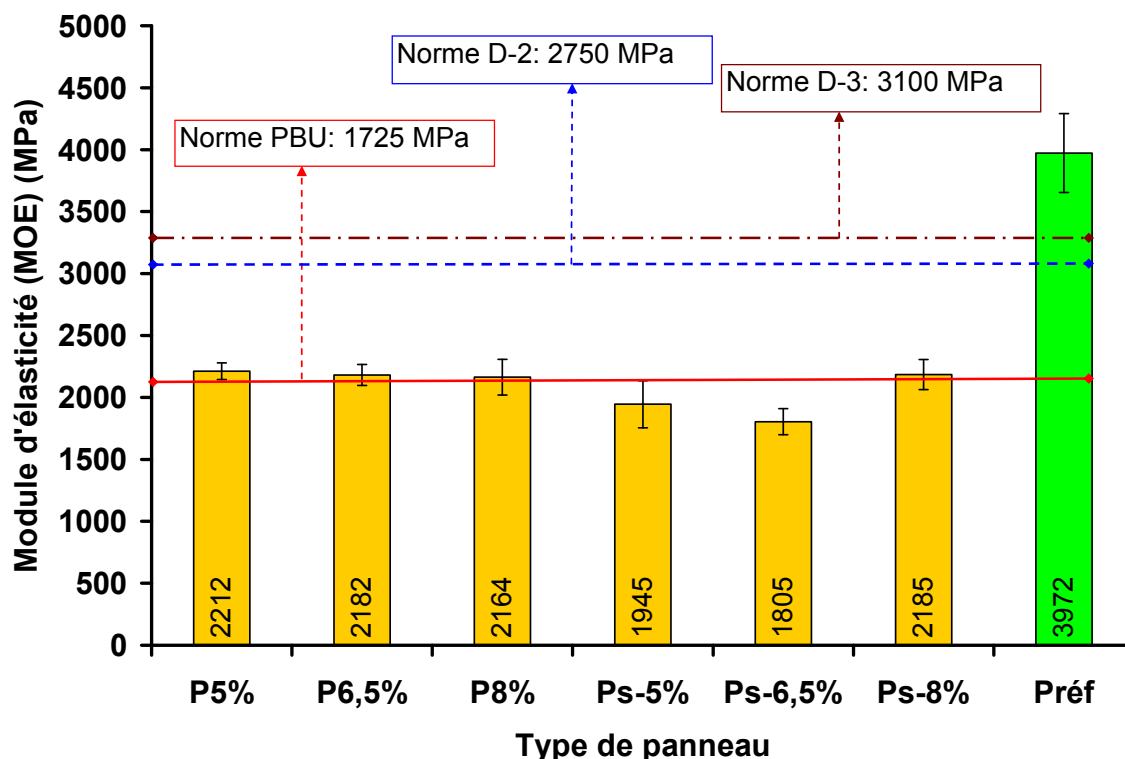


Figure 7.4 Module d'élasticité (MOE) (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.1.4 Module de rupture

Les résultats obtenus pour le module de rupture (MOR) des panneaux fabriqués sont représentés à la Figure 7.5. Le MOR de tous les panneaux rencontre la norme des panneaux PBU pour le sous-plancher. Toutefois, les MOR de ces panneaux sont inférieurs à celui du panneau de référence en bois. La tendance générale que dégagent les histogrammes pour le MOR est que les panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées ont des valeurs de MOR supérieures à celles des panneaux mixtes ayant les particules d'écorce traitées dans les couches couvrantes. Une augmentation du pourcentage de PF dans l'encollage des particules d'écorce non traitées n'a eu aucun effet sur le MOR des panneaux mixtes fabriqués. Par contre cette augmentation dans l'encollage des particules d'écorce traitées a favorisé aussi l'augmentation du MOR des panneaux mixtes fabriqués. La valeur du

panneau de référence montre que la substitution des particules fines de bois dans les couches couvrantes du panneau en bois par les particules d'écorce externe de bouleau abaisse son module de rupture

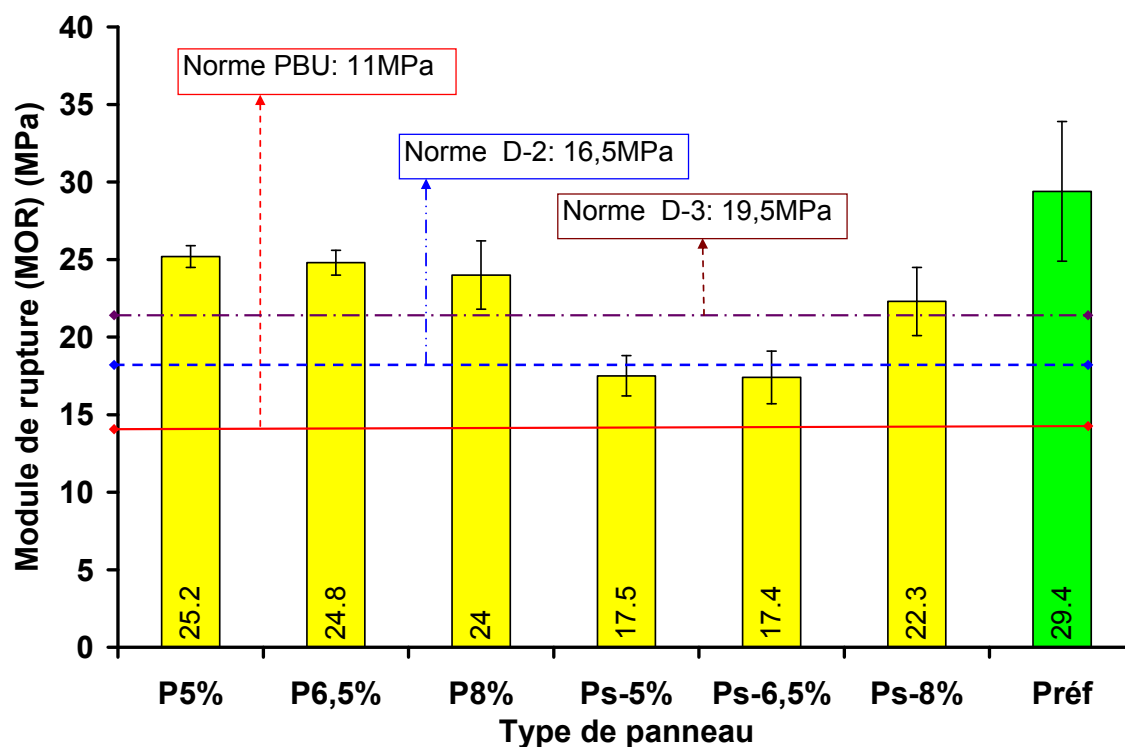


Figure 7.5 Module de rupture (MOR) (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.1.5 Cohésion interne

La cohésion interne (CI) de tous les panneaux mixtes fabriqués est largement au dessus des valeurs normalisées des panneaux de type PBU, D-2 et D-3 comme le montre la Figure 7.6. Cela provient surtout des particules grossières de bois utilisées dans la couche médiane des panneaux mixtes. Les cohésions internes des panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées à la soude et encollées respectivement avec 5 et 6,5% de résine PF sont statistiquement égales à celle du panneau de référence, mais les CI des autres panneaux mixtes sont inférieures à celle du panneau de référence. Les particules d'écorce externe de bouleau se mouille difficilement parce qu'elles sont hydrophobes. Le traitement de ces écorces à la soude améliore leur mouillabilité, mais les rend moins rigides pour pouvoir

tenir le brin de colle qui y pénètre et se solidifie comme les particules de bois : c'est ce qui explique le fait que les panneaux mixtes ayant les particules d'écorce traitées à la soude ont eu les CI les moins élevées. L'augmentation du pourcentage de la PF dans l'encollage des particules d'écorce a plutôt abaissée la CI des panneaux mixtes lorsque ce pourcentage est passé de 6,5 % à 8% dans les particules d'écorce non traitées. Lors du test de cohésion interne (CI), la rupture s'est plus faite dans les couches couvrantes contenant les particules d'écorce externe que dans la couche médiane contenant les particules grossières de bois. Cette cassure dans les couches contenant l'écorce a été plus accentuée lorsque les écorces traitées à la soude étaient utilisées.

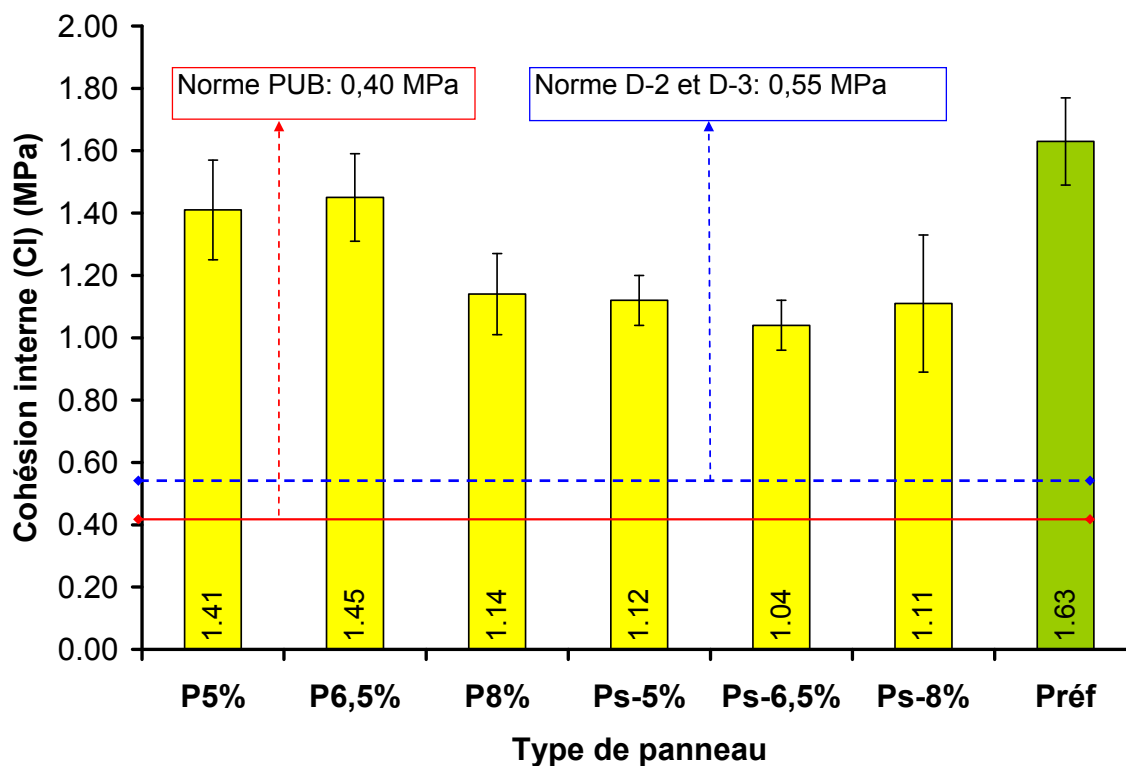


Figure 7.6 Cohésion interne (CI) (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.1.6 Dureté

La dureté de tous les panneaux fabriqués est représentée par les histogrammes de la Figure 7.7. La dureté de tous les panneaux est largement au dessus des exigences de la norme.

Cela s'explique en grande partie par la présence des particules grossières de bois utilisées au centre des panneaux mixtes. Les panneaux avec des particules d'écorce non traitées ont eu une dureté moyenne supérieure à celle des panneaux ayant dans leurs couches couvrantes les particules d'écorce traitées. L'augmentation du pourcentage de la colle PF dans l'encollage des particules d'écorce traitées accroît la dureté des panneaux mixtes engendrés.

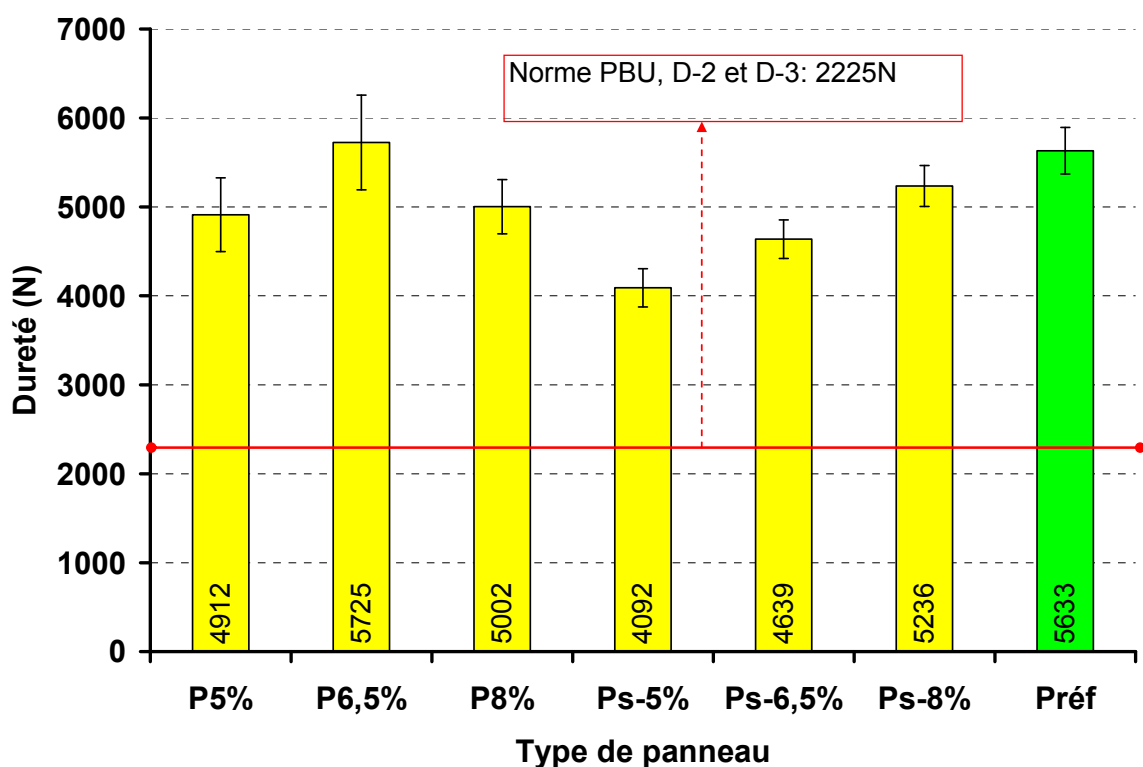


Figure 7.7 Dureté (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.2 Résultats des propriétés physiques

7.3.2.1 Gonflement en épaisseur

Les histogrammes qui représentent le gonflement en épaisseur (GE) après respectivement 2 et 24 heures d'immersion dans l'eau se trouvent à la Figure 7.8. Tous les panneaux ont gonflés moins que le seuil de 20% exigé par la norme pour les panneaux sous-planchers. Les panneaux ayant les particules d'écorce non traitées dans leurs couches couvrantes ont moins gonflé que ceux ayant des particules d'écorce traitées. Le traitement à la soude a

rendu ces particules d'écorce plus hydrophiles. Les panneaux mixtes ayant les écorces non traitées à la soude et encollées respectivement avec 5% et 6,5% de PF ont eu une bonne valeur de GE qui est inférieure à 8% comme l'exigent la norme pour les panneaux de D-2 et D-3 destinés à être utilisés au toit. Cette bonne valeur de GE pour ces types de panneau vient confirmer le caractère hydrophobe des particules d'écorce externe de bouleau blanc.

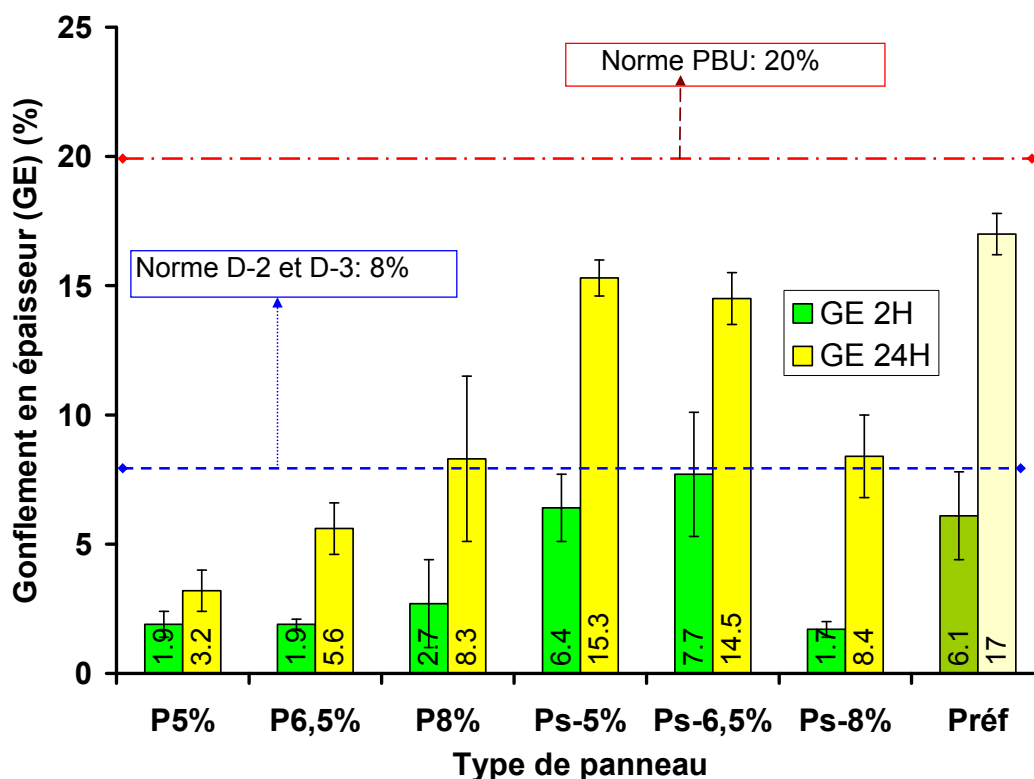


Figure 7.8 Gonflement en épaisseur (GE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.2.2 Absorption d'eau

Les histogrammes d'absorption d'eau sont présentés à la Figure 7.9. Les panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées à la soude absorbent moins d'eau que ceux avec les particules d'écorce traitées. Ils absorbent aussi moins d'eau que le panneau de référence fait entièrement en bois. L'augmentation de pourcentage de la PF lors de l'encollage des particules d'écorce non traitées, engendre une augmentation de l'absorption d'eau du panneau fabriqué. Le traitement à la soude de ces particules les rend hydrophiles. L'augmentation du pourcentage de la PF lors de l'encollage des particules d'écorce traitées

à la soude n'a pas un impact sur l'absorption d'eau des panneaux dont les écorces des couches couvrantes sont encollées avec respectivement 5% et 6,5% de colle PF.

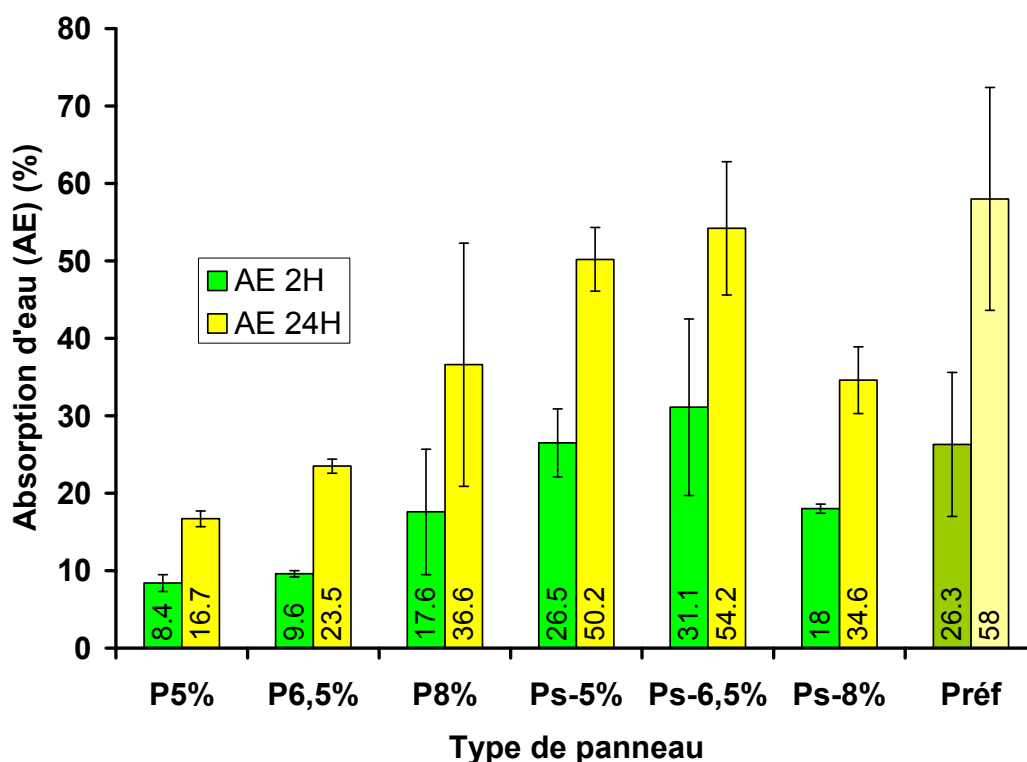


Figure 7.9 Absorption d'eau (AE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.2.3 Dilatation linéaire

Les histogrammes de la Figure 7.10 représentent la dilatation linéaire des différents panneaux. Tous les panneaux ont eu une DL en dessous du seuil exigé par la norme. Les panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées sont presque deux fois plus stables dimensionnellement que ceux ayant des particules d'écorce traitées. L'augmentation du pourcentage de la colle PF aux particules d'écorces traitées et non traitées n'influe pas sur la stabilité dimensionnelle des panneaux mixtes produits. Le panneau mixte avec les particules d'écorce dans les couches couvrantes encollées avec 5% de PF est le meilleur panneau du groupe pour ce qui est de la stabilité dimensionnelle.

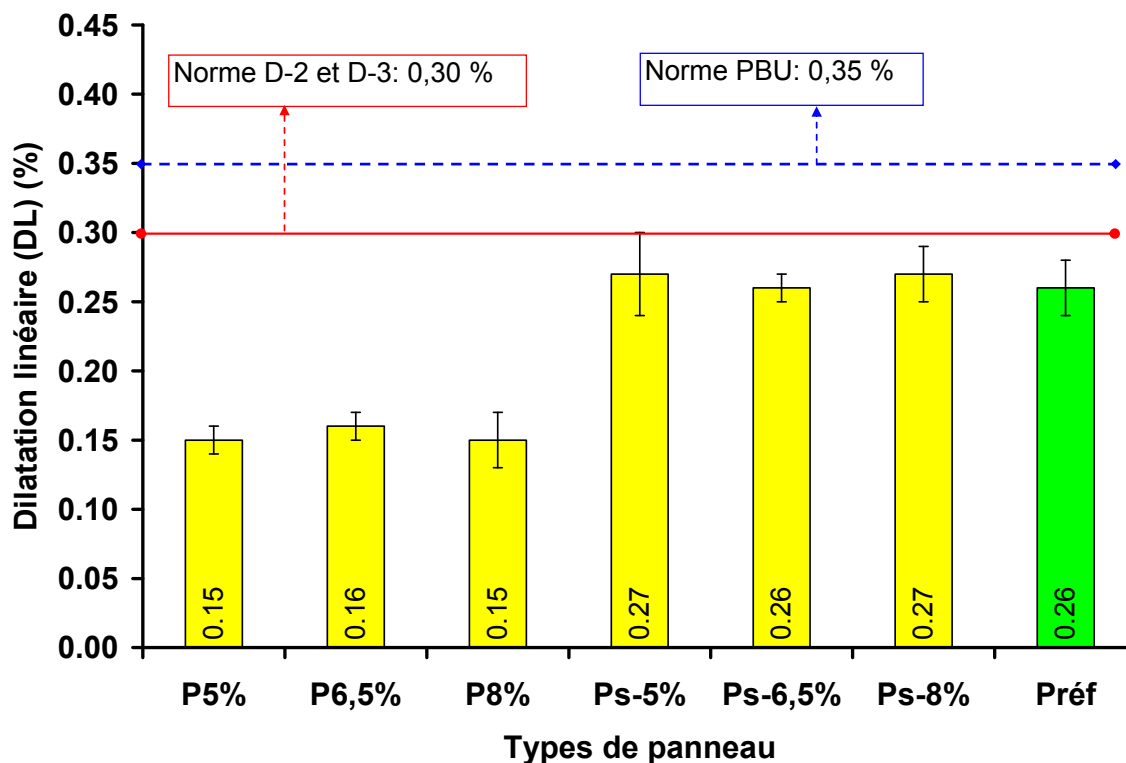


Figure 7.10 Dilatation linéaire (DL) (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.2.4 Dilatation en épaisseur

Les histogrammes de la Figure 7.11 confirment aussi que les panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées dans les couches couvrantes se dilatent moins en épaisseur que le panneau de référence fait en bois et les panneaux mixtes avec les particules d'écorce traitées à la soude. L'augmentation du pourcentage de la colle PF aux particules d'écorces non traitées lors de leur encollage, fait augmenter la valeur de la dilatation en épaisseur des panneaux fabriqués comme c'est le cas avec le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau. Le panneau mixte avec les particules d'écorce dans les couches couvrantes encollées avec 5% de PF est encore le meilleur panneau du groupe pour ce qui est de la stabilité dimensionnelle évaluée dans ce cas par la mesure de la dilatation en épaisseur. La dilatation en épaisseur n'est pas normalisée.

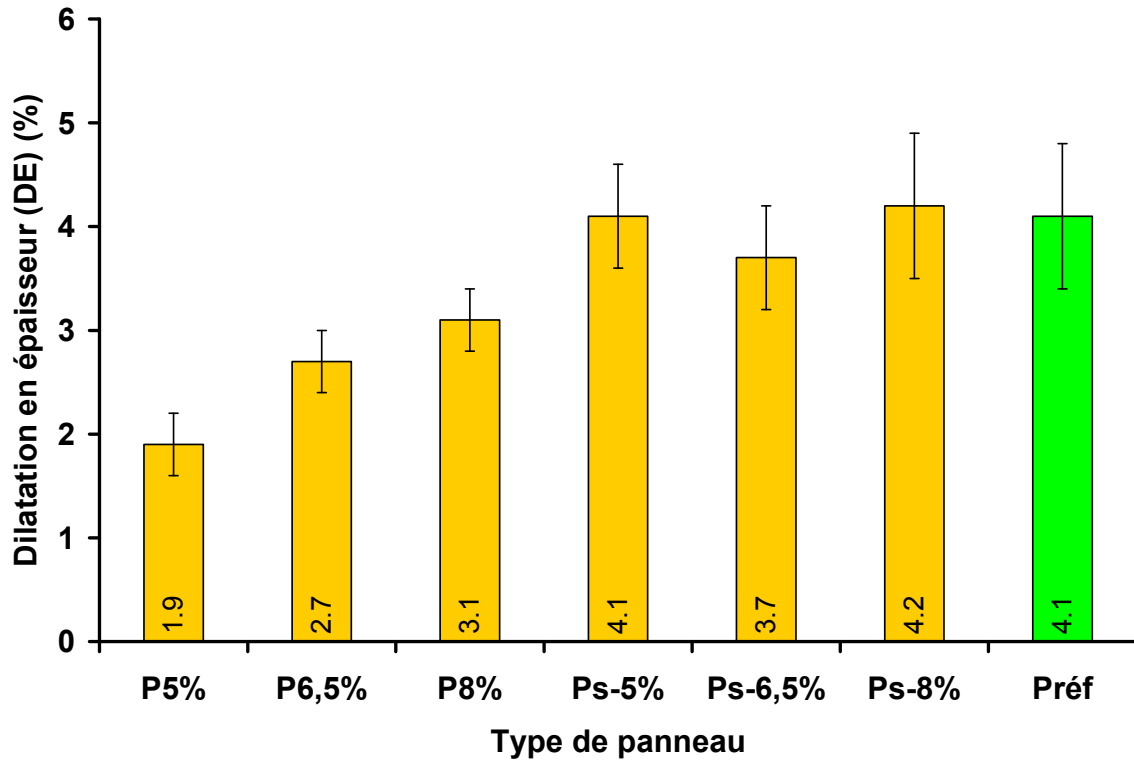


Figure 7.11 Dilatation en épaisseur (DE) (valeurs moyennes et écart-types)

7.3.3 Analyse de variance (ANOVA)

Le résumé de l'analyse de variance (ANOVA) est présenté au Tableau 7.5. ANOVA est utilisée dans ce chapitre juste aux variables représentant les propriétés normalisées des panneaux produits. Ces variables sont: Le module d'élasticité (MOE), le module de rupture (MOR), la cohésion interne (CI), la dureté (D), le gonflement en épaisseur (GE) et la dilatation linéaire (DL). Les valeurs de F liées au traitement pour toutes les variables dépendantes mesurées sont significatives mais celles liée au blocage pour les mêmes variables ne le sont pas. Cela veut dire qu'on aurait pu se passer du blocage et faire l'analyse dans un plan entièrement aléatoire. Le matériau (particules d'écorce non traitées à la soude versus particules d'écorce traitées à la soude) utilisé dans les couches couvrantes des panneaux mixtes a eu un effet hautement significatif sur les propriétés susmentionnées. C'est la preuve de l'existence d'une différence significative entre les panneaux mixtes ayant d'une part les particules d'écorce non traitées dans les couches couvrantes, et d'autre

part les particules d'écorce traitées à la soude dans leurs couches couvrantes. La variation du pourcentage de la colle PF utilisée lors de l'encollage des particules d'écorce n'a eu aucun effet sur le MOE, le MOR, la CI, le GE et la DL des panneaux. Par contre elle a eu un effet hautement significatif sur la dureté.

Tableau 7.5 Résumé de l'analyse de variance (ANOVA) (dl = degré de liberté, MOE = module d'élasticité, MOR = module de rupture, CI = cohésion interne, D = dureté, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire)

Source de variation	Propriétés mécaniques et physiques (valeurs de F)						
	dl	MOE	MOR	CI	D	GE	DL
Blocs	3	1,78 ns	1,31 ns	2,33 ns	0,55 ns	1,90 ns	2,82 ns
Mat	1	13,94**	57,29**	15,84**	11,16**	96,90**	283,78**
%	2	3,54 ns	3,10 ns	1,96 ns	6,78 **	1,99 ns	0,10 ns
Mat × %	2	4,56*	7,01**	3,52*	5,84*	24,87**	1,14 ns
Contrastes							
Mat	1	13,94**	57,29**	15,84**	11,16**	96,90**	283,78**
%L	1	1,98 ns	4,05 ns	3,29 ns	9,14**	1,11 ns	0,20 ns
%Q	1	5,10*	2,15 ns	0,64 ns	4,41 ns	2,87 ns	0,01 ns
Mat × %L	1	4,47 ns	11,00**	3,17 ns	6,65*	46,40**	0,20 ns
Mat × %Q	1	4,66*	3,02 ns	3,88 ns	5,02*	3,34 ns	2,09 ns

Description des abréviations sous la colonne de la source de variation : Mat = type de matériau utilisé dans les couches couvrantes des panneaux (écorces non traitées à la soude versus écorces traitées), % = pourcentage de la colle PF utilisée dans l'encollage des particules d'écorce, **Mat × %** = interaction entre Mat et %, **%L** = effet linéaire du pourcentage, **%Q** = effet quadratique du pourcentage, **Mat × %L** = interaction entre Mat et %L, **Mat × %Q** = interaction entre Mat et %Q, ns = non significatif, * = significatif à 0,05 du niveau de probabilité, ** = significatif à 0,01 du niveau de probabilité

Les interactions significatives sont illustrées aux Figures 7.12, 7.13, 7.14 et 7.15 afin de rendre facile leur interprétation visuelle pour mieux les comprendre. L'erreur type notée (ET) associée à ces interactions est calculée par la formule :

$$E.T = \sqrt{\frac{M.S.E}{r * n}} \text{ où M.S.E est le carré moyen de l'erreur expérimentale d'ANOVA, r est le}$$

nombre de répétition et n le nombre de répétition cachée (*Collin, 2003*). Dans le cas de cette étude, $n=1$ parce qu'il y a juste deux facteurs. Les valeurs de ces erreurs types sont présentées dans le Tableau 7.6. Les erreurs types sont représentées sur les diagrammes d'interaction des Figures 7.12, 7.13, 7.14 et 7.15 par les barres dont la longueur est deux fois leur valeur. Ces barres se recouvrent partiellement aux points où l'interaction n'est pas significative. La Figure 7.12 montre que les panneaux mixtes avec les écorces non traitées et encollées avec respectivement 5 et 6,5% de résine PF ont des valeurs de MOE supérieures à celles des panneaux mixtes avec les écorces traitées et encollées avec les mêmes pourcentages de résine. Le meilleur panneau pour cette variable est le panneau avec les écorces non traitées et encollées avec 5% de PF. À la Figure 7.13, les courbes d'interaction montrent aussi que les panneaux avec les écorces non traitées et encollées avec respectivement 5 et 6,5% de résine PF ont des valeurs de MOR supérieures à celles des panneaux avec les écorces traitées. Le meilleur panneau est celui avec les écorces non traitées et encollées avec 5% de PF. La seule interaction non significative est observée sur les panneaux avec respectivement les écorces non traitées et traitées et encollées avec 8% de PF parce que les barres d'erreur type se chevauchent. Quand à la Figure 7.14, les courbes d'interaction montrent que le meilleur panneau à choisir pour la variable dureté est celui avec les écorces non traitées et encollées avec 6,5% de PF. La seule interaction non significative est observée sur les panneaux avec respectivement les écorces non traitées et traitées et encollées avec 8% de PF parce que les barres d'erreur type se chevauchent. En ce qui concerne la Figure 7.15 pour la variable gonflement, le meilleur panneau est celui ayant les écorces non traitées et encollées avec 5% de PF. La seule interaction non significative est observée sur les panneaux avec respectivement les écorces non traitées et traitées et encollées avec 8% de PF. Donc le traitement à la soude des particules d'écorce externe de bouleau a eu un effet négatif sur les propriétés des panneaux fabriqués. Il y a eu un effet quadratique significatif du pourcentage de la PF utilisée pour encoller les particules

d'écorce sur le module d'élasticité (MOE) des panneaux fabriqués qui s'est augmenté lorsque ce pourcentage est passé de 6,5 à 8%. Il y aussi eu un effet linéaire hautement significatif de ce pourcentage sur la dureté des panneaux fabriqués qui s'est accru avec une augmentation de la quantité de PF dans les particules d'écorce.

Tableau 7.6 Erreurs types (S.E) associées aux interactions significatives

Interactions	Erreurs types (E.T) associées aux interactions significatives			
	MOE	MOR	Dureté	GE
(Type écorce dans les couches couvrantes) × (% de la résine PF)	68,2	0,9	204,3	0,88

MOE = module d'élasticité, MOR = module de rupture, GE = gonflement en épaisseur

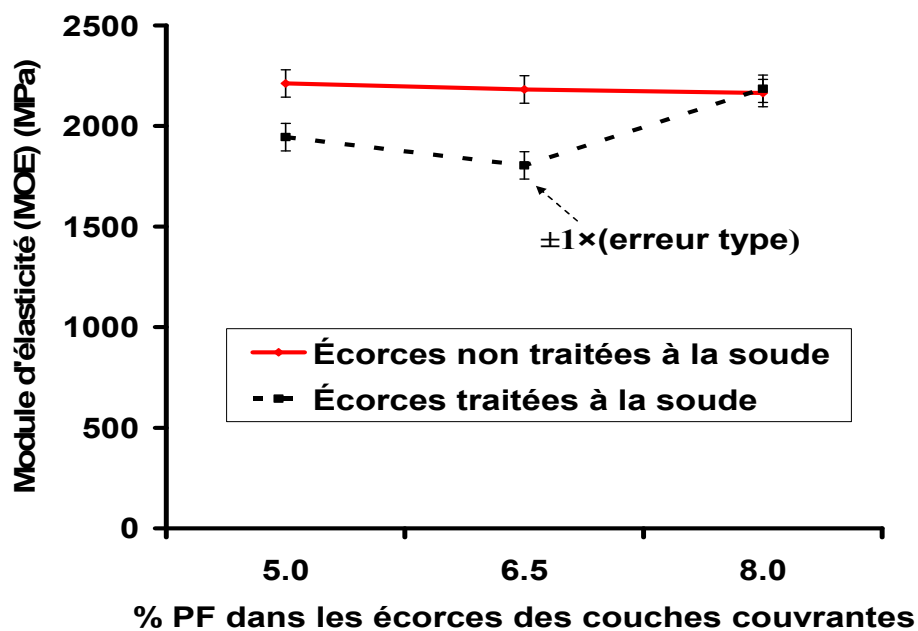


Figure 7.12 Diagramme d'interaction pour le module d'élasticité

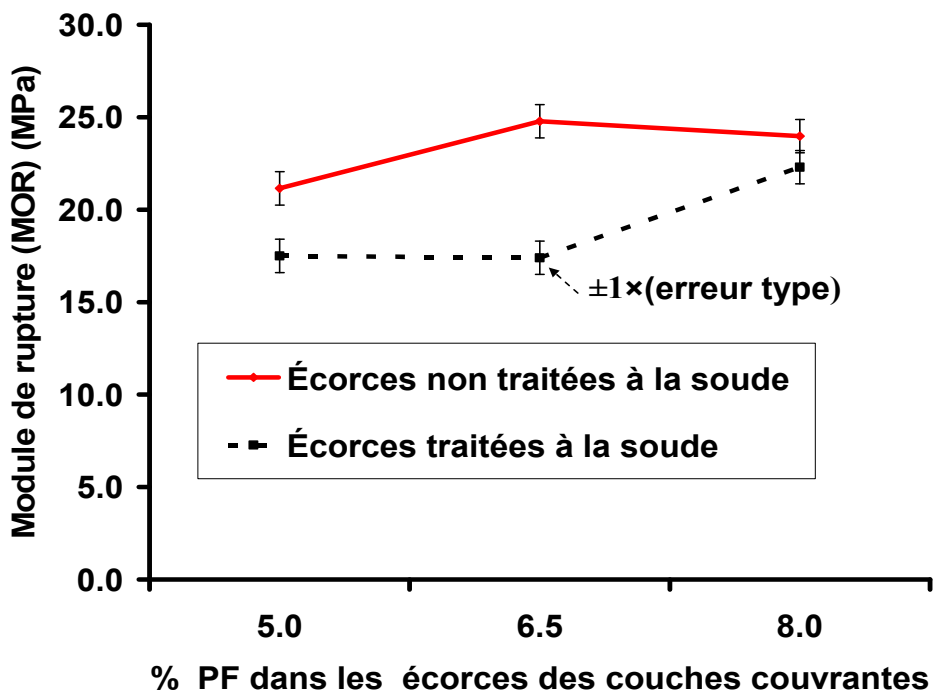


Figure 7.13 Diagramme d'interaction pour le module de rupture

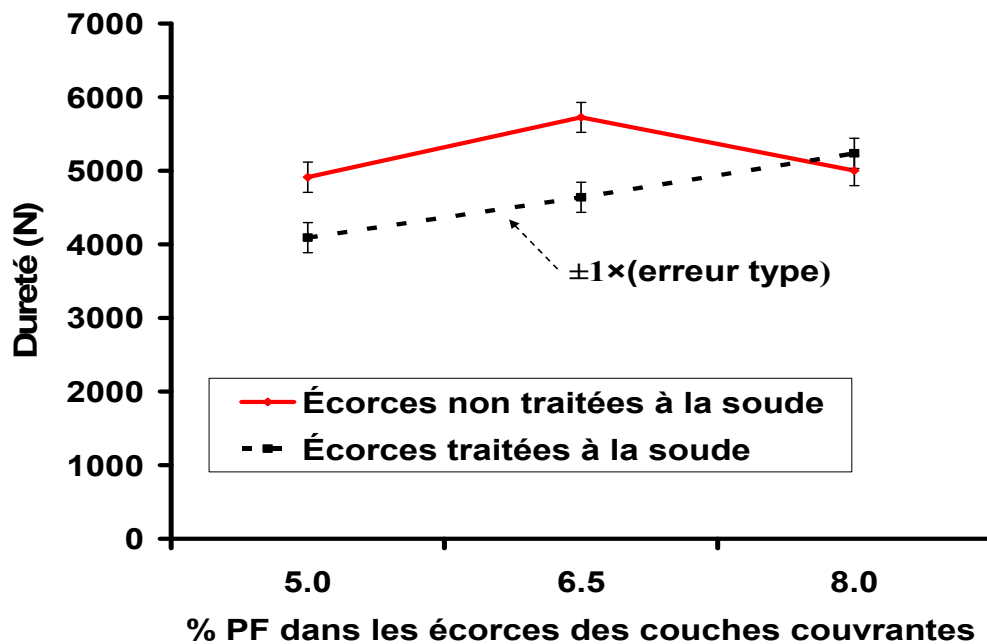


Figure 7.14 Diagramme d'interaction pour la dureté

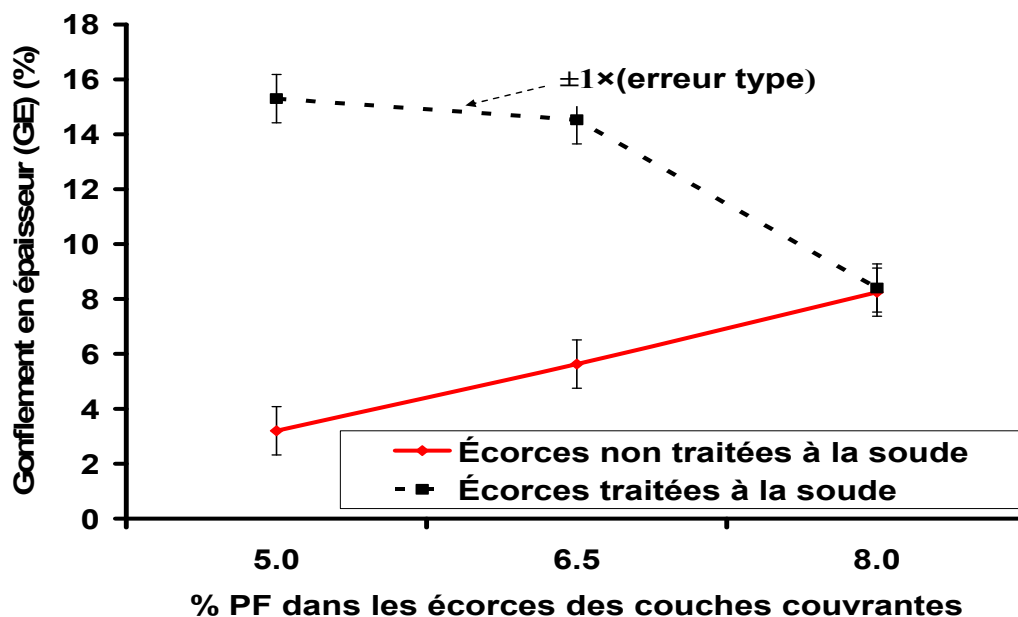


Figure 7.15 Diagramme d'interaction pour le gonflement en épaisseur

7.3.4 Résultats des tests de comparaison par la méthode LSD (plus petite différence significative)

Les propriétés des panneaux mixtes sont comparées à celles du panneau de référence fait entièrement en bois. Les résultats de ce test sont présentés dans le Tableau 7.7. Le test LSD est utilisé pour cette comparaison. Les panneaux ayant la ou les même (s) lettre (s) que le panneau de référence ne sont pas différents de ce dernier. Ainsi, le MOE et le MOR du panneau de référence ne partagent leur lettre (a) avec aucun des panneaux mixtes, preuve que ces deux variables du panneau de référence sont significativement supérieures à celles des panneaux mixtes. Cette diminution significative des MOE et MOR des panneaux mixtes provient de l'utilisation des particules d'écorce de bouleau dans les couches couvrantes. Il ressort aussi de ce tableau à propos de la cohésion interne que, le panneau de référence n'est pas différent des panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées à la soude et encollée respectivement avec 5% et 6,5% de colle PF. Par contre le traitement à la soude des écorces rend la cohésion interne des panneaux qui en découlent significativement plus faible que celle du panneau de référence. À propos de la dureté, le panneau de référence n'est pas différent des panneaux mixtes ayant d'une part les particules d'écorce non traitées et encollées avec 6,5% de colle PF et d'autre part les particules

d'écorce traitées à la soude et encollées avec 8% de colle PF. Concernant les propriétés physiques représentées par le gonflement en épaisseur et la dilatation linéaire, les panneaux mixtes avec les particules d'écorce non traitées sont les meilleurs. Ils sont dimensionnellement plus stables que le panneau de référence en bois.

Tableau 7.7 Comparaison des panneaux mixtes au panneau de référence (fait de 100% de particules de bois) à l'aide du test LSD (plus petite différence significative)

Types de panneaux	Moyennes					
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	CI (MPa)	D (N)	GE (%)	DL (%)
P_{5%}	2212 b	25,1 b	1,41 a	4911 bc	3,2 d	0,14 b
P_{6,5%}	2182 b	24,8 b	1,45 a	5724 a	5,6 cd	0,15 b
P_{8%}	2164 b	23,9 b	1,14 b	5002 bc	8,2 bc	0,14 b
P_{s-5%}	1945 bc	17,5 c	1,11 b	4091 d	15,3 a	0,27 a
P_{s-6,5%}	1804 c	17,4 c	1,04 b	4639 cd	14,5 a	0,26 a
P_{s-8%}	2185 b	22,3 b	1,11 b	5236 ab	8,4 b	0,26 a
P_{référence}	3972 a	29,4 a	1,63 a	5633 a	16,8 a	0,26 a

Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes. MOE = module d'élasticité, MOR = module de rupture, CI = cohésion interne, D= dureté, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire

7.3.5 Régression

Une régression de chaque variable mesurée pour un spécimen versus la masse volumique de celui-ci est faite afin de trouver jusqu'à quel pourcentage les variations observées dans la mesure de la variable dépendante peuvent être dues à la masse volumique. Les résultats fournis par ANOVA pour cette investigation sont présentés dans le Tableau 7.8. Les résultats de ce tableau montrent des valeurs significatives de F liées à la régression pour le MOE, le MOR, et une valeur de F hautement significative liée à la régression pour le gonflement en épaisseur (GE). Par contre, les valeurs de F sont non significatives pour la

dureté, la cohésion interne et la dilatation linéaire, ce qui veut dire que les variations observées dans la mesure de ces propriétés sont indépendantes de la masse volumique des spécimens utilisés. Les variations observées dans les mesures de MOE, MOR et GE peuvent être respectivement expliquées à 76%, 83% et 89% par la masse volumique des échantillons utilisés. Le reste étant dû au hasard.

Tableau 7.8 Régression

Régression	MOE versus masse volumique	MOR versus masse volumique	CI versus masse volumique	D versus masse volumique	GE masse volumique versus	DL versus masse volumique
Valeur de F	12,41*	19,27*	0,073 ns	3,000 ns	34,07**	0,009 ns
R²	0,76	0,83	0,48	0,43	0,89	0,45

7.4 Conclusion

Deux caractéristiques majeures de l'écorce externe de bouleau blanc ont permis de concevoir le type de panneau mixte qui a fait l'objet de l'étude de ce chapitre. Le premier concerne son faible taux de cellulose qui fait d'elle un matériau non structural comme le bois, d'où son renfort dans les panneaux à l'aide des particules de bois utilisées dans la couche médiane. Le second concerne son hydrophobicité qui oriente son utilisation dans les couches couvrantes des panneaux mixtes fabriqués pour les rendre dimensionnellement plus stable et les protéger des infiltrations d'eau à partir de leurs couches couvrantes. Tous les panneaux mixtes fabriqués ont rencontré les exigences de la norme des panneaux de type PBU destinés à être utilisés comme panneau sous-plancher.

Les résultats des analyses statistiques ont permis de constater que le facteur traitement des écorces à la soude avait un effet négatif sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux mixtes fabriqués, parce que les meilleurs résultats ont été obtenus plutôt avec les panneaux ayant les particules d'écorce non traitées. Cela ne signifierait pas que les panneaux mixtes avec les particules d'écorce traitées à la soude sont à écarter. Dans le

cadre de son utilisation comme panneau mural, l'application de la peinture ou de la teinture à sa surface se fera sans difficultés parce que le traitement à la soude a permis d'augmenter la mouillabilité des écorces utilisées dans les couches couvrantes. Un autre avantage de ce traitement est qu'il rend le pH des panneaux fabriqués fortement basique, ce qui permet de les protéger contre les attaques de certains champignons surtout lorsqu'ils sont utilisés dans un endroit humide comme le sous-plancher, propice aux foisonnement de ces parasites (*Willeitner, 1956; Gersonde et Deppe, 1968; Schmidt et al., 1978*).

La variation du pourcentage de la colle PF a généré un impact négatif surtout dans le groupe des panneaux avec les particules d'écorce non traitées à la soude, lorsque ce pourcentage est allé croissant, parce que la colle PF contient 20% de soude qui contribue à la déstabilisation de structure des particules d'écorce externe de bouleau blanc lors de la saponification des ses subérines. Donc en augmentant sa quantité dans les particules d'écorce, il y a aussi une augmentation de la quantité de soude qui détruit la couche des subérines des écorces et les fragilise, ce qui rabaisse les propriétés des panneaux mixtes fabriqués. Les panneaux avec les particules d'écorce non traitées dans leurs couches couvrantes ont eu des valeurs de cohésion interne et de dureté semblables à celles du panneau de référence et des propriétés physiques supérieures à celles de ce même panneau. C'est de ces propriétés physiques que le meilleur panneau est finalement choisi à l'aide du plan d'analyse statistique utilisé : il s'agit du panneau mixte avec les particules d'écorce non traitées à la soude et encollées avec 5% de colle PF. Ce choix est d'autant plus intéressant qu'il porte sur le panneau qui aurait le coût de production le plus bas dans le groupe. En effet, les particules d'écorce utilisées dans ce panneau sont non traitées et le plus petit pourcentage de la colle parmi les trois du facteur quantitatif de l'expérience qui est utilisé. Quoique le traitement à la soude des particules d'écorce n'a pas donné des panneaux aux propriétés mécaniques et physiques escomptés, ce traitement a du moins permis de mettre en évidence l'effet négatif de la soude sur la structure de ces écorces.

CHAPITRE 8: INVESTIGATION DES PROPRIÉTÉS DES PANNEAUX MIXTES AVEC LES LAMELLES DE BOIS DANS LES COUCHES COUVRANTES ET LES PARTICULES D'ÉCORCE EXTERNE DE BOULEAU BLANC (*Betula papyrifera*) AU CENTRE

Résumé

Les scieries, les usines de pâte à papier et les industries des composites à base de bois ont des besoins toujours plus importants en bois. Une concurrence sévère va très certainement s'engager entre ces différentes industries quant à l'approvisionnement régulier de cette matière première dans un futur proche. Cette concurrence sera aggravée par les mesures de restriction de coupes forestières prises par les pouvoirs publics du Québec. L'industrie des panneaux à lamelles orientées (PLO) sera la plus affectée car la production des lamelles nécessite un bois provenant d'un tronc bien droit et sans défaut. Une des solutions à ce problème serait de mettre sur pied un panneau mixte où les lamelles de la couche médiane sont substituées par les particules d'écorce externe de bouleau blanc, qui sont abondantes et s'obtiennent à moindre coût. Ce type de panneau pourrait être utilisé au niveau du sous-plancher, où la sollicitation en flexion est peu importante. L'objet de ce travail porte sur la conception, la fabrication et l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques de ce type de panneau. Deux facteurs de fabrication sont pris en compte : l'orientation des lamelles dans les couches couvrantes et le traitement fait aux particules d'écorce de la couche médiane. Tous les panneaux mixtes fabriqués ont rencontré les exigences de la norme des panneaux à lamelles orientées de type R-1 et O-1 (CSA, 1993). Le traitement à la soude des particules d'écorce n'a pas produit les effets escomptés (amélioration des propriétés mécaniques). L'analyse statistique utilisée dans un plan factoriel en blocs complets a permis de choisir le panneau avec les écorces non traitées à la soude et sans ajout des fibres de bois comme le meilleur du groupe. Un avantage non négligeable de ce panneau choisi est son coût de production réduit au minimum parce que le traitement à la soude et l'ajout des fibres de bois génèrent des coûts supplémentaires. La stratégie mise sur pied pour la conception de ce panneau a permis de valoriser les particules d'écorce externe de bouleau en les substituant à 50% de lamelles de bois dans chaque panneau fabriqué.

Abstract

Sawmills, pulp and wood-based composite industries will always need more and more wood as raw material. In the future, the high demand of wood as raw material will generate its severe shortage that will lead to a drastic competition among the above mentioned industries. This competition will be worsened by restriction measurements of forest cuttings taken by the public authorities in Quebec. The oriented strands board (OSB) industry will be the most affected because the production of strands requires wood from a quite straight trunk and without defect. One of the solutions to this problem would be to set up a mixed panel where the strands of core layer are substituted by outer bark particles of white birch, which are abundant and are obtained at a lower cost. This type of panel could be used at sub-floor level, where the bending strength is not very important. The objective of the present research work concerns the design, the manufacture and the evaluation of mechanical and physical properties of this type of panel. Two manufacture factors are taken into account: the strands orientation in the face layers and the treatment made on the bark particles used in the core layer. All produced mixed panels met and exceeded almost all *CSA (1993)* R-1 and O-1 property requirements. The alkali treatment of bark particles did not produce the expected effects (improvement of mechanical properties). The statistical analysis used in a factorial design in complete blocks permitted to choose panel with untreated bark particles and without addition of wood fibres as the best of group. A considerable advantage of selected panel is its lower production cost because the alkali treatment and the addition of wood fibres generate additional costs. The strategy set up for this panel design permitted to valorize outer bark particles of white birch as substitution product of 50% strands (by weight) in each produced panel.

8.1 Introduction

8.1.1 Description et capacité de production

Le panneau de lamelles orientées communément appelé panneau OSB, est constitué de lamelles de bois collées à l'aide d'une résine résistante à l'eau telle que le phénol-formol ou un isocyanate, sous pression et à température élevées. Ce panneau est formé de trois couches, la couche médiane étant orientée perpendiculairement au grand axe du panneau.

L'orientation des lamelles renforce les propriétés mécaniques (résistance et rigidité) et physiques (stabilité dimensionnelle) du panneau OSB dans le sens de l'orientation (*Anonyme, 1997*). La longueur des lamelles est comprise entre 60 et 152 mm, leur largeur entre 5 et 20 mm et leur épaisseur entre 0,4 et 0,7 mm. Les bonnes lamelles devraient avoir un ratio longueur sur épaisseur de l'ordre de 150 (*Brinkmann, 1979*) ainsi qu'un ratio longueur sur largeur de l'ordre de 10 (*Deppe, 1979*). La capacité de production de ces panneaux s'est accrue de façon rapide lors des trois dernières décennies surtout en Europe et en Amérique du Nord. Les études statistiques réalisées dans un passé récent estimaient la production mondiale de ce panneau à 25,6 millions de m³ parmi lesquels l'Amérique du Nord détenait 22,0 millions de m³ (soit 86% de la production globale), suivi de l'Europe avec 3,1 million de m³ (soit 12 de la production globale) et de l'Amérique du Sud avec 0,5 million de m³ (soit 1,9% de la production globale) (*Anonyme, 2003b*). En 1997, le Canada comptait 42 usines de fabrication de panneaux OSB, dont la moitié se trouvait en Ontario (15) et au Québec (6). Cette année là, le Québec fut le plus grand producteur de ce type de panneau avec 1,85 millions de m³ sur un total de 6,86 million de m³ produits au Canada (*Anonyme, 1997*). Dans les années 80, la capacité de production des panneaux OSB s'est accrue de 530 % au Canada et les prévisions du début des années 90 entrevoyaient que cette capacité atteindrait 3,6 milliards de pied carré (sur une base de 3/8 de pouce) en 1996. Louisiana-Pacific (LP) est le plus important producteur de panneaux à lamelles orientées en Amérique du Nord avec 23% du marché. Au Québec, LP opère des usines de panneaux OSB à Chambord, Saint-Michel-des-Saints et Maniwaki. Les données de base concernant les trois usines de LP sont résumées dans le Tableau 8.1 (*Anonyme, 2004b*). Les types et les proportions d'espèce de bois utilisés dans la fabrication de panneaux OSB varient d'une usine à l'autre. Dans les usines de Chambord et de Saint-Michel-des-Saints les deux espèces utilisées sont le peuplier et le bouleau à papier. À Chambord, les lamelles de la couche médiane sont constituées à 100% de peuplier faux-tremble; elles sont encollées avec la phénol-formaldéhyde (PF) en poudre. Quant aux lamelles des couches couvrantes, elles sont constituées d'un mélange de peuplier faux-tremble et de bouleau à papier dans les proportions variant entre 25% (bouleau) – 75% (peuplier) et 35%(bouleau) – 65% (peuplier). Ces lamelles des couches couvrantes sont encollées avec la phénol-formaldéhyde liquide. À l'usine de Maniwaki en plus de bouleau et du peuplier, l'érable est

ajouté au mélange. Ce mélange se fait parce que l'attribution du bois de peupliers n'atteint que 70% de la possibilité pour cette essence au Québec, et l'avenir ne garantit pas nécessairement des volumes suffisants pour répondre aux besoins croissant de l'industrie (*Anonyme, 2004a*). Les particules d'écorce externe de bouleau pourront être une matière première alternative qui contribuera à résoudre une partie de cette question. Les mesures de restriction de coupes forestières prises par les pouvoirs publics du Québec, suite aux conclusions du rapport *Coulombe et al. (2004)* aggraveront la concurrence entre les industries de composites à base de bois. C'est de ce constat qu'une investigation de la substitution des lamelles de bois dans la couche centrale des panneaux OSB par les particules d'écorce externe de bouleau blanc sur les propriétés des panneaux mixtes fabriqués fait l'objet de ce chapitre.

Tableau 8.1 Données des usines de panneaux OSB de LP au Québec (*Anonyme, 2004b*)

Localisation	Capacité annuelle de production Millions de P ² (base 3/8 pouce)	Besoin annuels de bois ronds m ³	Attribution de bois ronds dans les forêts publiques (m ³)			
			Peuplier	Bouleau à papier	Érable	Total
Chambord	465 000	700 000	294 000	156 000	0	450 000
Saint-Michel-des-Saints	500 000	750 000	407 100	214 800	0	621 000
Maniwaki	535 000	800 000	316 100	233 500	14 000	563 000
Total	1 500 000	2 250 000	1 017 200	604 300	14 000	1 635 500

P= pied, 1 pied = 30,48 cm; 1 pouce = 25 mm

8.1.2 Norme et classification des panneaux OSB

La norme utilisée en Amérique du Nord est différentes de celle utilisée en Europe parce que les méthodes d'essai ne sont pas les mêmes. En Europe, la classification de ces panneaux

est faite selon la norme EN 300 de mars 1997. De cette classification il ressort les types de panneau OSB suivants :

OSB/1 : panneau à usage général à l'intérieur dans un milieu sec;

OSB/2 : panneau travaillant à usage intérieur dans un milieu sec (utilisation dans la fabrication des bâtis des meubles par exemple);

OSB/3 : panneau travaillant à usage extérieur dans un milieu humide;

OSB/4 : panneau travaillant sous contrainte élevée en milieu humide.

Avant 1985, c'est la norme CAN3-O188.0-M78 (CSA, 1978) qui était utilisée au Canada pour le panneau gaufré. Avec le développement des panneaux à lamelles orientées (PLO) dans les années 80, la norme CSA-O437 [Canadian Standards Association (Association Canadienne de Normalisation, ACNOR)] fut mise sur pied en 1985. Ces normes ont trois classes de panneau à lamelles orientées : R-1, O-1, et O-2; où R est l'abréviation de « random » et O celle de « oriented ». O-2 est la classe des panneaux ayant des propriétés de flexion supérieures à celles des panneaux de classe O-1. Les propriétés de base utilisées dans le cadre de ce travail de recherche pour chacune de ces classes sont décrites au Tableau 8.2. La norme CSA-O325-92 est aussi utilisée pour les panneaux PLO et le contre-plaqué. Elle s'inspire de la norme PS2-92 (Performance Standard for Wood-Based, Structural-Use Panels) utilisée aux USA. Cette norme comporte cinq classes qui sont :

- 1) 1F : classe de panneau sous-plancher sans revêtement;
- 2) 2F : classe de panneau sous-plancher avec revêtement;
- 3) 1R : classe de panneau pour toiture sans supports de rives;
- 4) 2R classe de panneau pour toiture avec supports de rives
- 5) W : classe de panneau mural Notes de cours *Cloutier (2004)*.

La classe R-1 de la norme CSA-O437 est utilisée dans ce travail pour la comparaison des résultats des propriétés des panneaux mixtes fabriqués, parce que les lamelles au centre sont substituées par les particules d'écorce, ce qui annule l'orientation.

Tableau 8.2 Propriétés de base des panneaux gaufrés et PLO (selon la norme CSA-O437)

	R-1	O-1	O-2
Propriétés mécaniques, panneau sec			
Module de rupture * (MPa)	17,2	23,4	29,2
Module de rupture ζ (MPa)	17,2	9,6	12,4
Module d'élasticité * (MPa)	3100	4500	5500
Module d'élasticité ζ (MPa)	3100	1300	1500
Cohésion interne	0,345	0,345	0,345
Propriétés physiques, panneau sec			
Gonflement maximale en épaisseur après trempage de 24 heures (%)	15	15	15
Dilatation linéaire maximale : humidité relative (HR), de 50 à 90% (%)	0,20	0,20	0,20

*tests de MOE et MOR faits dans le sens de la longueur qui est la direction principale de fabrication du panneau, ζ test de MOR et MOE faits dans la direction perpendiculaire à la direction principale du panneau

8.1.3 Fabrication de panneaux PLO en industrie

L'espèce utilisée dans la fabrication de panneaux OSB doit toujours avoir une humidité d'avant production des lamelles largement au dessus du point de saturation des fibres afin d'assurer la bonne qualité de ces dernières. Afin d'éviter les attaques des parasites comme les champignons, le bois destiné à la fabrication de panneaux OSB ne doit pas être normalement stocké plus de quatre semaines. Pendant l'hiver, le bois doit être plongé dans un bassin d'eau ayant une température entre 15 et 20°C pour le dégeler afin d'éviter la production des lamelles pouvant facilement se casser et donner des particules de petites dimensions non désirables (*Boehme, 1999*). Le bois utilisé dans la fabrication de panneaux OSB est surtout le bois d'industrie (bois de valeur dont les minuscules fragments produisent un grand effet). Le cycle de production des lamelles commence par le tronçonnage des billes en longueur de 8 à 12 pieds. Les coursons produits sont nettoyés à l'eau afin d'enlever la terre contenant les particules abrasives de leurs écorces. Ils sont par la suite écorcés et trempés dans un étang d'eau à la température de 20°C environ pour les réchauffer afin d'avoir les lamelles de bonne qualité lors de leur tranchage. Les lamelles produites ont généralement les dimensions suivantes : longueur de 114 à 152 mm, largeur de 12,7 mm, épaisseur entre 0,6 et 0,7 mm. Les lamelles sont triées pour éliminer les plus petites. Puis elles sont séchées avant d'être encollées. La formation de l'ébauche est faite à l'aide d'un dispositif d'orientation comme le montre la Figure 8.1. Puis suit le pressage à chaud de l'ébauche dans une presse en continu ou à étage. Les panneaux ainsi pressés sont délignés et poncés. Le sommaire d'une description schématique est représenté à la Figure 8.2.

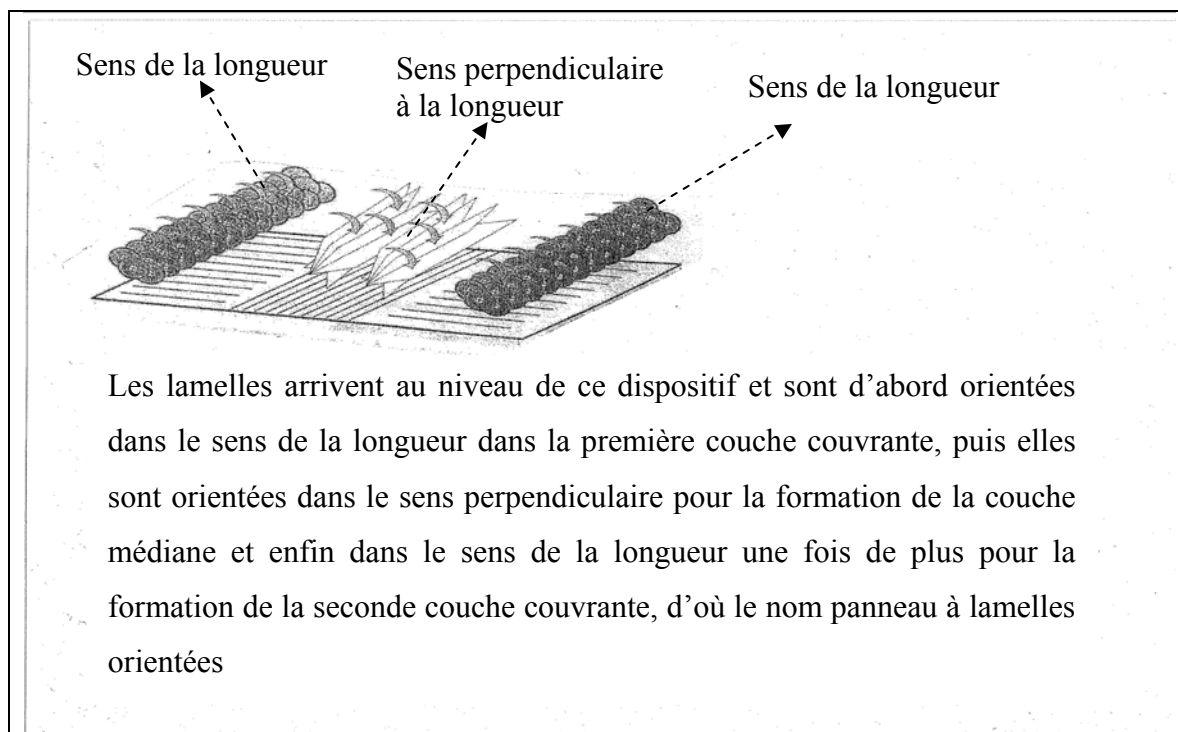
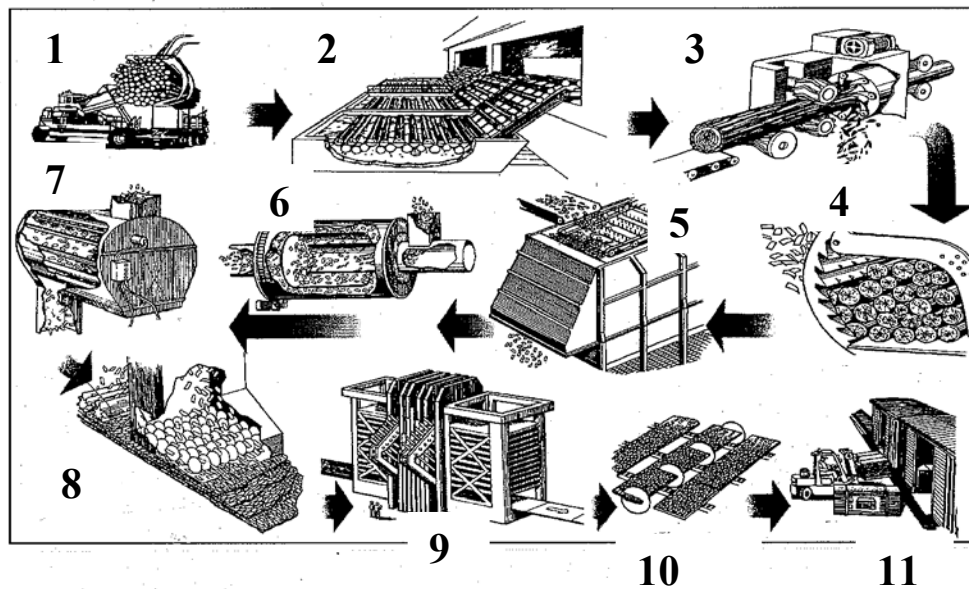


Figure 8.1 Schéma du dispositif d'orientation des lamelles lors de la fabrication de panneaux à lamelles orientées à l'échelle industrielle (*Deppe et Ernst, 2000*)



- 1** Halage et triage des billes de bois
- 2** Monte-bille
- 3** Écorçage
- 4** Production des lamelles par tranchage
- 5** Étang de trempage des lamelles
- 6** Séchage des lamelles
- 7** Encollage des lamelles
- 8** Formation de l'ébauche
- 9** Pressage
- 10** Délignage et ponçage
- 11** Expédition

Figure 8.2 Schématisation des principales étapes de fabrication de panneaux OSB en industrie (adopté de SBA, 1995)

8.1.4 Avantages et désavantages de panneaux PLO

8.1.4.1 Avantages

- Les essences de faible diamètre peuvent être utilisées pour produire les lamelles;
- Les billes de bois préparées pour la production des lamelles sont utilisées à presque 100%;
- Les assortiments de bois comme le reste de bois industriel et le bois de recyclage peuvent être récupérés sous forme de production des lamelles;
- Grande rigidité et bonne résistance à la flexion;
- Bonne stabilité dimensionnelle sous l'influence de l'humidité;
- Pas d'inconvénient d'origine biologique dans la construction;
- Facile à façonner comme le bois massif des résineux;
- Bonne et attractive apparence, couleur claire;
- Moins coûteux que le contreplaqué.

8.1.4.2 Désavantages

- Les essences utilisées dans la production des lamelles doivent avoir des troncs bien droits et sains;
- Les lamelles de petites dimensions ne peuvent pas être utilisées parce qu'elles consomment plus de colle. Elles sont éliminées par triage et l'idéal serait de les utiliser pour produire les particules destinées à la fabrication de panneaux conventionnels;
- Après le pressage, les panneaux OSB sont souvent trop secs, leur humidité peut descendre jusqu'à 2%, ce qui peut poser des problèmes à leur façonnage;

- Les propriétés peuvent grandement varier au sein d'un même panneau ou entre deux panneaux, variations causées le plus souvent par l'irrégularité du profil de masse volumique au milieu du panneau et la mauvaise orientation des lamelles;
- Les lamelles isolées peuvent se détacher de la surface et du bord du panneau OSB par simple manipulation manuelle suite à un changement des conditions climatiques;
- Dans le contreplaqué on recouvre à 100% le placage avec un adhésif résistant à l'eau alors que dans le PLO, on recouvre aux mieux 10% de la surface, ce qui rend ce panneau moins résistant à l'humidité parce qu'il se comporte plutôt comme une éponge et absorbe jusqu'à 15% d'humidité lorsque l'humidité du milieu où il se trouve est élevée. Lors de l'encollage des lamelles, 1% de cire est ajouté. L'écorce externe de bouleau blanc utilisée dans la couche centrale de PLO peut aider à résoudre ce problème en rendant le panneau mixte fabriqué plus hydrophobe.

8.1.5 Espèces de bois utilisées dans la fabrication de panneaux PLO

En Europe, les usines de fabrication de panneaux OSB utilisent presque exclusivement le bois de pin (*Pinus sylvestris*, *Pinus contorta*, *Pinus maritima*) pour la fabrication de leurs panneaux, cependant de petites quantités du sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), de mélèze d'Europe (*Larix decidua*), et de l'épicéa commun (*Picea abies*) y sont ajoutées. Selon les lieux d'implantation des usines, de petites quantités de feuillu sont aussi mélangées aux pins susmentionnés. En Amérique du Nord, c'est surtout le bois de peuplier (*Populus tremuloides*, *Populus deltoides*) et celui de tulipier de virginie (*Liriodendron tulipifera*) qui sont utilisés. En Amérique du Sud, le pin de Monterey (*Pinus radiata*) est le plus utilisé, suivi de l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus grandis*). Les espèces de bois les plus importantes utilisées de nos jours dans les différentes usines de fabrication de panneaux PLO sont présentées dans le Tableau 8.3.

Tableau 8.3 Importantes espèces de bois utilisées dans la fabrication de panneaux PLO de nos jours dans le monde (*Boehme, 1998 et 1999*)

Région	Espèces de bois
Europe	Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i> [L.])
	Pin tordu ou pin de Murray (<i>Pinus contorta</i> [Dougl. ex Loud.])
	Pin maritime (<i>Pinus maritima</i> [Lam.])
	Sapin de Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i> [Mirb.] Franco)
	Mélèze d'Europe (<i>Larix decidua</i> [Mill.])
	Épicéa commun (<i>Picea abies</i> [L.] Karst)
	Bouleau pubescent (<i>Betula pubescens</i> [Ehrh.])
	Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i> [L.])
Amérique du Nord	Peuplier faux tremble (<i>Populus tremuloides</i> [Michx.])
	Peuplier deltoïdes (<i>Populus deltoides</i> [Bartr. ex. Marsh.])
	Tulipier de virginie (<i>Liriodendron tulipifera</i> [L.])
	Chêne blanc (<i>Quercus alba</i> [L.])
	Chêne rouge (<i>Quercus rubra</i> [L.])
	Pin à bois lourd (<i>Pinus ponderosa</i> [Dougl.])
	Pin des marais (<i>Pinus palustris</i>) c'est le southern pine dans le Missisipi
Amérique du Sud	Pin de Monterey (<i>Pinus radiata</i> [D.Don.])
	Pin à encens (<i>Pinus taeda</i> [L.])
	Gommier bleu (<i>Eucalyptus globulus</i> [Labill.])
	Rose gum (appellation anglaise) (<i>Eucalyptus grandis</i>)

8.1.6 Possibilités d'utilisation des panneaux PLO

À l'origine, le panneau PLO fut un produit de concurrence au contreplaqué. De nos jours il est utilisé dans beaucoup d'autres domaines, comme :

- L'industrie des produits d'emballage pour les emballages de grande qualité et de grandes contraintes;
- Le secteur de coffrage (panneaux de coffrage recouverts);
- Bâtiments pouvant supporter des contraintes élevées aussi bien dans un environnement sec qu'humide (dalle, planchers, poutre en « I » mur et toiture etc.);
- Dans la construction des foires, des campements, des cabanons de jardin, des plateformes et des magasins (utilisé comme matériau de construction et de décoration);
- Construction automobile et des wagons;
- Renforcement, soutènement et agrandissement intérieurs;
- Fabrication des meubles décoratifs, son utilisation dans la fabrication des meubles permet de réduire leurs épaisseurs et leurs poids

8.1.7 Objectif

L'objectif général du présent travail est d'apporter une contribution à la garantie des matières premières à long terme pour la fabrication de panneaux OSB. Pour cela, une investigation de l'effet de la substitution des lamelles de la couche centrale du panneau OSB par les particules d'écorce externe de bouleau blanc sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux fabriqués a été faite.

Les investigations concernent en particulier

1. la détermination de l'effet de la substitution des lamelles de la couche centrale du panneau OSB successivement par les particules d'écorce externe de bouleau blanc

non traitées à la soude, les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude contenant 10% de fibre de bois et les particules d'écorce externe de bouleau blanc traitées à la soude sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux fabriqués,

2. la détermination de l'effet d'orientation des lamelles dans les couches couvrantes des panneaux OSB mixtes (avec les particules d'écorce au centre) sur leurs propriétés physiques et mécaniques,
3. la mesure des propriétés physico-mécaniques des panneaux fabriqués et la sélection du meilleur panneau du lot à l'aide d'une analyse statistique faite dans un plan factoriel en blocs complets.

8.2 Matériel et méthodes

8.2.1 Particules d'écorce externe de bouleau blanc et lamelles de bois

La provenance des particules d'écorce et leur préparation sont expliquées dans le chapitre 6 à la section 6.2.1, les lamelles de bois de peuplier faux tremble (*Populus tremuloides* [Michx]) sont obtenues de l'usine des panneaux OSB de Louisiana-Pacific Canada, division Québec à Chambord. Le traitement à la soude utilisé est décrit à la section 7.2.1 du chapitre 7 de ce travail.

8.2.2 Dispositif expérimental

La demande en bois d'industrie ne cesse d'augmenter au point qu'il est à prévoir dans le futur une rareté de cette matière première due à la grande concurrence entre les différentes industries de bois. Les industries des panneaux OSB souffriront certainement de cette concurrence pour l'approvisionnement en bois. On prévoit une pénurie anticipée de bois d'ici 2020, la demande serait de 50,4 M de m³ alors que la possibilité forestière serait d'un gradient allant de 46,9 M de m³ à 50,3 M de m³ (CINAF, 2003) De cette observation est née l'idée d'utiliser d'autres types de matière première pour remplacer en partie les lamelles de bois utilisées dans la fabrication de panneaux OSB. Le panneau mixte conçu après plusieurs essais préliminaires dans le cadre de ce travail de recherche est un panneau de 11

mm d'épaisseur, de masse volumique cible 625 kg/m^3 , avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc au centre et les lamelles de bois dans les couches couvrantes. La substitution des lamelles du centre par les particules d'écorce réduit les propriétés de flexion du panneau OSB, mais le panneau mixte mis sur pied est destiné au sous-plancher et sur le flanc des bâtis des meubles où les propriétés de flexion sont moins exigeantes. Par contre les propriétés physiques doivent être bonnes. Une expérience factorielle avec deux facteurs de fabrication est utilisée dans un plan en blocs complets pour mettre sur pied le plan d'expérience et faire une analyse statistique des résultats des tests effectués. Le premier facteur est qualitatif et concerne l'orientation des lamelles dans les couches couvrantes, il a deux niveaux (lamelles orientées et lamelles non orientées); le second facteur concerne le type de matériau utilisé dans la couche médiane du panneau, il est aussi qualitatif et a trois niveaux (les particules d'écorce non traitée à la soude, les particules d'écorce non traitées à la soude aux quelles 10% de fibre de bois sont ajoutés, les particules d'écorce traitées à la soude). Le traitement à la soude est fait pour améliorer la mouillabilité de la surface des particules d'écorce externe de bouleau blanc qui se comporte comme du téflon. La description de ce traitement est décrite à la section 7.2.1 du Chapitre 7. Une quantité de 10% de fibres de bois (basé sur la masse anhydre des particules utilisées dans la couche médiane) a été ajouté aux particules d'écorce pour compenser le faible taux de cellulose de ces particules et évaluer leur impact sur les propriétés de flexion des panneaux mixtes produits. Le blocage est utilisé afin de prévenir le facteur de nuisance des sources de variabilité connues et contrôlables (*Montgomery, 2005*). L'expérience factorielle étant de type 2×3 il y a donc 6 traitements par bloc. Chaque bloc correspondant à une répétition, chaque type de panneau est répété trois fois résultant en un total de 18 panneaux fabriqués. Chaque panneau est considéré comme une unité expérimentale. L'identification des six traitements est représentée dans le Tableau 8.4. Le plan d'expérience (Tableau 8.5) a été dressé à l'aide de la procédure plan du logiciel SAS afin de respecter le principe de la randomisation qui élimine la subjectivité et assure l'indépendance des erreurs. Un panneau de référence en bois a été fabriqué et les propriétés des panneaux mixtes fabriqués ont été comparées à celles de cette dernière par le truchement du test LSD (plus petite différence significative) dans un plan entièrement aléatoire.

Tableau 8.4 Description des types de panneau

	#	Types	Description
Lamelles de bois orientées	1	P_O	Panneau mixte avec lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans la couche médiane
	2	P_{O-f}	Panneau mixte avec lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau non traitées à la soude aux quelles 10% de fibre de bois sont ajoutés dans la couche médiane
	3	P_{O-s}	Panneau mixte avec lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc traitées à la soude dans la couche médiane
Lamelles de bois non orientées	4	P_{nO}	Panneau mixte avec lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans la couche médiane
	5	P_{nO-f}	Panneau mixte avec lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude aux quelles 10% de fibre de bois sont ajoutés dans la couche médiane
	6	P_{nO-s}	Panneau mixte avec lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc traitées à la soude dans la couche médiane

Tableau 8.5 Plan d'expérience obtenu de la randomisation

Numéro de bloc	Traitements					
1	3= P _{O-s}	5= P _{nO-s}	2= P _{O-f}	6= P _{nO-s}	1= P _O	4= P _{nO}
2	6= P _{nO-s}	2= P _{O-f}	3= P _{O-s}	4= P _{nO}	1= P _O	5= P _{nO-s}
3	1= P _O	5= P _{nO-s}	4= P _{nO}	2= P _{O-f}	3= P _{O-s}	6= P _{nO-s}

8.2.3 Fabrication de panneaux et tests effectués

Les paramètres de fabrication sont présentés dans le Tableau 8.6. Les particules de chaque couche sont encollées dans un mélangeur rotatif pendant cinq minutes. L'ébauche de chaque panneau est faite manuellement dans une forme avant le pressage à chaud à l'aide de la presse Dieffenbacher équipée d'un système de contrôle de Press-Man ARC. Les spécimens des différents tests sont préparés suivant les exigences de la norme ASTM D-1037-99 et le résultat de tests effectué a été comparé à la valeur de la norme ANSI A208.1-1999. Les panneaux sont conditionnés jusqu'à l'équilibre de leur taux d'humidité dans une chambre où la température est 21°C et l'humidité relative 65%. Le conditionnement a duré deux semaines. Par la suite ils sont sablés jusqu'à l'épaisseur cible de 11 mm avant d'être découpés pour les différents tests. Quelques spécimens des panneaux fabriqués sont représentés à la Figure 8.3.



Figure 8.3 Spécimens des panneaux fabriqués

Tableau 8.6 Paramètres de fabrication

Dimensions du panneau (longueur × largeur × épaisseur)	0,56 × 0,46 × 0,012 m (non-sablé) et 0,56 × 0,46 × 0,011 m (sablé)
Masse volumique cible	625 kg/m ³
Ratio de compression (Cr)*	5.8 pour tous les panneaux mixtes et 4.5 pour le panneau de référence
Temperature des plateaux	200° C
Pression de la presse	180 KPa
Colle utilisée	Phénol-formaldéhyde (Borden Casco-Resin 52% de solide). 7% (basé sur la masse anhydre des particules d'écorce externe de bouleau blanc dans la couche médiane) dans les particules d'écorce externe de bouleau blanc dans la couche médiane et 5% (basé sur masse anhydre des lamelles de bois dans les couches couvrantes) dans les lamelles des couches couvrantes
Cire	1% (basé sur masse anhydre des lamelles de bois dans les couches couvrantes) dans les lamelles de bois de la couche couvrante, pas de cire dans les particules d'écorce externe de bouleau utilisées dans la couche médiane parce que ces particules sont déjà très hydrophobes et difficiles à mouiller.
Temps de fermeture de la presse	25 secondes
Temps de polymérisation	4 minutes
Temps d'ouverture de la presse	1 minute avec trois paliers de décompression

*Cr = épaisseur de matelas/épaisseur de panneau

Dans le cadre de ce travail de recherche, 7% de phénol-formaldéhyde (PF) liquide de cette colle ont été utilisés dans les particules d'écorce de la couche médiane parce que ces

particules sont fines (granulométrie inférieure à 1 mm) et 5% de PF (au lieu de 3% comme en industrie) ont été utilisés dans les lamelles de bois des couches couvrantes pour palier aux pertes lors de l'encollage des lamelles et lors de la formation manuelle de l'ébauche. Lors de l'encollage, il y a toujours une petite quantité de colle qui reste dans le tuyau et sur les parois du mélangeur et le temps mis pour former l'ébauche génère aussi une perte de la colle par évaporation alors qu'en industrie la production en série minimise ce genre de perte. La colle en poudre n'a pas été utilisée dans la couche centrale des panneaux mixtes comme c'est le cas par exemple à l'usine OSB de Chambord parce que dans le cas de ce travail, les lamelles de bois ont été substituées par les particules hydrophobes d'écorce externe de bouleau blanc. L'application de la PF en poudre sur de telles particules aurait été un échec parce que la poudre n'aurait pas adhéré à la surface sans pores de ces particules et se serait retrouvé tout simplement au fond du mélangeur. Toutefois, dans le cas du bois, la PF en poudre est préférable, car il est prouvé que son utilisation dans les lamelles du centre des panneaux OSB donne une meilleure résistance mécanique surtout pour le grade des panneaux OSB destinés à la fabrication des poutres en I (*Riedl, 2004*).

8.2.4 Détermination des propriétés physiques et mécaniques

Les informations de cette section sont similaires à celles décrites à la section 7.2.5 du Chapitre 7 à l'exception de la dureté qui n'a pas été mesurée et du changement de la valeur d'humidité relative en phase d'adsorption dans la chambre de conditionnement qui passe de 80 à 90%.

8.3 Résultats et discussion

8.3.1 Résultats des propriétés mécaniques

8.3.1.1 Profil de masse volumique

Les six types de panneau mixte fabriqués ont des profils de masse volumique semblables. La Figure 8.4 présente un profil de masse volumique typique d'un panneau mixte et d'un panneau de référence fait entièrement de lamelles de bois. La masse volumique moyenne au centre du panneau mixte est plus élevée que celle du panneau de référence. Cette différence

est due à la meilleure compaction des particules d'écorce externe de bouleau blanc utilisées au centre du panneau. Le profil de masse volumique du panneau mixte est plus plat et plus régulier que celui du panneau de référence. L'utilisation des particules d'écorce au centre du panneau mixte conduit à une diminution de la densification des lamelles des couches couvrantes.

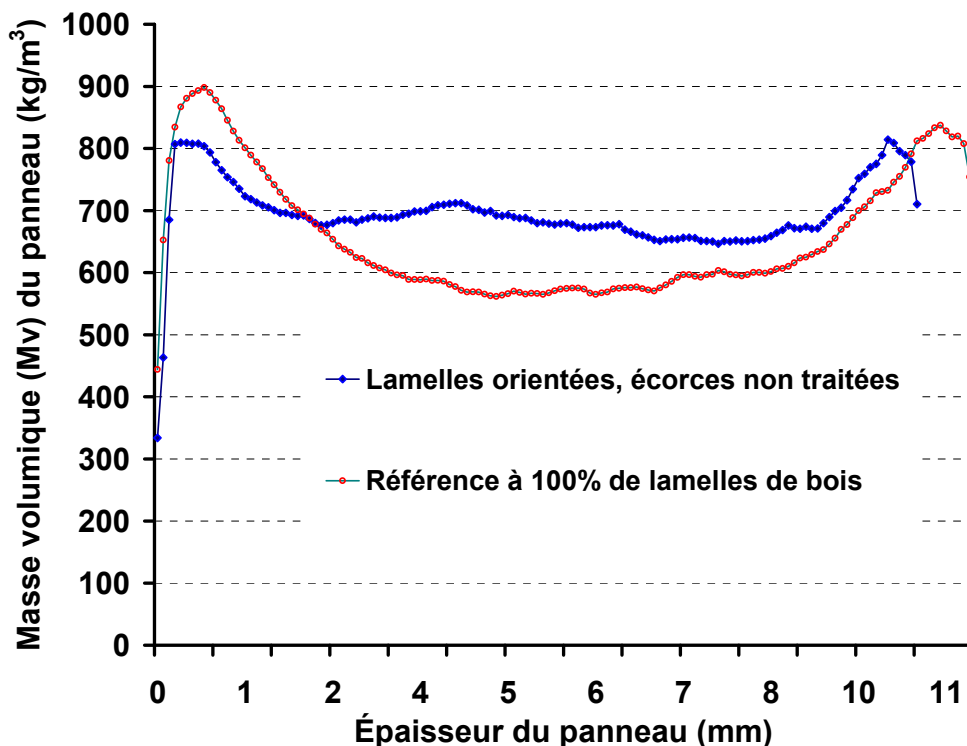


Figure 8.4 Profils de masse volumique typique du panneau de référence en lamelle de bois et du panneau mixte avec les lamelles de bois orientées en surface et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude au centre

8.3.1.2 Masse volumique moyenne des différents panneaux

Les histogrammes de la Figure 8.5 représentent la masse volumique moyenne de chaque type de panneau. Cette masse volumique est la moyenne arithmétique faite sur trois spécimens destinés aux mesures du module de rupture et du module d'élasticité. La valeur de cette masse volumique moyenne pour tous les types de panneau est au dessus de la masse volumique cible qui est 625 kg/m^3 . Cette variation est due en partie par la formation

manuelle de l'ébauche et au sablage des panneaux qui a ramené les épaisseurs des échantillons utilisés en dessous de 11 mm qui est l'épaisseur-cible. Seuls les panneaux avec les fibres de bois mélangées aux particules d'écorce ont une masse volumique moyenne qui se rapproche de 625 kg/m^3 .

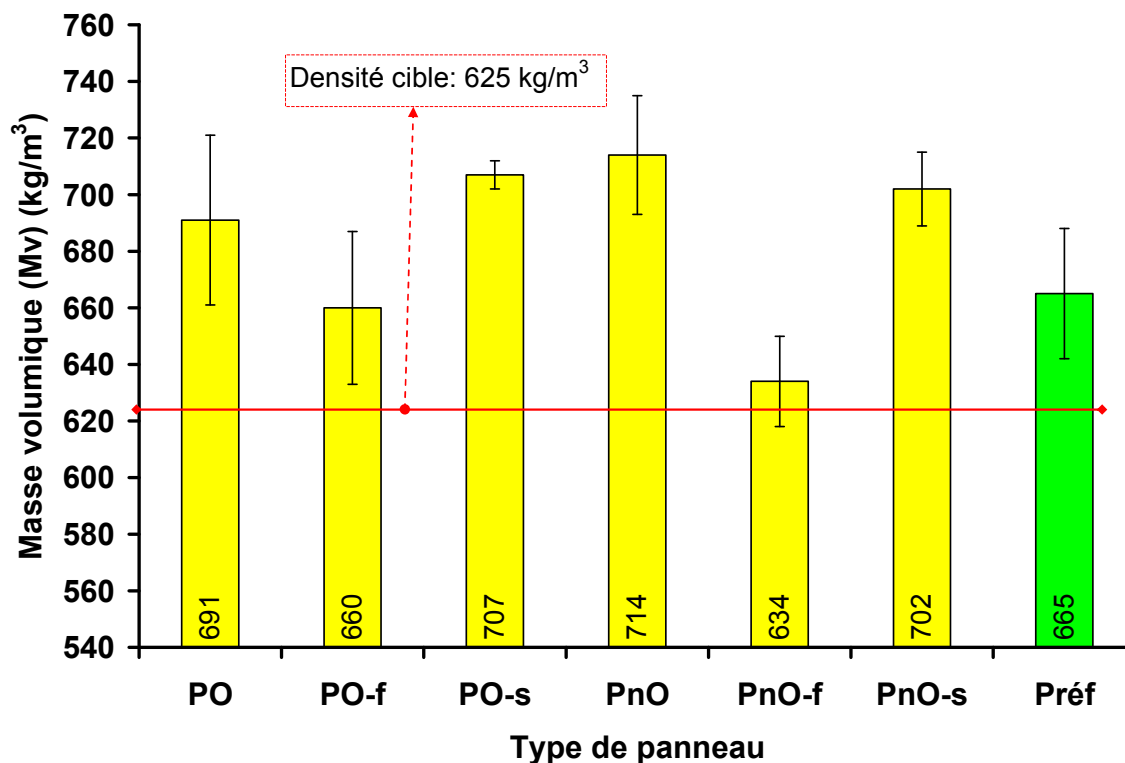


Figure 8.5 Masse volumique des panneaux (kg/m^3) (valeur moyennes et écart-types)

8.3.1.3 Module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau (MOE*)

Les valeurs du module d'élasticité mesurées dans le sens de la longueur du panneau (MOE*) sont représentées à la Figure 8.6. Les panneaux ayant des lamelles orientés en surface ont des MOE* qui rencontrent et dépassent les valeurs normalisées des panneaux de type O-1 et R-1. Par contre les panneaux avec les lamelles non orientées en surface ont certes des valeurs de MOE* qui rencontrent la norme des panneaux de type R-1 mais ces valeurs sont inférieures à l'exigence des panneaux de type O-1. L'ajout des fibres de bois aux particules d'écorce externe de bouleau blanc n'améliore pas le MOE* du panneau. Les panneaux avec les particules d'écorce au centre ont des valeurs de MOE* inférieures à celle

du panneau de référence. Donc la substitution des lamelles par les particules d'écorce réduit la valeur du MOE* du panneau fabriqué.

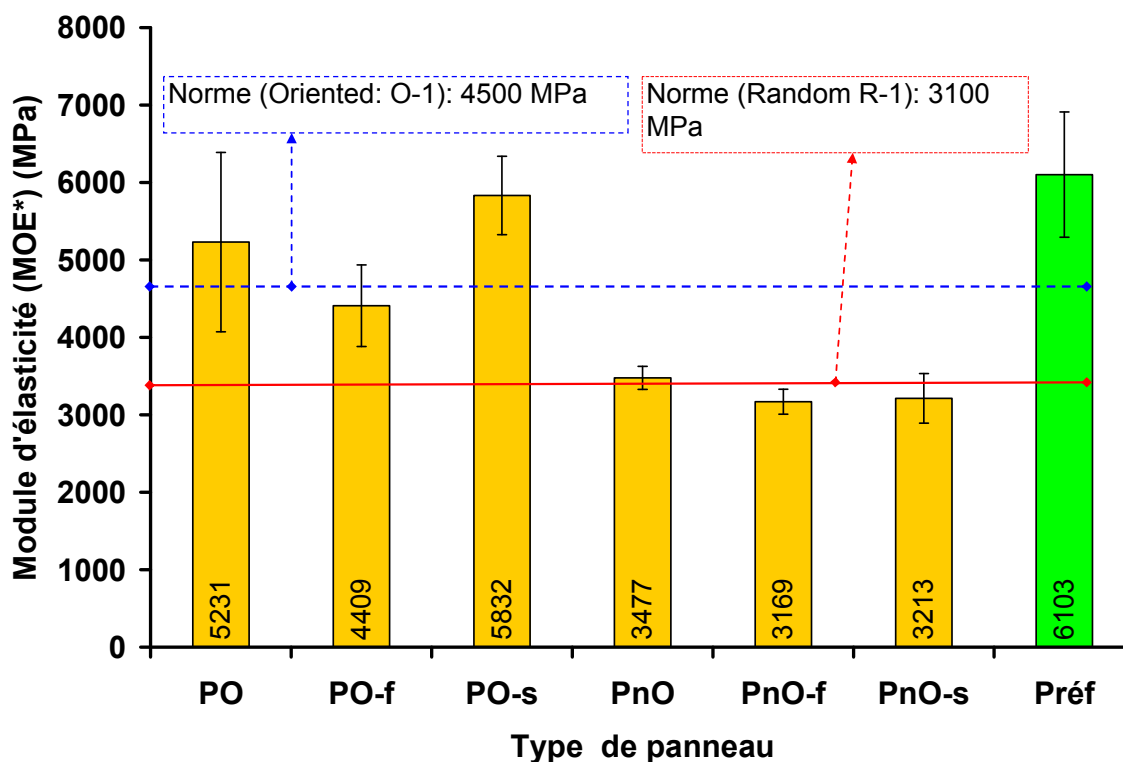


Figure 8.6 Module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau (MOE*) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.1.4 Module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE^z)

Les valeurs du module d'élasticité mesurées dans le sens de la largeur des panneaux fabriqués (MOE^z) sont représentées à la Figure 8.7. Tous les panneaux ayant les lamelles orientées en surface ont chacun un MOE^z qui rencontre la valeur normalisée pour ce type de panneau (O-1) et tous les panneaux avec les lamelles non orientées en surface à l'exception du panneau P_{no-f} ont aussi chacun un MOE^z qui rencontre les exigences de la norme pour cet autre groupe de panneau (R-1). Les panneaux mixtes avec les lamelles orientées en surface ont un MOE^z deux fois plus petit que celui du panneau de référence et les panneaux avec les lamelles non orientées en surface, ce qui s'explique par l'utilisation des particules d'écorce au centre et la diminution en longueur des lamelles lorsqu'elles sont

coupées dans le sens de leur largeur. Le traitement à soude des particules d'écorce n'influence pas le MOE^{ζ} dans le sens de la largeur des panneaux. Il est difficile d'interpréter l'effet de l'ajout des fibres de bois aux particules d'écorce dans ce cas parce que dans le groupe des panneaux avec les lamelles orientées en surface c'est PO-f qui a le MOE^{ζ} le plus élevé, alors que dans celui avec les lamelles de bois non orientées en surface, PnO-f a le MOE^{ζ} le plus faible.

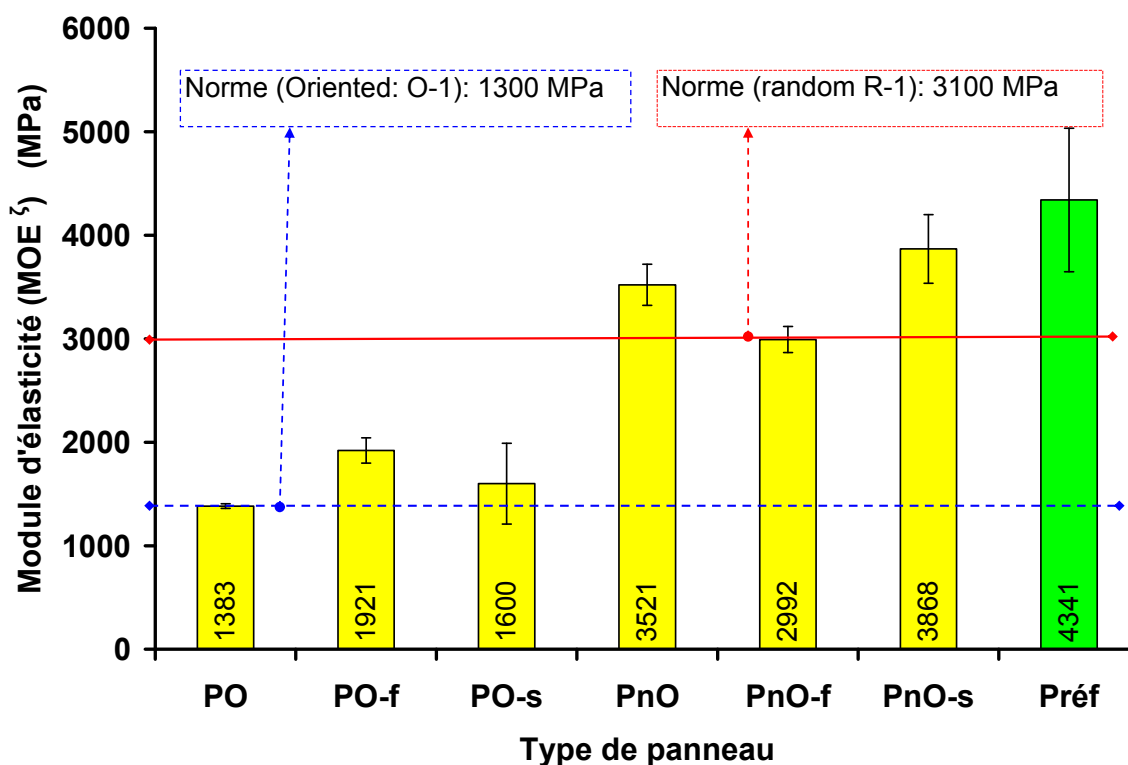


Figure 8.7 Module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE^{ζ}) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.1.5 Module de rupture dans le sens de la longueur du panneau (MOR^*)

Les valeurs de module de rupture mesurées dans le sens de la longueur du panneau (MOR^*) sont représentées à la Figure 8.8. Tous les panneaux ayant les lamelles orientées en surface ont chacun un MOR^* qui rencontre la valeur normalisée pour ce type de panneau (O-1) et tous les panneaux avec les lamelles non orientées en surface ont aussi chacun un MOR^* qui rencontre les exigences de la norme pour cet autre groupe de panneau

(R-1). Toutefois, les panneaux avec les lamelles orientées en surface ont des valeurs de MOR* supérieures à celles des panneaux ayant des lamelles non orientées en surface. Le traitement à la soude des particules d'écorce n'a eu aucun effet significatif sur le MOR*. Le panneau avec les écorces traitées à la soude et les lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes a un MOR* de même ordre de grandeur que celui du panneau de référence. Le MOR* de tous les panneaux mixtes avec les lamelles non orientées en surface est inférieur à celui du panneau de référence à l'exception du panneau P_{no}. La non orientation des lamelles de bois dans les couches couvrantes a diminué de manière significative le MOR* (Figure 8.8).

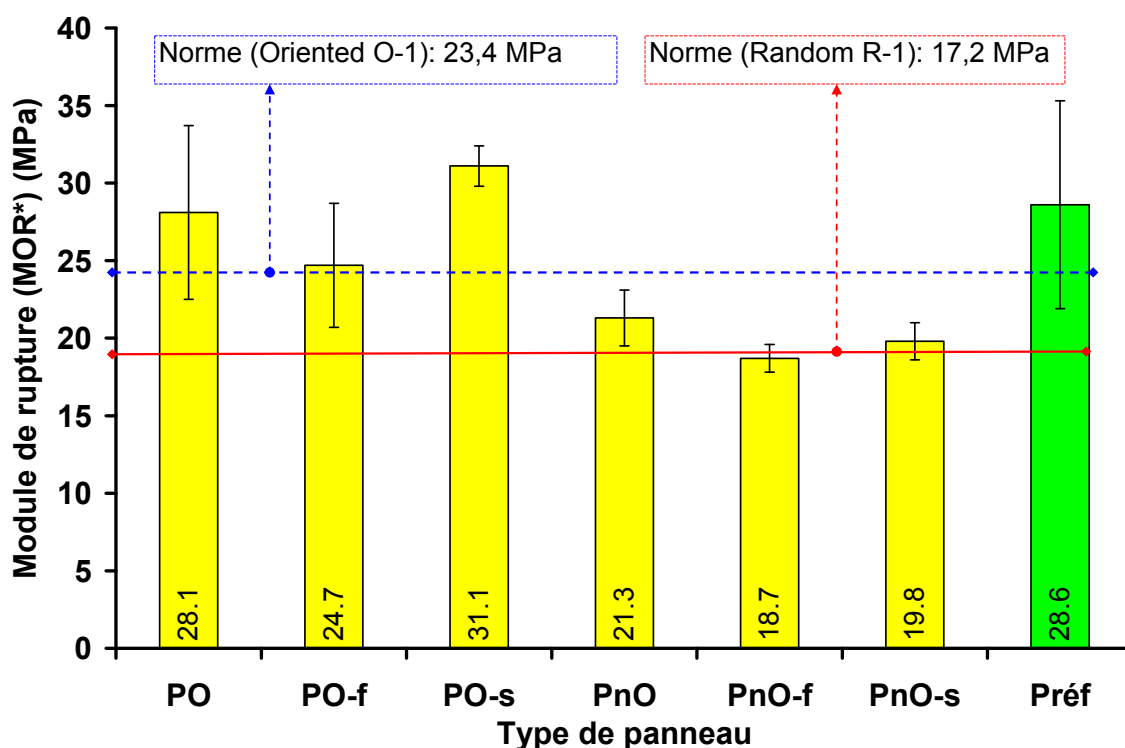


Figure 8.8 Module de rupture dans le sens de la longueur du panneau (MOR*) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.1.6 Module de rupture dans le sens de la largeur du panneau (MOR^ζ)

Les valeurs du module de rupture mesurées dans le sens de la largeur du panneau (MOR^ζ) sont représentées à la Figure 8.9. Tous les panneaux ayant les lamelles orientées en surface ont eu chacun un MOR^ζ qui a rencontré la valeur normalisée pour ce type de panneau (O-1)

et tous les panneaux avec les lamelles non orientées en surface ont aussi chacun un MOR^{ζ} qui a rencontré les exigences de la norme pour cet autre groupe de panneau (R-1). Toutefois, les panneaux mixtes avec les lamelles orientées en surface ont des valeurs de MOR^{ζ} inférieures à celles des panneaux ayant des lamelles non orientées en surface. Le traitement à la soude des particules d'écorce n'influe pas sur le MOR^{ζ} . Les MOR^{ζ} de tous les panneaux mixtes avec les lamelles orientées dans les couches couvrantes sont inférieurs à celui du panneau de référence.

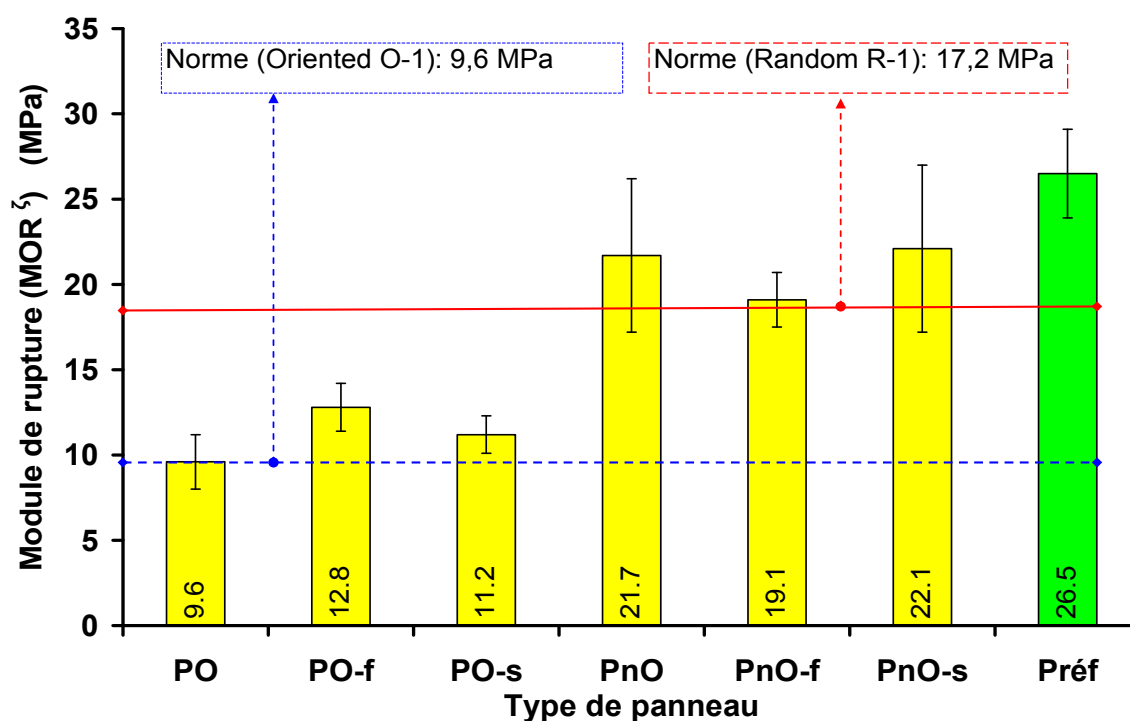


Figure 8.9 Module de rupture dans le sens de la largeur du panneau (MOR^{ζ}) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.1.7 Cohésion interne

La cohésion interne (CI) de chaque panneau fabriqué est représentée à la Figure 8.10. Le type d'orientation n'influe pas sur la cohésion interne, ce qui se vérifie aussi par la valeur normalisée qui est la même tant pour les panneaux à lamelles orientées que ceux à lamelles non orientées. Les panneaux avec les particules d'écorce non traitées à la soude dans leur couche médiane ont les valeurs de CI les plus élevées. Les attentes faites des particules

d'écorce traitées à la soude n'ont pas été comblées parce que les panneaux ayant ces particules dans leur centre ont des valeurs de CI statistiquement égales à celles des panneaux avec les particules d'écorce non traitées. Ces résultats sont dus au fait que le traitement à la soude rend la surface des particules d'écorces plus mouillable mais fragilise en même temps la structure des subérines qui participe à la rigidité de l'écorce. L'ajout des fibres de bois aux particules d'écorces non traitées à la soude ne favorise guère la cohésion interne du panneau fabriqué parce que le lien entre les fibres et les particules d'écorce est faible dû à l'hydrophobicité des particules d'écorce de bouleau blanc non traitées à la soude. Cela s'explique par la faible granulométrie des particules d'écorce utilisées. En effet, ces particules d'écorce externe de bouleau ont été broyées de manière à avoir une granulométrie comprise entre 0,25 mm et 1 mm. Lors de la phase d'essai, les particules de la même écorce avec une granulométrie comprise entre 2 mm et 6 mm ont été utilisées pour fabriquer le même type de panneau et la cohésion interne du panneau fabriqué était en dessous de la valeur normalisée, raison pour la quelle elles ont été une fois de plus finement broyées

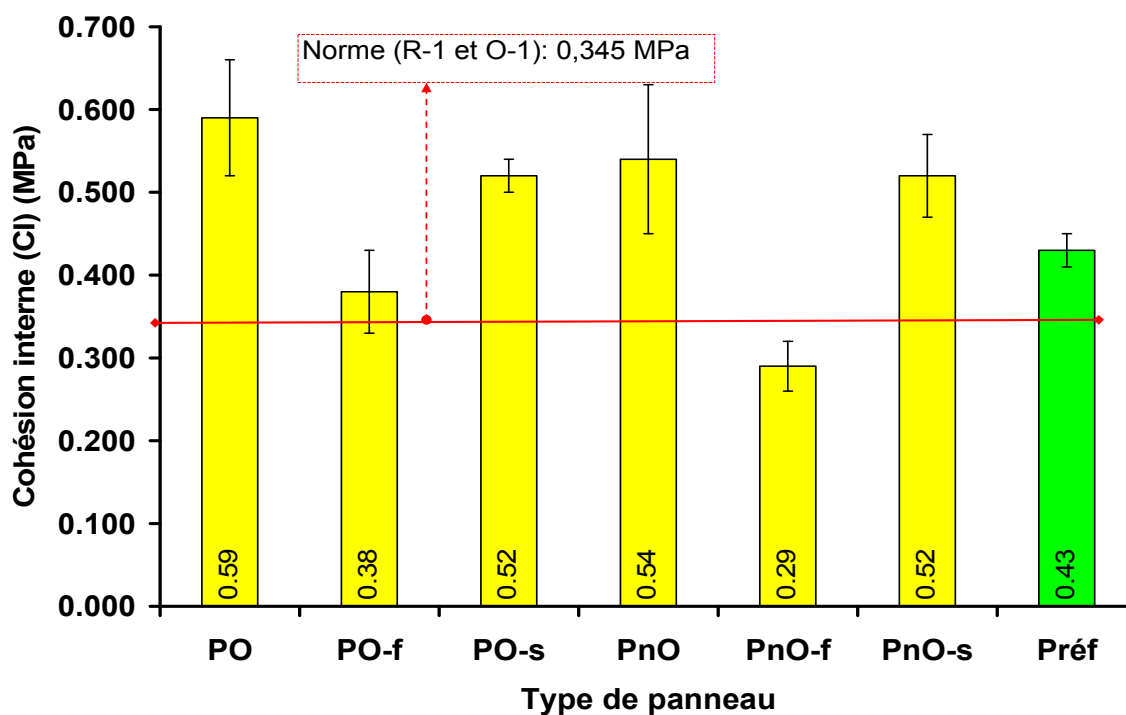


Figure 8.10 Cohésion interne (CI) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.2 Résultats des propriétés physiques

8.3.2.1 Gonflement en épaisseur

Les valeurs de gonflement en épaisseur (GE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau de chaque panneau sont représentées à la Figure 8.11. Le premier fait saillant lié à ces histogrammes est qu'après deux heures d'immersion dans l'eau, les panneaux mixtes ont chacun un gonflement qui avoisinent et dépassent dans certains cas les 75% de la valeur du gonflement après 24 heures d'immersion, phénomène qui ne s'observe pas du tout sur le panneau de référence où le GE après deux heures est quatre fois plus faible que le GE après 24 heures. Tous les panneaux ont une valeur de GE après 24 heures d'immersion dans l'eau au dessus de la valeur normalisée qui est 15%. Ceci pourrait s'expliquer par la mauvaise adhérence à l'interface entre la lamelle de bois et les particules d'écorce dans le cas des particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois. Le traitement à la soude rend les particules d'écorces utilisées dans la fabrication de panneaux très hydrophiles : c'est ce qui explique leur GE élevé. Le gonflement des panneaux mixtes se passe en grande partie dans les couches de lamelle de bois dans les cas des panneaux avec les particules d'écorce non traitées à la soude au centre. Cette différence a été vérifiée par la mesure faite sur un panneau monocouche constitué exclusivement des particules d'écorce externe de bouleau blanc qui donnait une valeur de gonflement en épaisseur de 5% après 24 heures d'immersion dans l'eau. Pour que les panneaux OSB passent généralement la norme de gonflement en épaisseur après 24 heures d'immersion dans l'eau, ils sont empilés à chaud une fois sortis de la presse au niveau de l'industrie. Dans le cadre d'un travail à l'échelle du laboratoire, l'empilage à chaud est inefficace parce que les panneaux sont de petites dimensions et sont pressés un par un. Une solution dans ce cas serait de conserver les panneaux sortis de la presse dans un four à 80°C sous pression (*Riedl, 2004*). Dans le même ordre d'idée, *Chan et al., (2002)* ont pressé des panneaux PLO encollés à la résine PF et juste après le pressage, ils les ont traité à chaud pendant 2 heures à la température de 150° C. Ils ont noté que les panneaux traités à chaud après pressage avait moins gonflé en épaisseur que les panneaux non traités. C'est encore une preuve que le traitement à chaud mener en fin de pressage des panneaux OSB encollés avec la PF réduit considérablement leur gonflement en épaisseur.

Ce procédé n'a pas été utilisé dans le cadre de ce travail par manque d'équipement appropriés. À défaut de conserver les panneaux sortis de la presse dans un four à 80° C sous pression, l'empilage à chaud quoiqu'inefficace à l'échelle du laboratoire a été faite, même si les exigences de la norme au niveau du gonflement en épaisseur n'ont pas été réalisées.

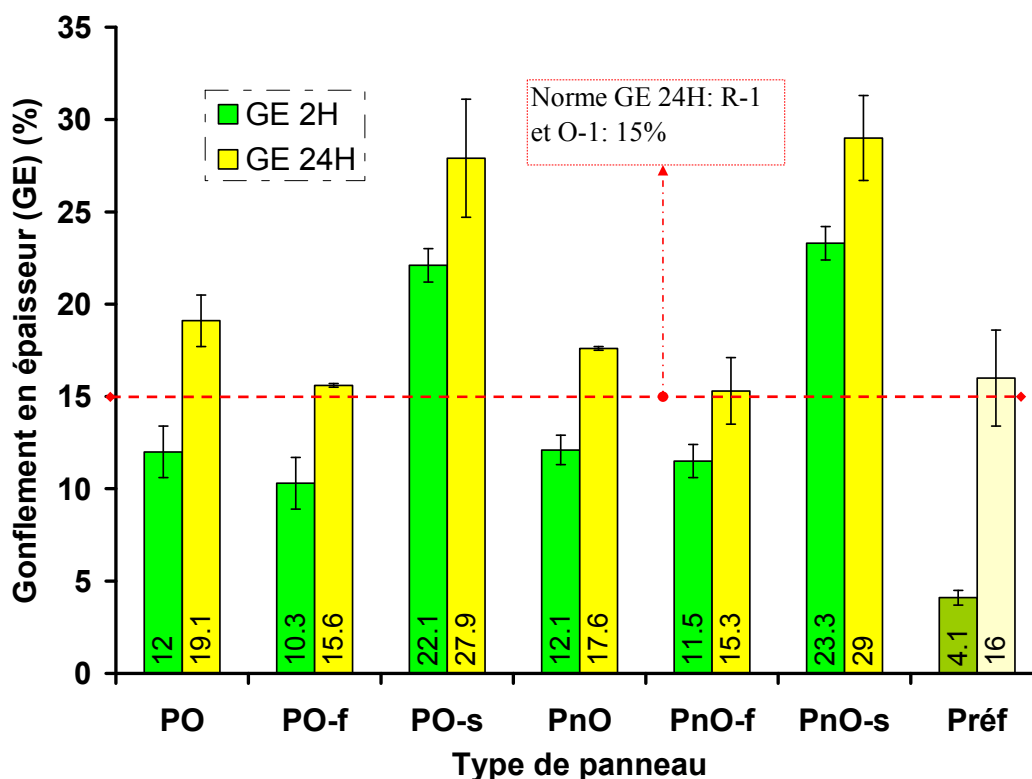


Figure 8.11 Gonflement en épaisseur (GE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.2.2 Absorption d'eau

Les valeurs d'absorption d'eau (abs) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau de chaque panneau sont représentées à la Figure 8.12. Le type d'orientation des lamelles n'a eu aucune influence sur l'absorption d'eau. L'absorption d'eau après 24 heures d'immersion dans l'eau s'est faite en grande partie juste après deux heures d'immersion dans l'eau des panneaux mixtes. Les panneaux avec les particules d'écorce non traitées à la soude et sans fibres de bois ajoutées sont ceux ayant absorbé le moins d'eau. Les panneaux avec les particules d'écorce traitées à la soude sont ceux ayant absorbé plus d'eau parce que

ce traitement les a rendu hydrophiles. L'ajout des fibres de bois aux particules d'écorce non traitées a aussi favorisé une légère augmentation d'absorption d'eau après 24 heures d'immersion dans l'eau des panneaux fabriqués.

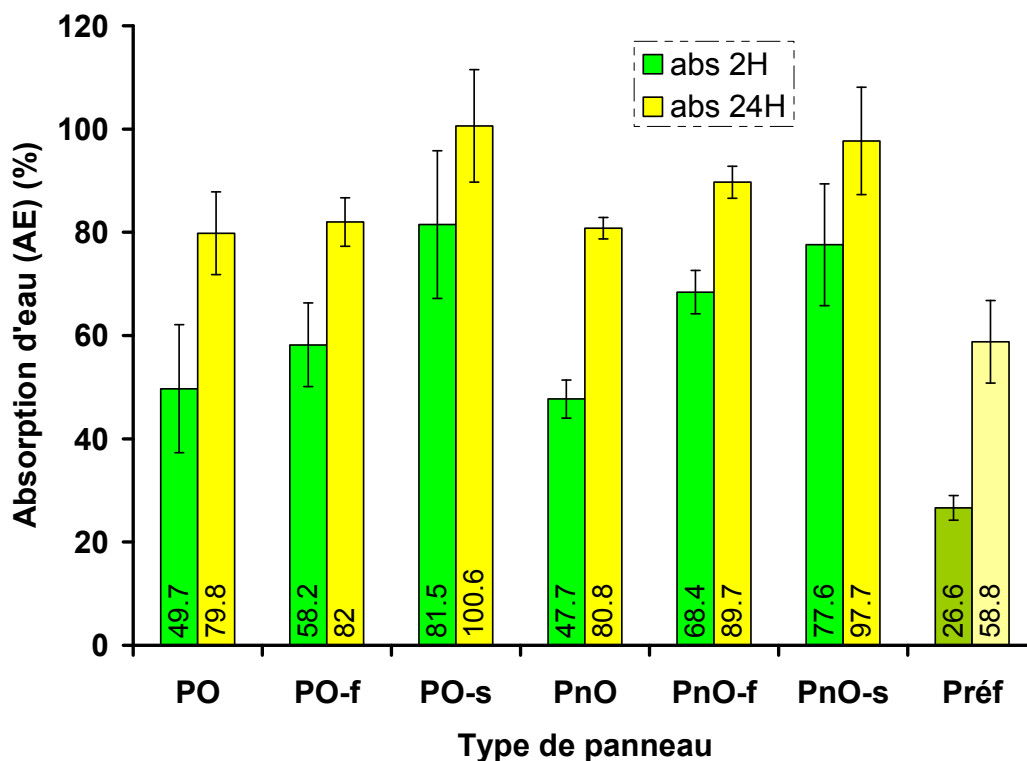


Figure 8.12 Absorption d'eau (AE) après 2 heures et 24 heures d'immersion dans l'eau (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.2.3 Dilatation linéaire

Les histogrammes de la Figure 8.13 représentent la dilatation linéaire (DL) des différents panneaux fabriqués. Tous ces panneaux ont eu une DL en dessous du seuil de 20% exigé par la norme. Les valeurs de ces différentes dilatations linéaires sont très proches. Les résultats d'ANOVA montrent que la valeur de F du modèle liée à la mesure de la dilatation linéaire n'est pas significative (Tableau 8.6). Ce qui veut dire qu'il n'a eu aucun effet de traitement des particules d'écorce et de l'orientation des lamelles dans les couches couvrantes sur la dilatation linéaire des panneaux fabriqués.

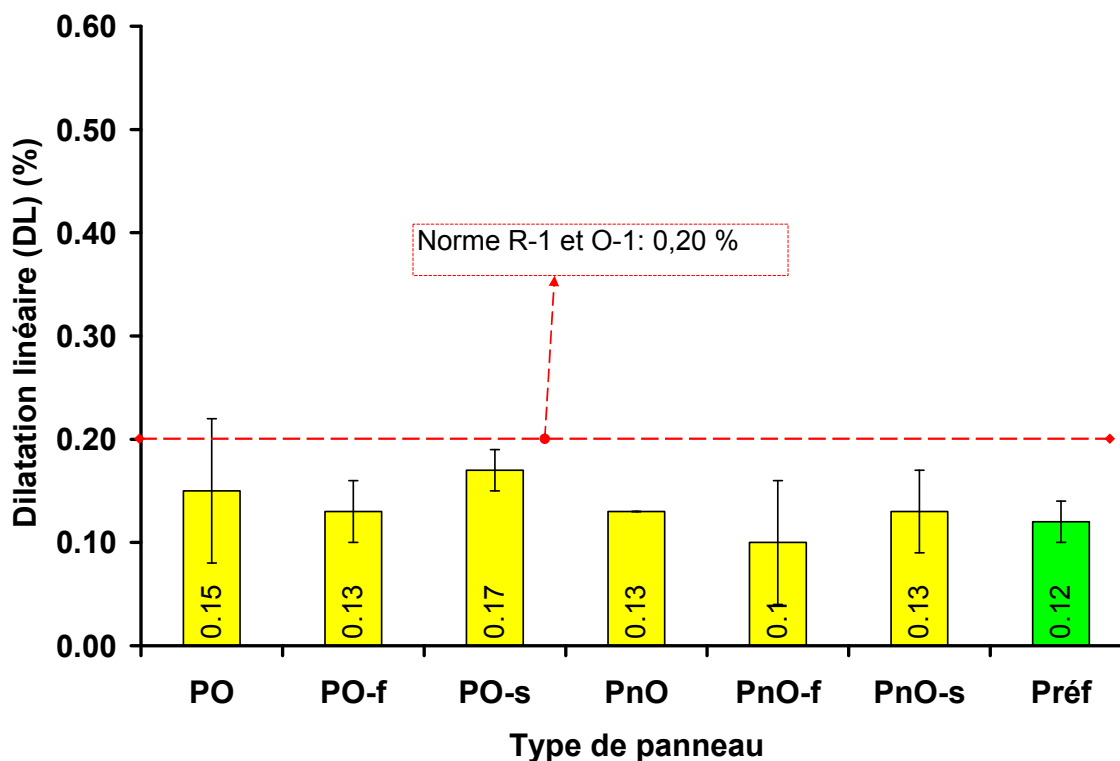


Figure 8.13 Dilatation linéaire (DL) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.2.4 Dilatation en épaisseur

Les histogrammes de la Figure 8.14 représentent la dilatation dans le sens de l'épaisseur de chaque panneau. Les panneaux ayant les particules d'écorce non traitées dans leur couche médiane sont celles qui se dilatent moins dans le sens de l'épaisseur. Ils sont plus stables que le panneau de référence. Le traitement à la soude des particules d'écorce contribue à l'augmentation de la dilatation dans le sens de l'épaisseur des panneaux fabriqués. L'ajout des fibres de bois aux particules d'écorce non traitée à la soude n'a aucun effet sur la dilatation en épaisseur des panneaux mixtes fabriqués. L'orientation des lamelles dans les couches couvrante des panneaux mixtes fabriqués n'a aucun effet sur leur dilatation dans le sens de l'épaisseur.

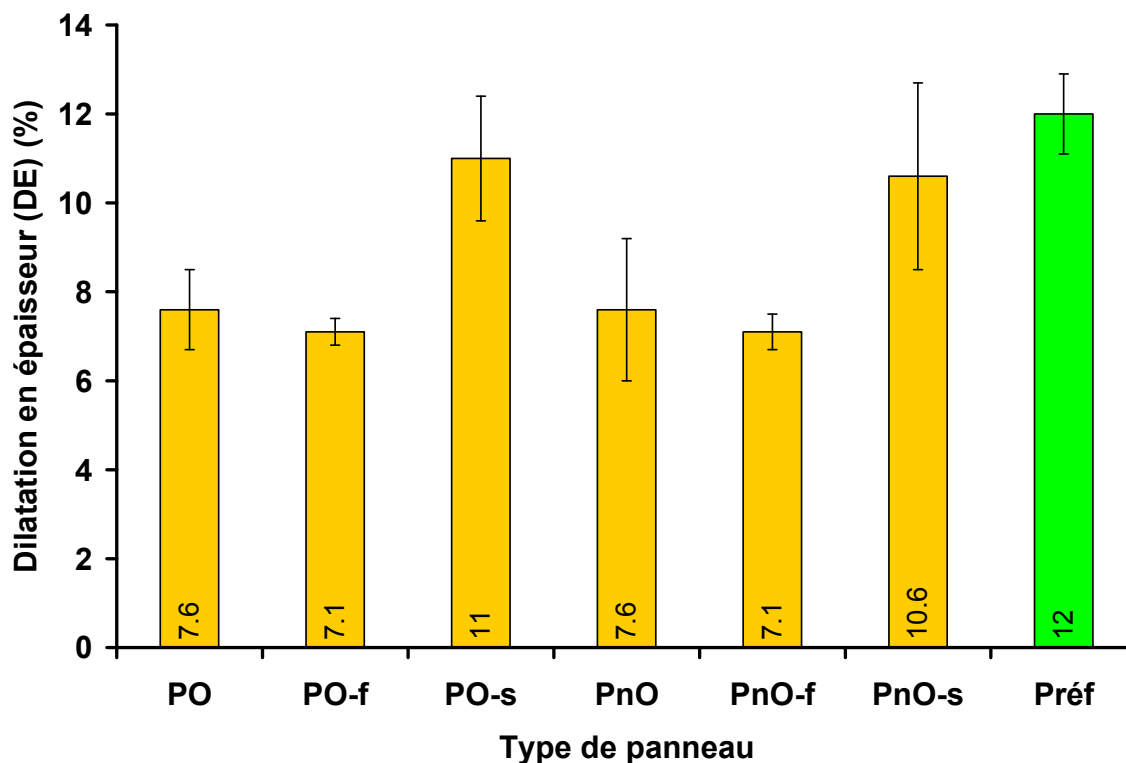


Figure 8.14 Dilatation en épaisseur (DE) (valeurs moyennes et écart-types)

8.3.3 Analyse de variance (ANOVA)

Le résumé de l'analyse de variance (ANOVA) est présenté dans le Tableau 8.6. ANOVA est utilisée dans ce chapitre juste pour les variables représentant les propriétés normalisées des panneaux produits parce que ces propriétés sont les plus importantes. Ces variables sont: Le module d'élasticité dans le sens de la longueur (MOE^*) et de la largeur du panneau (MOE^{ζ}), le module de rupture dans le sens de la longueur (MOR^*) et de la largeur du panneau (MOR^{ζ}), la cohésion interne (CI), le gonflement en épaisseur (GE) et la dilatation linéaire (DL). Afin de mieux analyser les données dans le plan factoriel, l'interaction « orientation * (type de matériel) » avec deux degrés de liberté a été décomposée en contrastes suivants : orientation* (particules non traitées versus particules traitées) et orientation*(particules non traitées versus particules non traitées plus fibres de bois), les particules non traitées étant bien évidemment les particules d'écorce sans soude et les particules d'écorce sans soude avec ajout de fibres de bois. Les valeurs de F liées au

traitement pour toutes les variables dépendantes mesurées sauf celle de la dilatation linéaire sont significatives. Les valeurs de F liées au blocage pour toutes les variables dépendantes susmentionnées ne sont pas significatives. Cela veut dire qu'on aurait pu se passer du blocage et faire l'analyse dans un plan entièrement aléatoire. La seule interaction significative est observée dans la mesure du module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE^{ζ}), et concerne l'interaction orientation par (particules d'écorce sans soude versus particules d'écorce sans soude plus fibres de bois); une interaction significative dans ce cas veut dire que le choix d'un panneau se fera en considérant concomitamment le type d'orientation des lamelles dans les couches couvrantes et le type de matériel utilisé au centre des panneaux. Dans cette interaction l'effet orientation seul est hautement significatif. L'interprétation visuelle de cette interaction est faite à la Figure 8.15 Les résultats d'ANOVA montrent aussi un effet hautement significatif de l'orientation des lamelles dans les couches couvrantes des panneaux indépendamment du type de matériel utilisé au centre pour les mesures de MOE^* , MOR^* et MOR^{ζ} , ce qui veut dire que si le choix d'un panneau est fait à base d'une de ces propriétés, seule l'orientation sera pris en compte. Il y a aussi un effet hautement significatif du type de matériel utilisé au centre des panneaux fabriqués dans les mesures de la CI et du GE indépendamment du type d'orientation des lamelles dans les couches couvrantes des panneaux fabriqués, ce qui veut dire que le choix d'un panneau dans ce cas sera fait en considérant seulement le type de matériel utilisé au centre.

Tableau 8.6 Résumé de l'analyse de variance (ANOVA) (dl = degré de liberté, MOE* module d'élasticité sens longueur du panneau MOE ζ = module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau, MOR* = module de rupture dans le sens de la longueur du panneau, MOR ζ = module de rupture dans le sens de la largeur du panneau, CI = cohésion interne, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire)

Sources de variation	Propriétés mécaniques et physiques (valeurs de F)							
	DI	MOE *	MOE ζ	MOR *	MOR ζ	CI	GE	DL
Blocs	2	0,09 ns	0,45 ns	0,20 ns	1,02 ns	0,45 ns	1,85 ns	0,42 ns
O	1	26,35 **	163,90 **	18,46 **	33,18 **	2,19 ns	0,06 ns	1,55 ns
M	2	1,47 ns	1,71 ns	1,49 ns	0,13 ns	16,45 **	60,48 **	0,60 ns
O*M	2	1,21 ns	7,07 *	0,76 ns	1,08 ns	0,57 ns	0,52 ns	0,06 ns
Contrastes								
O*((nt et ntf) Vs ts)	1	2,10 ns	4,80 ns	1,48 ns	0,22 ns	0,96 ns	0,81 ns	0,05 ns
O*(nt Vs ntf)	1	0,33 ns	9,33 *	0,04 ns	1,94 ns	0,19 ns	0,24 ns	0,07 ns

Description des abréviations sous la colonne de la source de variation : **O** = orientation des lamelles dans les couches couvrantes (lamelles orientées versus lamelles non orientées) **M** = type de matériel utilisé dans la couche médiane des panneaux (écorces non traitées à la soude (**nt**), écorces non traitées à la soude avec ajout des fibres de bois (**ntf**), écorces traitées à la soude (**ts**), O*M= interaction entre l'orientation et le type de matériel, O*((nt et ntf)Vs ts) = contraste entre l'orientation des lamelles et les matériaux sans soude comparé au particules d'écorce traitées à la soude, O*(nt Vs ntf) = contraste entre l'orientation des lamelles et les particules d'écorce non traitées à la soude comparée aux particules d'écorces non traitées à la soude avec ajout des fibres de bois, **ns** = non significatif, * = significatif à 0,05 du niveau de probabilité ** = significatif à 0,01 du niveau de probabilité

L'erreur type notée (ET) associée à ces interactions est calculée par la formule :

$$E.T = \sqrt{\frac{2M.S.E}{r}}$$
 où M.S.E est le carré moyen de l'erreur expérimentale d'ANOVA, r est le

nombre de répétition (Collin, 2003). La valeur calculée de cette erreur type vaut 247. L'erreur type est représentée sur les histogrammes d'interaction de la Figure 8.15 par les barres dont la hauteur est deux fois sa valeur. Ces barres se recouvrent partiellement aux points où l'interaction n'est pas significative. Les histogrammes de la Figure 8.15 montrent l'effet hautement significatif de l'orientation des lamelles à la surface des panneaux sur le MOE mesuré dans le sens de leurs largeurs. Les panneaux avec les lamelles de bois non orientées en surface ont les valeurs de MOE les plus élevées. Les panneaux à lamelles orientées et non orientées en surface avec les particules d'écorce non traitées au centre ont des valeurs de MOE⁵ qui ne sont pas significativement différents du MOE⁵ des panneaux avec les deux types d'orientation de lamelles en surface et les particules d'écorce traitées à la soude au centre. Par contre, en considérant seulement les particules non traitées à la soude, il y a gain en MOE⁵ lorsque ces particules n'ont pas de fibres de bois et lorsque les lamelles non orientées sont utilisées en surface. Le gain en MOE⁵ se fait sur les panneaux à lamelles orientées en surface lorsque les fibres de bois sont mélangées aux particules d'écorce.

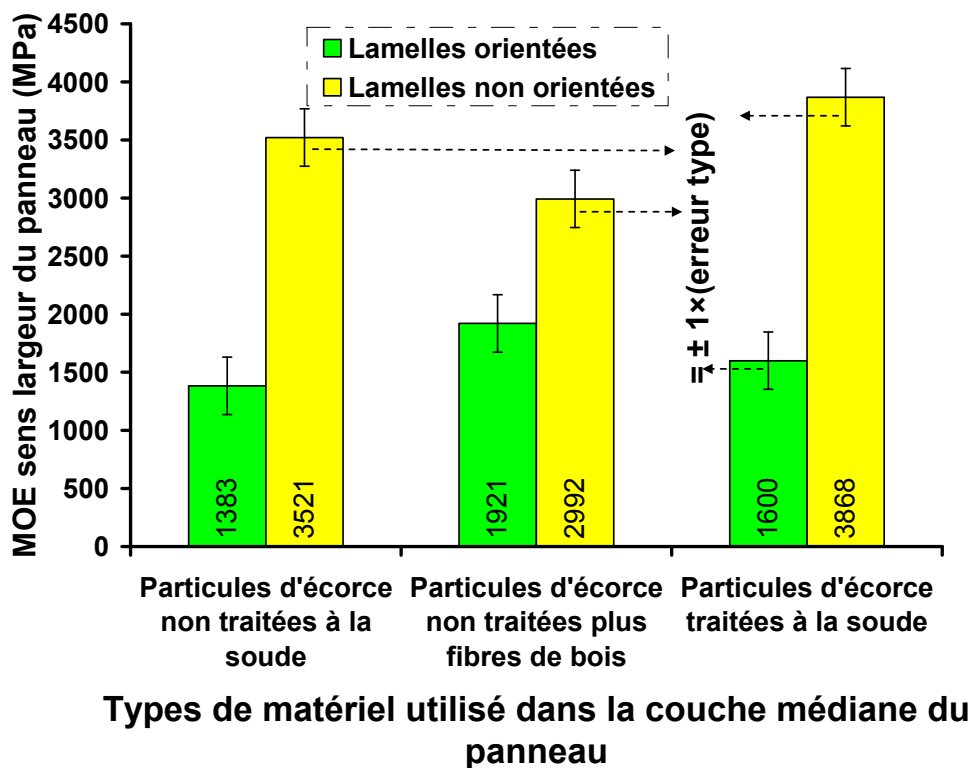


Figure 8.15 Histogrammes d'interaction de l'effet de l'orientation des lamelles et du type de particule au centre du panneau sur le MOE mesuré dans le sens de la largeur du panneau

8.3.4 Résultats des tests de comparaison par la méthode LSD (plus petite différence significative)

Les propriétés des panneaux mixtes sont comparées à celles du panneau de référence fait entièrement de lamelles de bois. Les résultats de ce test sont présentés dans le Tableau 8.7. Le test LSD est utilisé pour cette comparaison. Les panneaux ayant la ou les même (s) lettre (s) que le panneau de référence ne sont pas différents de ce dernier. Du Tableau 8.7 il ressort que les panneaux avec respectivement les particules d'écorce non traitées et traitées à la soude au centre et les lamelles de bois orientées en surface sont celles ayant les MOE dans le sens de la longueur qui ne sont pas significativement différents de celui du panneau de référence. Le panneau avec les particules d'écorce non traitée à la soude au centre et les lamelles de bois non orientées à la surface a le MOE en sens de la largeur, le MOR dans les deux sens, la CI, le GE et la DL qui ne sont pas significativement différents de ceux du panneau de référence. La cohésion interne du panneau avec les particules d'écorce non

traitées au centre et les lamelles de bois orientées en surface est significativement plus élevée que celle du panneau de référence. La dilatation linéaire de chaque type de panneau fabriqué n'est pas significativement différente de celle du panneau de référence.

Tableau 8.7 Comparaison des panneaux mixtes au panneau de référence (fait de 100% de lamelles de bois) à l'aide du test LSD (plus petite différence significative)

Types de panneau	Moyennes						
	MOE* (MPa)	MOE ζ (MPa)	MOR* (MPa)	MOR ζ (MPa)	CI (MPa)	GE (%)	DL (%)
P_O	5230 ba	1382 d	28,1 ba	9,6 c	0,59 a	19,1 b	0,15 a
P_{O-f}	4411 bc	1921 c	24,7 bac	12,8 c	0,38 dc	15,6 b	0,13 a
P_{O-S}	5832 a	1600 dc	31,01 a	11,2 c	0,52 ba	27,9 a	0,17 a
P_{nO}	3477 c	3521 ba	21,3 bc	21,7 ba	0,54 ba	17,6 b	0,13 a
P_{nO-f}	3169 c	2992 b	18,7 c	19,1 b	0,29 d	15,3 b	0,096 a
P_{nO-S}	3213 c	3868 a	19,8 c	22,1 ba	0,52 ba	28,9 a	0,13 a
P_{référence}	6103 a	4341 a	28,6 ba	26,5 a	0,43 bc	16 b	0,12 a

Les moyennes **partageant la même lettre avec celle du panneau de référence ne sont pas significativement différentes de cette dernière pour la propriété mesurée**. MOE* = module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau, MOE ζ = module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau, MOR* = module de rupture mesuré dans le sens de la longueur du panneau, MOR ζ = module de rupture mesuré dans le sens de la largeur du panneau CI = cohésion interne, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire

8.3.5 Régression

La régression est faite pour chaque variable dépendante mesurée afin de trouver une explication à l'origine des variations observées dans les mesures faites. La masse volumique du spécimen utilisé est choisie comme variables indépendante pour ces mesures. Les résultats fournis par ANOVA pour cette investigation sont présentés dans le Tableau 8.8. L'unique valeur hautement significative de F concerne la cohésion interne. Les valeurs de F sont non significatives pour les MOE, les MOR dans les deux sens, le GE et la DL, ce qui veut dire que les variations observées dans les mesures de ces variables sont indépendantes de la masse volumique des spécimens utilisés. Les variations observées dans

la mesure de la variable dépendante CI peuvent être expliquées à 93,8% par la masse volumique des échantillons utilisés et à 6,2% par le hasard.

Tableau 8.8 Régression

Régression	MOE* versus Mv	MOE ζ versus Mv	MOR* versus Mv	MOR ζ versus Mv	CI versus Mv	GE versus Mv	DL versus Mv
Valeur de F	0,36 ns	0,04 ns	0,61 ns	0,01 ns	60**	0,22 ns	0,97 ns
R ²	0,08	0,01	0,13	0,003	0,938	0,05	0,19

MOE* = module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau, MOE ζ = module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau, MOR* = module de rupture mesuré dans le sens de la longueur du panneau, MOR ζ = module de rupture mesuré dans le sens de la largeur du panneau CI = cohésion interne, GE = gonflement en épaisseur, DL = dilatation linéaire, ns = non significatif, ** = différence hautement significatif à 0,01 niveau de probabilité Mv = masse volumique

À la question de savoir si le gonflement en épaisseur et la dilatation en épaisseur du panneau sont respectivement liés à son absorption d'eau et à son absorption en humidité, des régressions gonflement en épaisseur versus absorption d'eau et dilatation en épaisseur versus absorption d'humidité sont faites. Les valeurs de F sont significatives dans les deux cas, ce qui confirme que dans le cadre de ce travail il existe bien une relation linéaire d'une part entre le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau et d'autre part entre la dilatation en épaisseur et l'absorption d'humidité du panneau fabriqué. Toutefois, cette relation est faible ($R^2 = 0,67$) entre le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau et moins forte ($R^2 = 0,74$) entre la dilatation en épaisseur et l'absorption en humidité. Pour le gonflement en épaisseur, $R^2 = 0,67$ signifie que les variations observées dans la mesure du gonflement en épaisseur sont à 67% expliquées par l'absorption d'eau des particules du panneau utilisé et à 33% par le décollement des lamelles qui laisse un espace vide entre elles. Dans le cas de la dilatation en épaisseur, $R^2 = 0,74$ signifie que les variations observées dans sa mesure sont à 74% expliquées par l'humidité absorbée par le panneau et 26% par les espaces vides entre les couches des lamelles dues au décollement de ces dernières sous l'effet de l'absorption d'humidité.

8.4 Conclusion

Les études faites dans ce chapitre ont permis de montrer que l'utilisation des particules d'écorce externe de bouleau blanc dans la couche médiane des panneaux à lamelles orientées donne aussi des panneaux dont les propriétés rencontrent les exigences de la norme des panneaux à lamelles orientées de type R-1 et O-1. Le traitement effectué sur les particules d'écorce a eu différents impacts sur les propriétés des panneaux mixtes fabriqués comparées au panneau de référence totalement fait des lamelles de bois. Ces impacts varient tellement d'une propriété à l'autre qu'il est difficile de faire d'emblée le choix d'un type de panneau au détriment de l'autre. Par exemple la cohésion interne du panneau avec les particules d'écorce non traitées à la soude et sans fibres de bois au centre et les lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes est significativement supérieure à celle du panneau de référence. Le module d'élasticité et le module de rupture du panneau mesurés dans le sens de la longueur du panneau (MOE^* et MOR^*) sont plus grands lorsque les lamelles de bois sont orientées dans les couches couvrantes. Le module d'élasticité et le module de rupture du panneau mesurés dans le sens de la largeur du panneau (MOE^{ζ} et MOR^{ζ}) sont plus grands lorsque les lamelles de bois ne sont pas orientées dans les couches couvrantes. Les valeurs de gonflement en épaisseur (GE 24 heures) des panneaux mixtes à l'exception de ceux ayant des particules d'écorce traitées à la soude dans leur couche médiane sont égales et ne diffèrent pas de celle du panneau de référence. Le facteur orientation des lamelles dans les couches couvrantes a eu un effet hautement significatif que sur les différents modules d'élasticité et les modules de rupture et le facteur traitement fait sur les particules d'écorce n'a eu un effet hautement significatif que sur la cohésion interne et le gonflement en épaisseur. La seule interaction significative entre les deux facteurs est observée dans la mesure du module d'élasticité des panneaux dans le sens de leur largeur (MOE^{ζ}). De cette interaction significative, il ressort que les meilleures valeurs de (MOE^{ζ}) sont obtenues lorsque les lamelles de bois ne sont pas orientées dans les couches couvrantes et lorsque les fibres de bois ne sont pas ajoutées aux particules d'écorce traitées ou non de la couche médiane. Un des gros avantages des panneaux fabriqués concerne leur stabilité dimensionnelle évaluée surtout par la mesure de la dilatation linéaire et de la dilatation en épaisseur. L'analyse statistique montre qu'il n'y a aucune différence significative dans la mesure de la dilatation linéaire des panneaux fabriqués d'une part et

d'autre part entre les panneaux mixtes et le panneau de référence. Par contre les panneaux mixtes avec les particules d'écorces non traitées à la soude ont les meilleures valeurs de dilatation en épaisseur. L'analyse de régression a prouvé qu'il existe une forte corrélation entre la cohésion interne et la masse volumique des spécimens utilisés pour la mesurer. Du coefficient de détermination de 0,938 de la droite de régression, il ressort que 93,8% des variations observées dans la mesure de la CI sont expliquées par la masse volumique des spécimens utilisés et 6,2% sont dues au hasard. Le panneau ayant les lamelles orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois au centre est finalement choisi comme le meilleur du groupe pour deux raisons : la première concerne certains de ses propriétés comme le MOE*, le MOR* qui sont aussi bons que ceux du panneau de référence, la CI et la dilatation dans le sens de l'épaisseur qui sont plus bonnes que celles du panneau de référence; la seconde raison c'est l'avantage du bas coût de production de ce type de panneaux par rapport aux panneaux ayant d'une part les particules d'écorce traitées à la soude et d'autre part les particules d'écorce non traitées à la soude avec ajout de fibres de bois dans leur couche médiane. En effet, le traitement à la soude et à l'ajout des fibres de bois génèrent des coûts supplémentaires.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de recherche consistait à mettre sur pied les voies et moyens permettant de valoriser les résidus d'écorce de bouleau blanc en les utilisant dans la fabrication de panneaux de particules de masse volumique moyenne. Cette écorce a une partie externe et une partie interne qui sont totalement différentes sur le plan de la structure et des propriétés physiques et chimiques. Ces différences rendent très difficile leur utilisation dans une même couche de panneau. Les panneaux monocouches fabriqués avec ces deux types de particules mélangés lors des essais préliminaires ont eu de mauvaises propriétés mécaniques en général et de très faibles cohésions internes en particulier. De ce constat, ces particules ont été systématiquement séparées par tamisage et utilisées séparément. Par la suite, des panneaux monocouches de masse volumique moyenne ont été fabriqués avec chacun de ces types d'écorce. Les particules d'écorce interne de bouleau utilisées avaient une granulométrie comprise entre 0,25 mm et 1 mm (ce qu'on a pu obtenir de mieux par broyage parce que cette partie d'écorce ayant une forme granuleuse tend à se transformer en poudre lors du broyage) et celle de la partie externe une granulométrie comprise entre 2 mm et 6 mm. Les panneaux monocouches à base de particules d'écorce interne ont eu une très bonne cohésion interne et des valeurs de MOE et MOR très basses. Ceux à base de particules d'écorce externe de bouleau ont eu de faibles valeurs de CI, MOE et MOR, mais ont présenté une excellente valeur du gonflement en épaisseur. L'extraction de ces particules successivement à l'eau chaude simple, à l'eau chaude contenant du savon lauryl sulfate de sodium n'a pas permis d'améliorer les propriétés susmentionnées des différents panneaux monocouches fabriqués. La bonne cohésion interne et les mauvaises propriétés de flexion des panneaux monocouches à base de particules d'écorce interne de bouleau ont laissé entrevoir la fabrication d'un panneau mixte fait de ces particules dans la couche médiane parce qu'elles s'encollent bien avec la résine urée-formaldéhyde et d'un renfort au niveau des couches couvrantes par les fibres ou les particules de bois. Quant aux panneaux monocouches faits de particules d'écorces externes, ses mauvaises propriétés mécaniques ont conduit à les broyer une fois de plus à l'aide de la plus petite grille du raffineur de manière à avoir des particules fines ayant une granulométrie comprise entre 0,25 mm et 1 mm afin d'améliorer leur encollage et rehausser la valeur de la cohésion interne. Le panneau monocouche de masse volumique moyenne fabriqué avec ces

particules finement broyées a donné une bonne CI, mais le MOE et le MOR sont restés faibles. C'est de ces résultats qu'est survenue l'idée de concevoir les panneaux mixtes. Dans ces nouveaux types de panneau, les particules d'écorce externe de bouleau blanc sont respectivement renforcées par les particules de bois, les fibres de bois et les lamelles de bois. Le mélange de ces particules aux propriétés différentes nécessitait une investigation minutieuse de leur acidité évaluée par la mesure de leur différents pH et leurs différents pouvoirs tampons acides et basiques parce que la résine urée-formaldéhyde utilisée pour leur encollage est fortement influencée par leur pH. L'analyse de variance des différentes valeurs de pH et des pouvoirs tampons a montré des différences significatives entre elles, ce qui a confirmé et renforcé l'option d'utiliser séparément les particules ayant des valeurs de pH différentes et de baisser la température des plateaux de 200° C à 180° C lors du pressage des panneaux mixtes ayant des particules plus acides comme les fibres de bois et l'écorce externe de bouleau en surface afin d'éviter la pré-cuisson dans les fibres et la sur-cuisson dans les particules d'écorce externe de bouleau. L'étude faite sur l'acidité de ces particules a confirmé l'existence d'une relation linéaire entre leur pH et leurs pouvoirs tampon absolu et relatif respectivement. En plus de l'acidité, une analyse a été aussi faite sur les deux types de particules d'écorce pour déterminer leur contenu en cellulose, en pentosanes et en lignine. Le taux de cellulose qui fait du bois une matière structurale est inférieur à 5% dans les particules d'écorce externe de bouleau blanc et de l'ordre de 18% dans les particules de l'écorce interne. Ces deux taux sont largement en dessous du taux moyen de la cellulose dans le bois estimé à 40%.

Ces faibles taux de celluloses confirment pourquoi les panneaux monocouches à base de ces deux types d'écorce ont eu de basses valeurs de MOE et de MOR. Une des solutions permettant de fabriquer les panneaux de masse volumique moyenne à base de cette écorce et rencontrant les exigences de la norme consistait à apporter un renfort en bois. Quatre types de panneaux mixtes ont été conçus à l'issue de la longue phase d'essais préliminaires. Le premier type est un panneau mixte trois couches avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc au centre et les fibres de bois dans les couches couvrantes. Les fibres de bois ont été utilisées sur les faces afin de bénéficier de la qualité des surfaces des panneaux de fibres de masse volumique moyenne. Deux facteurs ont été choisis dans la conception de ce panneau : le pourcentage des fibres dans les couches couvrantes et le pourcentage des fibres

de bois mélangées aux particules d'écorce interne de bouleau de la couche médiane. Un faible pourcentage de fibres de bois est ajouté aux particules d'écorce de la couche médiane pour renforcer la cohésion à l'interface des particules d'écorce de la couche médiane et des fibres de bois des couches couvrantes. Les pourcentages de fibres de bois des couches couvrantes sont réduits au minimum afin d'utiliser une plus grande quantité d'écorce interne de bouleau par panneau dans sa couche médiane. Les panneaux mixtes fabriqués ont rencontré les exigences de la norme des panneaux de type M-1 à usage intérieur. Les propriétés mécaniques de ces panneaux mixtes évaluées par leur module d'élasticité (MOE), leur module de rupture (MOR) et leur cohésion interne (CI) sont restées de l'ordre de 10 à 25% inférieures à celles du panneau de référence en bois. Le panneau avec 25% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% de ces mêmes fibres ajoutés aux particules d'écorce interne de bouleau dans la couche médiane a eu les meilleures propriétés mécaniques. Les valeurs de gonflement en épaisseur après 24 heures d'immersion dans l'eau des panneaux mixtes fabriqués ont été plus élevées que celle du panneau de référence. Il en est de même des valeurs de dilatation linéaire (DL) qui sont en plus légèrement au dessus de la valeur seuil de 0,35% excepté le panneau avec 22% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 5% de fibres de bois ajoutés aux particules d'écorce de la couche médiane qui a eu une valeur de DL de 0,32%. La régression a montré une relation linéaire entre le module d'élasticité et la masse volumique des spécimens utilisés pour la mesure. Le coefficient de détermination de 0,67 obtenu signifie que les variations observées dans la mesure du MOE sont expliquées à 67% par la masse volumique des spécimens utilisés et à 33% par des sources inconnues (le hasard). Deux options ont permis de choisir le meilleur panneau du groupe : en se basant plus sur les propriétés mécaniques, le meilleur panneau est celui avec 25% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% de fibres ajoutées dans les particules d'écorce de la couche médiane. Si par contre la stabilité dimensionnelle s'impose comme le critère primordial, le panneau avec 22% de fibres de bois dans les couches couvrantes et 5% de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce de la couche médiane sera celui à choisir d'autant plus que tous ces propriétés mécaniques passent la norme. La stratégie utilisée pour mettre sur pied ce type de panneau a permis de valoriser plus de 60% de particules d'écorce interne de bouleau blanc par panneau fabriqué.

Quant au second type de panneau, il a aussi trois couches et concerne l'utilisation des particules d'écorce externe de bouleau blanc. Ces particules ont été utilisées plutôt dans les couches couvrantes parce que leur hydrophobicité est un avantage à exploiter pour mieux protéger les panneaux fabriqués des infiltrations d'eau à partir de leur surface et améliorer aussi leur stabilité dimensionnelle. Afin de faire un choix judicieux de renfort approprié à utiliser dans la couche médiane de ce panneau mixte, deux types de matériel aux propriétés différentes ont été sélectionnés (les particules de bois et les fibres de bois) et considérés comme le premier facteur choisi. Le second facteur quant à lui concernait le pourcentage des particules d'écorce à utiliser dans les couches couvrantes. Le pourcentage ici a été choisi comme facteur afin de déterminer la quantité optimale d'écorce à utiliser dans les couches couvrantes de manière que les propriétés des panneaux fabriqués passent toujours les normes. Seuls les panneaux avec les particules de bois dans la couche médiane ont tous eu des valeurs de MOE au dessus de la valeur normalisée. En ce qui concerne le MOR, les panneaux avec les fibres de bois dans la couche du centre ont eu les valeurs les plus élevées, particulièrement le panneau avec 35% d'écorce dans les couches de surface et 65% de fibres au centre, qui a eu un MOR supérieur de 100% à celui de la norme et de 20% à celui du panneau de référence. Les panneaux avec les particules de bois au centre ont eu les meilleures valeurs de CI. Le MOE, le MOR et la CI de ces panneaux décroissent au fur et à mesure que le pourcentage des particules d'écorce des couches couvrantes augmente. En ce qui concerne le gonflement en épaisseur, la seule interaction significative concerne le facteur type de matériel au centre du panneau et l'effet quadratique du facteur pourcentage des particules d'écorce à la surface. Le panneau qui a gonflé le moins après 24 heures d'immersion dans l'eau est celui fait de fibres de bois au centre et 40% de particules d'écorce dans les couches couvrantes. Les panneaux avec les particules de bois au centre ont eu les meilleurs valeurs (valeurs les moins élevées) de DL. Ils sont même plus stables que le panneau de référence en bois. L'analyse statistique fait dans un plan factoriel en blocs complets a permis de choisir le panneau avec 45% de particules d'écorce dans les couches couvrantes et 55% de particules de bois dans la couche médiane comme le meilleur surtout en tenant compte de la stabilité dimensionnelle, évaluée dans le cadre de ce travail par la mesure de la DL. La méthode mise sur pied a ainsi permis d'utiliser plus de 40% de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans chaque panneau mixte fabriqué.

Le troisième type de panneau conçu et fabriqué est un panneau de 8 mm d'épaisseur de masse volumique cible 800 kg/m^3 destiné à être utilisé comme panneau sous-plancher. Il est encollé à la résine phénol-formaldéhyde (PF). Les particules d'écorce externe de bouleau blanc sont utilisées dans les couches couvrantes pour des raisons susmentionnées (dans le cas du second type de panneau). Les facteurs considérés dans la fabrication de ce panneau sont le pourcentage de la résine PF utilisé pour l'encollage des particules d'écorce et le traitement (écorce non traitée versus écorce traitée à la soude) Le traitement à la soude est fait pour enlever une partie de la cire naturelle de la surface des écorces et augmenter leur mouillabilité lors de l'encollage. Les propriétés de tous les panneaux fabriqués ont atteint et dépassé les exigences de la norme PBU des panneaux sous-planchers. Le traitement à la soude n'a pas produit les effets escomptés parce que les panneaux avec les particules d'écorce traitées à la soude ont eu les propriétés les plus basses. La raison serait qu'en plus d'enlever les matières cireuses de la surface des écorces, la soude aurait détruit partiellement les subérines qui constituent la partie prépondérante de la structure de l'écorce externe de bouleau blanc. L'augmentation du pourcentage de la colle PF dans les particules d'écorce a aussi affecté négativement les propriétés des panneaux mixtes fabriqués parce que la PF contient 20% de soude, et son augmentation implique aussi une augmentation de la teneur en soude agissant négativement sur la structure des subérines. (Il se serait produit une réaction acido-basique entre la soude et les subérines parce que ces subérines sont des groupes d'acide gras). L'étude de la régression a montré des relations linéaires respectivement entre le MOE, le MOR, le GE et la masse volumique des spécimens utilisés pour les mesurer. Les coefficients de détermination de 0,76 (MOE); 0,82 (MOR) et 0,89 (GE) signifient que les variations observées dans la mesure de ces variables sont respectivement expliquées à 76%, 82% et 89% par la masse volumique des spécimens utilisés et à 24%, 18% et 11% par le hasard. L'analyse statistique a permis de choisir le panneau avec les particules d'écorce non traitées à la soude et encollées avec 5% de PF comme le meilleur du groupe surtout en tenant compte de la stabilité dimensionnelle. C'est le panneau ayant le plus bas coût de production (écorce non traitée et plus petit pourcentage de colle utilisé).

Le quatrième type est un panneau mixte avec les particules d'écorce externe de bouleau au centre et les lamelles de bois sur les côtés. Deux facteurs ont permis la mise sur pied de ce

panneau : le traitement des particules d'écorce (particules d'écorce non traitées, particules d'écorces plus 10% de fibres de bois, particules d'écorce traitées à la soude) et l'orientation des lamelles de bois dans les couches couvrantes (lamelles orientées versus lamelles non orientées). Ce type de panneau est destiné à être utilisé comme panneau sous-plancher, lieu où les propriétés de flexion ne sont pas trop exigées. Les particules d'écorce ont été traitées pour des raisons susmentionnées. 10% de fibres de bois sont ajoutées aux particules d'écorce dans le but d'évaluer son impact sur les propriétés mécaniques des panneaux fabriqués. Les MOE* et MOE^z mesurés respectivement dans les sens de la longueur et de la largeur du panneau ont rencontré les exigences de la norme pour les panneaux à lamelles orientées d'une part et non orientées d'autre part. La cohésion interne de presque tous les panneaux fabriqués a été aussi au dessus de la valeur normalisée. Le gonflement en épaisseur de tous les panneaux a excédé la valeur de 15% exigée par la norme. Cet excès de gonflement aurait été amélioré si une fois les panneaux sortis de la presse, ils étaient conservés dans un four à 80° sous pression pendant 24 heures (*Riedl, 2004*). Tous les panneaux ont eu une bonne valeur de dilation linéaire. Le traitement à la soude des particules d'écorce n'a pas permis d'améliorer les propriétés mécaniques des panneaux fabriqués pour les mêmes raisons que celles déjà évoquées ci-dessus. L'ajout de 10% de fibres de bois n'a pas aussi amélioré les propriétés des panneaux fabriqués parce que dans le mélange, ces fibres ne se collent pas bien aux particules d'écorce qui sont hydrophobes lorsqu'elles sont non traitées à la soude et ont des structures fragiles lorsqu'elles le sont. L'étude de la régression indique l'existence d'une forte relation linéaire entre la CI et la masse volumique des spécimens utilisés. Le coefficient de détermination de 0,94 signifie que les variations observées dans la mesure de la CI sont expliquées à 94% par la masse volumique des spécimens utilisés et à 6% par le hasard. Quoique le traitement à la soude et l'ajout des fibres de bois aux particules d'écorce externe n'ont pas contribué à l'amélioration des panneaux mixtes fabriqués, les investigations menées ont bien eu leur raison d'être. En effet, elles ont permis de se rendre compte de la vulnérabilité des particules d'écorce externe de bouleau soumises à un traitement à la soude. Le panneau ayant les lamelles orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois au centre a été choisi comme le meilleur du groupe pour deux raisons : la première concerne certaines de ses propriétés comme le

MOE*, le MOR* qui sont aussi bons que ceux du panneau de référence en bois, la CI et la dilatation dans le sens de l'épaisseur qui sont significativement supérieures à celles du panneau de référence; la deuxième raison c'est le bas coût de production de ce type de panneau, les coûts de traitement à la soude et de l'ajout des particules n'entrant plus en ligne de compte. La stratégie de fabrication mise en place a ainsi permis de remplacer 50% (en masse de panneau) de lamelles de bois par les particules d'écorce externe de bouleau blanc, ce qui constitue un excellent moyen de sa valorisation.

Recommandations

- A. Fabrication de panneaux mixtes avec les particules d'écorce interne de bouleau blanc dans les couches couvrantes avec un renfort d'une association de particules de bois et de fibres de bois dans les couches couvrantes. Considérer les deux facteurs de fabrication suivants : le premier facteur qualitatif est la masse volumique cible des panneaux à fabriquer. Les deux niveaux à choisir sont 690 kg/m^3 et 750 kg/m^3 . Le second facteur quantitatif a trois niveaux et concerne le pourcentage d'association des fibres et des particules de bois à utiliser dans les couches couvrantes. La proportion des particules de bois dans le mélange (particules de bois – fibres de bois) doit être toujours plus élevée. En considérant « M » comme la masse de ce mélange, utiliser les trois niveaux de facteur suivants : [85% (de M) = particules de bois et 15% (de M) = fibres de bois]; [75% (de M) = particules de bois et 25% (de M) = fibres de bois]; [65% (de M) = particules de bois et 35% (de M) = fibres de bois]. Faire un plan factoriel qui permettra de choisir le meilleur panneau en considérant que l'idéal serait d'avoir un panneau moins pesant avec moins de fibres de bois dans les couches couvrantes (parce que la production des fibres de bois est plus coûteuse que celle des particules de bois).
- B. Fabrication de panneaux mixtes avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc (dont la granulométrie est comprise entre 2 mm et 6 mm) encollées à l'isocyanate (PMDI) dans la couche médiane et renforcés sur les côtés par les lamelles de bois et évaluer ses propriétés.

- C. Fabrication de panneaux mixtes avec les particules d'écorce externe de bouleau blanc (dont la granulométrie est comprise entre 0,25 mm et 1 mm) encollées à l'urée-formaldéhyde (UF) dans la couche médiane et renforcés sur les côtés par les lamelles de bois encollées aussi à l'UF et évaluer ses propriétés. Un tel panneau peut servir dans la fabrication des bâtis des meubles qui ne sont pas exposés à l'humidité, d'où l'utilisation de la colle UF qui est moins coûteuse que la PF.

Bibliographie

- Allison, F.E. (1965)** Decomposition of wood and bark sawdusts in soil: Nitrogen requirements and effects on plants. USDA Agr. Res. Serv. Tech. Bull. No. 1332, 58 pp.
- American Society for Testing and Material (2005)** D 1037-99. In: Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. ASTM Annual Book of Standards. Volume 04.10 West Conshohocken, Pa . pp.140-170.
- American Society for Testing and Material (2005)** D 1102-84 (Reapproved 2001). In: Standard test method for ash in wood. ASTM Annual Book of Standards. Volume 04.10 West Conshohocken, Pa . pp.174-175.
- American Society for Testing and Material (2005)** D 1107-96. In: Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. ASTM Annual Book of Standards. Volume 04.10 West Conshohocken, Pa . pp.180-181.
- American Society for Testing and Material (2005)** D 1109-84 (Reapproved 2001). In: Standard test method for 1% sodium hydroxide solubility of wood. ASTM Annual Book of Standards. Volume 04.10 West Conshohocken, Pa . pp.184-185.
- Anderson, A. B.; Breuer, R. J.; Nicholls, G. A. (1961)** Bonding particle boards with bark extracts. Forest Prod. J.11(5): 226-227.
- Anonyme (1997)** SBA et Resource Information System Inc. (RISI), Wood Products Review, juillet 1997
- Anonyme (1999)** Wo der Baum seinen Mantel hergibt, Vielfältige Nutzung eine Uralten Kulturpflanze, Holz-Zentralblatt 125 (46), S. 652-653.
- Anonyme (2000-2008)** Centre de recherche et d'expérimentation des arts forestiers. Groupe Territoire Culturel. <http://territoire.org/FRANCAIS/CREAF/HERBIER/bouleau.html> (consulté le 1er février 2008).
- Anonyme (2003a)** Panelboard highlights, Metso Panelboard Customer Magazine 1, 2003, pp. 21.
- Anonyme (2003b)** Wood based panels International. Published by polygon Media Ltd. Tubs Hill House, London Road, Sevenoaks, Kent, TN 13, 1 BY, UK, February-March 2003: ISSN 0144-7238: 10-14.
- Anonyme (2004a)** La ligniculture dans le cadre du zonage de la triade/quad: une vision novatrice du développement durable pour le Québec forestier. Réseau Ligniculture Québec.
- Anonyme (2004b)** Commentaire et recommandations, commission d'étude sur la gestion de la forêt publique du Québec, Louisiana-Pacific division Québec. (Document consulté le 9 janvier 2008 sur le site http://www.commission-foret.qc.ca/memoires/doc_136_02_LPC.pdf).
- Anonyme (2004c)** Bilan des écorces au Québec, Canada. Registre forestier, MRNF, DDIPF, SDTI, DED.
- Anonymous (2005)** Chembuddy home page: <http://www.chembuddy.com/?left=pH-calculation&right=pH-buffer-capacity>: access September 2007.
- ANSI (1999)** American National Standard Institute. ANSI A208.1 – 1999 Particleboard 11p.
- ANSI (2002)** American National Standard Institute. ANSI A208.2 – 2002 Medium Density Fiberboard (MDF) for Interior Applications. National Particleboard Association, USA. 11P.
- Aaron, J. R. (1966)** The utilization of bark. Research and Development Paper No. 32, U.K. Forestry Commission, 25 Saville Row, London W1, England, 24 pp.

- Blanchet, P.; Cloutier, A.; Riedl, B. (2000)** Particleboard made from hammer milled black spruce residues. *Wood Sci. Technol.* 34: 11 - 19.
- Bodig, J. (1962)** Wettability related to gluabilities of five Phillipine mahoganies. *For. Prod. J.* 12 (6):265-270.
- Boehme, C. (1998)** OSB in Europa – gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklungen. Tagungsband zum Holzwerkstoffsymposium der Mobil Schmierstoff GmbH in Stuttgart, 18. September 1998.
- Boehme, C. (1999)** OSB ein neues Produkt in der Holzwerkstoffindustrie? Schriftliche Fassung eines Vortrages, gehalten am Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen am 02.11.1999.
- Boquillon, N., Elbez, G., Schonfeld, U., (2004)** Properties of wheat straw particleboards boned with different types of resin. *J. wood Sci.* 50, 230-235.
- Brinkmann, E. (1979)** OSB-Platten, ihre Eigenschaften, Verwendung und Herstellungstechnologie. *Holz als Roh- und Werkstoff* 37: 139–142.
- Bryant, B.S. (1968)** Studies in wood adhesion-interaction of wood surface and adhesive variables. *For. Prod. J.* 18(6):57-62.
- Cassens, D.L. (1974)** Bark properties of eight western softwood *For. Prod. J.* 24, No.4, 40-44.
- Chan, F.; Riedl, B.; Wang, X-M.; Lu, X. et al. (2002)** Performance of pyrolysis oil-based wood adhesive in OSB. *For. Prod. J.* 52 - 4 p.31.
- Charbonneau, Y. (1990)** « Les déchets dangereux au Québec. Une gestion environnementale », les publications du Québec, 265-271.
- Chen C.M. (1970)** Effect of Extractive Removal on adhesion and wettability of some Tropical Woods. *For. Prod. J.* 20(1): 36-41.
- Cherubim, M. (1976)** Zur Hydrolyse und Formaldehydabspaltung aus Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 34: 449-452.
- Choong, E.T., Abdullah, G.; Kowalczyk, J. (1976)** LSU Wood Utilization Notes No. 29.
- CINAF (2003)** Comité national sur l'intensification de l'aménagement forestier. Pistes d'intensification de l'aménagement forestier en vue du maintien du niveau de développement économique des régions du Québec. État des travaux pour la période du 31 mai 2002 au 1^{er} juin 2003. Texte remis au Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec.
- Cloutier, A. (2004)** SOB-17195- Panneaux agglomérés, notes de cours, Sciences du bois et de la forêt Université Laval Été 2004.
- Collin, J. (2003)** Dispositifs expérimentaux. BVG-60678. Notes de cours, Faculté d'agronomie, département de phytologie, Université Laval Automne 2003.
- Coulombe, G et al. (2004)** Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise Dépôt légal : Bibliothèque nationale du Québec, 2004 ISBN 2 – 550 – 43626-1.
- CSA. (1978)** Méthodes d'essai normalisées destinées aux panneaux de particules de bois agglomérées sous presse et aux panneaux gaufrés. CAN3-O188. 0-M78.
- CSA. (1992)** Normes relatives aux panneaux de revêtement intermédiaire de construction. CSA-O325.0-92.
- CSA. (1993)** Normes relatives aux panneaux de particules orientées et aux panneaux de grandes particules. CSA-0437 Série 93.
- De Oliveira, M.; De Oliveira, L. (2000)** Der Kork, Corticeira Amorim, ISBN 972-95525-1-7.
- Deppe, H. J. (1979)** Zum Stand der Erzeugung von Platten mit Spanorientierung. *Holz-Zentralblatt*, 105 (84): 1235–1237.

- Deppe, H-J.; Ernst, K. (2000)** Taschenbuch der Spanplattentechnik, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.
- Dix, B.; Marutzky, R. (1984)** Tannin extracts from spruce and pine barks. *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium* 40: 91-100.
- Dost, W.A. (1971)** Redwood bark fiber in particleboard. *For. Prod. J.* 21(10): 38 - 43.
- EN 300 (1997)** Panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB) - Définitions, classification et exigences. (JOCE L13/36 du 18.01.2003).
- Ernst, K.; Roffael, E.; Weber, A. (1998)** Umweltschutz in der Holzwerkstoffindustrie. Herausgeber: Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Lehrbereich Holzchemie und Holztechnologie der Georg- August-Universität Göttingen: 228 S.
- Farber, E. (1959)** Chemicals from bark. *Forest Prod. J.* 9(4): 25-27.
- Fengel, D.; Wegener, G. (1989)** Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions Walter de Gruyter, Berlin, New York. PP. 240-267.
- Foster, W.J. (1967)** Species variation. In T. Maloney, Editor, *Proceedings of the W.S.U. Particleboard Symposium No. 1* Pullman, Washington.
- Freeman, H.A. (1959)** Relation between physical and chemical properties of wood and adhesion. *Forest Prod. J.* 9(12): 451-458.
- Gardner, D.J.; Generalla, N.C.; Gunnells, D.W.; Wolcott, M.C. (1991)** Dynamic wetting of wood. *Langmuir* 7: 2498-2502.
- Gardner, D.J.; Wolcott, M.P.; Wilson, L.; Huang, Y.; Carpenter, M. (1996)**. Our understanding of wood surface chemistry in 1995. In : *Wood Adhesives*. Eds. A.W. Christiansen and A.H. Conner. 1995. Forest Products Society. Madison, WI. Pp. 29-36.
- Gardziella, L.; Pilato, A.; Knop, A. (2000)** Phenolic resins. Chemistry, applications, standardization, safety and ecology. 2nd completely revised edition. Springer Verlag.
- Gencer, A.; Eroglu, H.; Özen, R. (2001)** Medium density fiberboard manufacturing from cotton stalks. *Inpaper International, A publication on Wood Pulp and Paper Industry* 5(2):26-28.
- Gersonde, M.; Deppe H.J., (1968)** Möglichkeiten und Verfahren Technische Voraussetzungen einer Schutzbehandlung von Holzspanplatten gegen holzzerstörende Pilze: *Holzforschung* 55: 876-877.
- Gignac, M. (1992)** Évaluation du pouvoir fongicide ou fongistatique des extraits d'écorce d'épinette blanche (*Picea glauca*) pour la protection des bois verts. Mémoire de maîtrise, Département des Sciences du Bois, Université Laval. 188pp.
- Gray, V.R. (1961)** Wetting, adhesion and penetration of surface coatings on wood. *J. Oil and Colour Chemists' Assn.* 44, 756-786.
- Gray, V.R. (1962)** The wettability of wood. *For. Prod. J.* 12(9): 452-461.
- Guo, A.L.; Zhang, H.S.; Feng, L.Q.; Gao, X.X.; Zhang G.L. (1998)** pH value and buffering capacity of 6 shrub species and relevant effect on curing time of UF resin. *Chine Wood Indu.* 12(5):18-20.
- Hall, R. B.; Leonard, J. H.; Nicholls, G. A. (1960)** Bonding particleboards with bark extracts. *Forest Prod. J.* 10(5): 263-272.
- Hameed, M.; Roffael, E. (1999)** Über die Benetzbarkeit von Splint- und Kernholz der Kiefer, Douglasie und Lärche. *Holz als Roh- und Werkstoff* (57): 287-293.
- Han, G.; Zhang, C.; Zhang, D.; Umenura, D.; Kawai, S. (1998)** Upgrading of urea formaldehydebondedreed and wheat straw particleboards using silane coupling agents. *J.Wood Sci.* 44, 282-286.

- Hathway, D. E. (1962)** The condensed tannins. Chapter 5 in W. E. Hillis (ed.): Wood Extractives and their Significance to the Pulp and Paper Industries, Academic Press. New York, pp. 191-228.
- Herczeg, A. (1965)** Wettability of wood. For. Prod. J. 15(11):499-505.
- Hergert, H. L. (1960)** Chemical composition of tannins and polyphenols from conifer wood and bark. Forest Prod. J. 10(11): 610-61.
- Hergert, H. L. (1962)** Economic importance of flavonoid compounds: wood and bark. Chapter 17 in T. A. Geissman (ed.): The Chemistry of Flavonoid Compounds. MacMillan, 866, 3rd Ave., New York, N.Y. 10022, pp. 553-592.
- Herrick, F. W.; Conca, R. J. (1960)** The use of bark extracts in cold-setting waterproof adhesives. Forest Prod. J. 10(7): 361-368.
- Heslop, G. (1997)** Compak: Ten years of experience with commercial straw particleboard production. In: Wolcott, M.P., Miklosko, L.C., Lentz, M.T., (Eds.), 31th International Particleboard/Composite Materials Symposium Proceedings. Proceedings of 31th International Particleboard/Composite Materials Symposium, 8-10 April 1997, vol.31. Pullman, Washington State University, pp. 109-113.
- Hse, C.Y. (1972)** Wettability of southern pine veneer by phenol-formaldehyde wood adhesives. Forest Prod. J. 22(1):51-56.
- Hse, C.Y.; Kuo, M.L. (1988)** Influence of extractives on wood gluing and finishing – a review. Forest Prod. J. 38(1), 52-56.
- Hsu, W.E. (1997)** Wood Quality Requirements for Panel Products. Dans Zhang, S. Y.; Gosselin, R.; Chauret, D. Proceedings of the CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop. Quebec, 18-22 August. P.7-10.
- Johns, W.E.; Niazi, K.A. (1980)** Effect of pH and buffering capacity of wood on the gel time of urea-formaldehyde resin. Wood Fiber Science 12(4):225-263.
- Johnson, R.E.; Dettre, R.H. (1993)** Wetting of low-energy surfaces. In: Wettability. Ed. J.C. Berg. Marcel Dekker Inc. New York. Pp. 1-74
- Jordan, D.L.; Wellons, J.D. (1977)** Wettability of dipterocarp venneers. Wood Sci. 10(1), 22-27
- Jossifov, N., (1989)** Wechselbeziehung zwischen der Dichte und den wesentlichen physikalisch-mechanischen Eigenschaften industriell hergestellter mehrschichtiger Spanplatten aus hartlaubholz, Holztechnologie 30 (4), S. 200-202.
- Kajita, H.; Skaar, C. (1992)** Wettability of the surfaces of some American softwoods species. Mokuzai Gakk. 38, 516-521.
- Kashiwada, Y.; Yamazaki, K.; Ikeshiro, Y.; Yamagishi, T.; Fujioka, T.; Mihashi, K.; Mizuki, K.; Cosentino, L.M.; Morris-natschke, S.L. and Lee, K.-H. (2001)** 3,28-Di-O-(dimethylsuccinyl)-betulin isomers as anti-HIV agents, Bioorganic and Medical Chemistry Letters, 11(2), 2001, 183-186.
- Khristova, P., Yossifov, N., Gabir, S., Glavche, I., Osman, Z. (1998)** Particleboards from sunflower stalks and tannin-modified UF resin. Cellul. Chem. Technol. 32, 327 - 337.
- Klaubner, A. (1920)** Die Monographie des Korke, Verlag von Alfred Weber Nachfahren, Berlin W, 57.
- König, B.; Roffael, E. (2003)** Zur Extraktion von Fichtenrinden mit Harnstoff und Harnstoff-Formaldehyd-Polymeren, Holz als Roh und Werkstoff 61, 206-212.
- Kozlowski, R., Helwig, M. (1998)** Lignocellulosic polymer composite. In: Prasad, P.N. (Ed.), Science and Technology of Polymer and Advanced Materials. Plenum Press, New York, pp. 679-698.

- Labrosse, B.; Pleskoff, O.; Sol, N.; Jones, C. ; Henin, Y. ; and Alizon, M. (1997)** Resistance to a drug blocking human immunodeficiency virus type1 entry (RPR103611) is a conferred by mutations in gp41, *Journal of Virology*, 71(11), 1997, 8230-8236.
- Lehmann, W.F.; Geimer, R.L. (1976)** Properties of structural particleboards from Douglas-fir forest residues. *For. Prod. J.* 24(10): 17-25.
- Little, T.M.; Hills, F.J. (1978)** *Agricultural experimentation – Design and Analysis*. John Wiley & Sons. New York. 350p.
- LPFE (1976)** L'écorce ressource gaspillée. Laboratoire des Produits Forestiers de l'Est, BulletinLD13F. 4 pp.
- Lundqvist, E.K.; Back L.E. (1976)** The use of bark for wood based panels. Critical evaluation. Swedish Forest Products Research Laboratory, Stockholm. Presented at ECE/FAO, Timber Division. Symposium on extending the use of wood residues, in Bucarest, Romania, September-October 1.
- MacLean, H.; Gardner, J.A.F. (1952)** Bark extracts in adhesives. *Pulp & Paper Mag. Can.* 53(9):111-114.
- Maloney, T.M. (1973)** Bark boards from four west coast softwood species. *For. Prod. J.* 23(8): 30-38.
- Maloney, T.M. (1977)** *Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing*. Miller-Freeman Publications, Inc., San Francisco.
- Maloney, T.M. (1993)** *Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing*. Miller-Freeman Publications, Inc., San Francisco. 681p.
- Marian, J.E.; Stumbo, D.A. (1962a)**. Adhesion in wood: PartI. Physical factors. *Holzforschung* 16(5), 134-148.
- Marian, J.E.; Stumbo, D.A. (1962b)** Adhesion in wood: PartII. Physico-chemical surface phenomena and the thermodynamic approach to adhesion. *Holzforschung* 16(6), 168-180.
- Martin, R.E. (1969)** Characterization of southern pine barks, *For. Prod. J.* 19, No. 8, 23 - 30.
- Mo, X.; Cheng, E.; Wang, D.; Sun, X. S. (2003)** Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesive. *Industrial Corps and Prod.* 18, 47 - 53.
- Montgomery, D.C. (2005)** *Design and analysis of experiments*, 6th Edition, Arizona State University. PP. 119-202.
- MRNQ (1993)** Gouvernement du Québec. Ministère des Forêts. Direction du Développement Industriel. « Potentiel de développement de la cogénération à partir de biomasse industrielle au Québec » Septembre 1992.
- Nussbaum, R.M. (1999)** Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57:419-424.
- Pan, Z.; Cathcart, A. (2004)** Characteristics of particleboard bound with rice bran based adhesive. ASAE Paper No 046058. St Joseph, Mich.: ASAE.
- Park, B.D.; Kim, Y.S.; Riedl, B. (2001)** Effect of wood-fiber characteristics on medium density fiberboard (MDF) performance. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 29(3):27-35.
- Pecina, H.; Paprzycki, O. (1990)** Untersuchung über die Benetzbarkeit chemisch modifizierter Hölzern. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48: 61-65.
- Peng, H.Y., Li, J. (1983)** Effect of pH and the buffering capacity of economic wood species growing in northeast on the gel time of urea-formaldehyde resin. *J. Nor. Eas. For. Ins. China.* 11(4):100–105.
- Pisha, E. ; Chai H. ; Lee, I.S. ; Chagwedera, T.E. ; Farnsworth, N.R. ; Cordell, G.A. ; Beecher, C.W.; Fong, H.H.; Kinghorn, A.D.; Brown, D.M. (1995)** *Discovery of*

- betulinic acid as a selective inhibitor of human melanoma that functions by induction of apoptosis, *Nature Medicine*, 1, 1995, 1046-1051.
- PS2 (1992)** Performance Standard for Wood-Based, Structural-Use Panels (norme élaborée conjointement par le US Department of Commerce et le National Institute of Science and Technology).
- Rackwitz, G. (1963)** Einfluss der Spanabmessungen auf einige Eigenschaften von Holzspanplatten, *Holz als Roh- und Werkstoff* 21 (6), S. 200-209.
- Riedl, B. (2004)** CHM-20878-Adhésif pour bois, notes de cours Science du bois et de la forêt Université Laval, Automne 2004.
- Risi, J. (1945)** The chemical utilization of wood. *Pulp and paper magazine of Canada*, 46: 611 - 618.
- Roffael, E.; Schneider, A. (1978)** Sorption behavior of wood particleboards. Part1: effect of binder type and consumption on the equilibrium moisture. *Holz als Roh- und Werkstoff* 36: 393-396.
- Roffael, E. (1982)** Die Formaldehydabgabe von Spanplatten und anderen Werkstoffen. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. Leinfelden-Echterdingen: 154 S. ISBN: 3-87181-301 X.
- Roffael, E.; Dix, B.; Buchholzer, P. (1988)** Untersuchungen über den Einfluss des Alkalis in PF-Spanplatten. *Adhäsion* 32 (12): 21–29.
- Roffael, E.; Dix, B. (1991)** Neuere Entwicklung bei Holzbindemitteln. Teil 1. *Adhäsion* 35 (10): 36–39.
- Roffael, E.; Dix, B. (1992)** Entwicklung der organisch gebundenen Holzwerkstoffe. Vortrag gehalten anlässlich der Mitgliederversammlung des Vereins für Technische Holzfragen in Braunschweig, Juni 1992.
- Roffael, E. ;Schneider, T.; Pedieu, R. (2003)** Untersuchung über den teilweisen Ersatz von Strands in Oriented Strand Boards (OSB) durch unterschiedliche lignozellulose Rohstoffe. Masterarbeit Georg-August-Universität Göttingen.
- Russell, A.; Vanneman, C.R.; Waddey, W.E. (1942-1945)** Natural tanning materials of the Southeastern United States. Parts I-VIII. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.* 37: 340 - 356; 38: 30-34, 144-148, 235-238, 355-358; 39: 173-178; 40: 110-121, 422-426.
- Sampathrajan, A.; Vijayaraghavan, N.C.; Swaminathan, K.R. (1992)** Mechanical and thermal properties of particleboards made from farm residues. *Bioresour. Technol.* 40, 249-251.
- SBA. (1995)** Les panneaux OSB dans la construction à ossature de bois. Association du panneau structural. Toronto. 20p.
- Schmidt, L.E.; Hall, J.H.; Gertjeansen, O.R.; Hermann, J.; Hall, H. (1978)** Strength reductions in particleboard caused by fungi: *Forest Products Journal*: 28: 26-31.
- Schneider, A. (1973)** Über das Sorptionsverhalten von mit Phenol- und Harnstoffharz verleimten Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 425–429.
- Schneider, T. (1999)** Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faserstofftrocknung auf die Eigenschaften von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Dissertation Georg-August-Universität Göttingen **1999**.
- Sellers, T. (2000)** Growing markets for engineered products spurs research. *Wood Technol.* 127 (3), 40-43.
- Stevanovic, T. (2004)** Chimie du bois CHM-22170, Protocoles, Sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Hiver **2004**.

- Suchsland, O.; Stevens, R.R. (1968)** Gluability of southern pine veneer drier at high temperatures. *Forest Prod. J.* 18(1):38-42.
- Tamminen, Z. (1962)** Moisture content, density and other properties of wood and bark from pine (in Swedish). Royal College of Forestry. Department of forest products, Sweden, Report R 41.
- Tamminen, Z. (1970)** Moisture content, density and other properties of wood and bark from birch (in Swedish). Royal College of Forestry. Department of forest products, Sweden, Report R 63.
- Shupe, T.F.; Hse, C. Y.; Wang, W. H. (2001)** An Investigation of Selected Factors that Influence Hardwood Wettability. *Holzforschung* (55) 541-548.
- Troughout G.E.; Chow, S.Z. (1971)** Migration of fatty acids to White spruce veneer surface during drying: relevance to theories of inactivation. *Wood Sci* 3:129-133.
- Villeneuve, E. (2004)** Utilisation de l'écorce du peuplier faux-tremble pour la fabrication de panneaux de particules. Mémoire de maîtrise, département des Sciences du Bois et de la Forêt, Université Laval Québec.
- Volz, K. R. (1971)** Influence of inorganic content on the pH of bark *Holz-Zentralblatt.* 97: 1783.
- Walinder, M. (2000)** Wetting phenomena on wood: factors influencing measurements of wood wettability. Doctoral Thesis, KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Wang, D., Sun, X., (2002)** Low density particleboard from wheat straw and corn pith. *Indus.Crops and Prod.* 15, 43-50.
- Welfring, J.; Weidenhaupt, A. (1998)** La valorisation thermique des résidus ligneux de l'industrie de la transformation du bois. CRTE, cahier 01, CLIP No 8.
- Weissmann, G. (1976)** Untersuchung der Ätherextrakte von Lindenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 34: 171-174.
- Wellons, J.D. (1980).** Wettability and gluability of Douglas-fir veneer. *For. Prod. J.* 30(7):53-55.
- Willeitner, H. (1956)** Über die Mykologische Prüfung von Holzspanplatten: *Materialpruf.* 7: 129-134.
- Wittmann, O. (1973)** Alkali in Phenolharz-gebundenen Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 419-425.
- Woods, B.; Calnan, C.D. (1976)** Toxic woods. *B. J. Derm.* 94(Suppl. 13):1-97.
- Xing, C.; Zhang, S.Y.; Deng, J. (2004).** Effect of wood acidity and catalyst on UF resin gel time. *Holzforschung* 58: 408 - 412.
- Xing, C.; Zhang, S.Y.; Deng, J.; Wang, S. (2007)** Investigation of the effects of bark fiber as core material and its resin content on three-layer MDF performance by response surface methodology. *Wood Sci Technol* 41: 585-595.
- Youngquist, J.A.; English, B.E.; Spelter, H.; Chow, P. (1993a)** Agriculture fibers in composition panels, In: Maloney, Thomas M., ed. *Proceedings, 27th international particleboard/composite materials symposium; 1993 March30–April 1; Pullman, WA.* Pullman, WA: Washington State University: 133-152.
- Youngquist, J.A.; Myers, G.E.; Muehl, J.M.; [and others]. (1993b)** Composites from recycled wood and plastics. Final Rep., U.S. Environmental Protection Agency, Project IAG DW12934608–2. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Youngquist, J.A.; English, B.E.; Scharmer, R.C.; [and others].(1994)** Literature review on use of non-wood plants fibers for building materials and panels. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–80. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

- Youngquist, J. A. (1999)** Wood-based composites and panel products. In: Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rept. FPL-GRT-113. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI, pp. 1 - 31 (Chapter 10).
- Zisman, W.A. (1963)** Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. Advances in Chemistry serie 43: Contact angle, Wettability and adhesion. Actes du Kendall Award Symposium, tenu à Los Angeles, Californie, États-Unis, du 2 au 3 avril 1963, pages 1-51.

ANNEXE A: Données qui ont permis de faire l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, GE et DL) du chapitre 5

A.1 Description des six types de panneaux de base

P₂₂₋₅: panneau avec 22% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 5% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P₂₂₋₉: panneau avec 22% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P₂₂₋₁₃: panneau avec 22% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 13% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P₂₅₋₅: panneau avec 25% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 5% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P₂₅₋₉: panneau avec 25% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 9% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P₂₅₋₁₃: panneau avec 25% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de fibres de bois dans les couches couvrantes et 13% (de la masse anhydre des particules de la couche médiane) de fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane.

P_{réf}: panneau de contrôle ou de référence en particules de bois

La valeur moyenne est calculée sous la base de quatre répétitions de chaque type de panneau.

Tableau A1 Données du module d'élasticité (MOE)

Module d'élasticité (MOE) en GPa							
	Variantes de panneau						
	P₂₂₋₅	P₂₂₋₉	P₂₂₋₁₃	P₂₅₋₅	P₂₅₋₉	P₂₅₋₁₃	P_{réf}
Rep 1	1,779	1,743	2,242	1,815	2,779	2,097	3,358
Rep 2	1,687	1,503	1,872	1,783	2,168	1,938	3,043
Rep 3	1,794	1,621	2,200	1,886	1,886	2,065	3,149
Rep 4	2,181	1,935	2,005	1,954	2,232	1,682	3,295
Moyenne	1,860	1,701	2,080	1,860	2,261	1,946	3,211
E.T.	0,190	0,160	0,150	0,066	0,330	0,163	0,123
C.V. (%)	10,2	9,4	7,2	3,6	14,6	8,4	3,8

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau A2 Données du module de rupture (MOR)

Module de rupture (MOR) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P₂₂₋₅	P₂₂₋₉	P₂₂₋₁₃	P₂₅₋₅	P₂₅₋₉	P₂₅₋₁₃	P_{réf}
Rep 1	14,0	11,0	15,9	12,4	21,6	15,3	21,0
Rep 2	11,8	9,2	14,0	11,2	18,6	16,1	18,8
Rep 3	14,9	11,1	15,1	13,2	14,0	14,7	19,7
Rep 4	15,8	13,3	14,7	14,0	18,1	12,9	22,0
Moyenne	14,13	11,15	14,93	12,70	18,08	14,75	20,38
E.T.	1,49	1,45	0,69	1,03	2,71	1,18	1,22
C.V. (%)	10,5	13,0	4,6	8,1	15,0	8,0	6,0

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau A3 Données de la cohésion interne

Cohésion interne (CI) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P₂₂₋₅	P₂₂₋₉	P₂₂₋₁₃	P₂₅₋₅	P₂₅₋₉	P₂₅₋₁₃	P_{réf}
Rep 1	0,46	0,44	0,57	0,87	0,77	0,55	1,17
Rep 2	0,62	0,51	0,50	0,77	0,96	0,52	1,16
Rep 3	0,52	0,52	0,59	1,00	0,95	0,67	1,10
Rep 4	0,54	0,57	0,57	0,83	1,01	0,53	1,20
Moyenne	0,54	0,51	0,56	0,87	0,92	0,57	1,16
E.T.	0,06	0,05	0,03	0,08	0,09	0,06	0,04
C.V. (%)	11,1	9,8	5,4	9,2	9,8	10,5	3,4

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau A4 Données du gonflement en épaisseur (GE)

Gonflement en épaisseur (GE) en %							
	Variantes de panneau						
	P₂₂₋₅	P₂₂₋₉	P₂₂₋₁₃	P₂₅₋₅	P₂₅₋₉	P₂₅₋₁₃	P_{réf}
Rep 1	9,1	9,8	9,2	12,5	9,8	10,0	9,4
Rep 2	10,0	9,8	9,9	11,1	9,9	11,0	9,4
Rep 3	8,8	11,2	10,9	8,7	9,7	12,1	9,0
Rep 4	11,7	9,2	10,3	10,4	10,2	11,4	8,2
Moyenne	9,9	10,0	10,1	10,7	9,9	11,1	9,0
E.T.	1,1	0,7	0,6	1,4	0,2	0,8	0,5
C.V. (%)	11,1	7,0	5,9	13,1	2,0	7,2	5,6

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau A5 Données de la dilatation linéaire (DL)

Dilatation linéaire (DL) en %							
	Variantes de panneau						
	P₂₂₋₅	P₂₂₋₉	P₂₂₋₁₃	P₂₅₋₅	P₂₅₋₉	P₂₅₋₁₃	P_{réf}
Rep 1	0,33	0,46	0,39	0,49	0,48	0,41	0,15
Rep 2	0,29	0,49	0,43	0,43	0,46	0,41	0,22
Rep 3	0,30	0,44	0,37	0,41	0,38	0,47	0,18
Rep 4	0,35	0,40	0,38	0,46	0,44	0,44	0,22
Moyenne	0,32	0,45	0,39	0,45	0,44	0,43	0,19
E.T.	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03
C.V. (%)	6,3	6,7	5,1	6,7	9,1	4,7	15,8

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

A2 Coefficients des contrastes

L'utilisation du modèle GLM (general linear model) de SAS pour l'analyse des variances des variables dépendantes (MOE, MOR, CI, GL et DL) nécessite les coefficients des contrastes. Dans le cas du type de panneau dont il est question ici, le facteur pourcentage de fibres de bois (22% et 25%) des couches couvrantes a été considéré comme qualitatif (Quoique ce facteur concerne les chiffres, il ne saurait être considéré comme quantitatif parce qu'il n'a que deux niveaux et les effets linéaires et quadratiques ne peuvent pas être déterminés): à 22%, le coefficient 1 a été affecté et à 25% le coefficient -1 pour montrer le contraste (22%) versus (25%). Quant au facteur pourcentage des fibres de bois (5%, 9% et 13%) ajoutées aux particules d'écorce interne de la couche médiane, il est quantitatif parce qu'il est numérique et a trois niveaux. Le degré de liberté associé à un facteur à trois niveaux est 2 (nombre de niveau – 1). La décomposition des deux degrés de liberté associés au facteur pourcentage des fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce conduit à deux contrastes qui sont : l'effet linéaire du pourcentage et l'effet quadratique du pourcentage. Les niveaux 5%, 9% et 13% sont également espacés (écart de 4% entre eux) et les coefficients affectés aux effets linéaires (abrévés %L) sont -1, 0, 1 et aux effets quadratiques (abrévés %Q) ils sont 1, -2, 1. Ces coefficients sont obtenus de la table des coefficients pour contrastes quantitatifs avec niveaux également espacés (*Little et Hills, 1978*). Le plan utilisé pour la fabrication de panneaux dont il est question dans ce chapitre est celui d'une expérience factorielle de type $2*3 = 6$ types de panneaux possibles auxquels correspondent 5 degrés de liberté, nombre qui est aussi celui des contrastes.

Ces cinq contrastes sont :

- 1) 22% versus 25%
- 2) %L = pourcentage linéaire
- 3) %Q = pourcentage quadratique
- 4) %L*(22% versus 25%)
- 5) %Q*(22% versus 25%)

Tableau A6 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS qui a permis de faire l'analyse des variances des différentes variables dépendantes mesurées

% fibres de bois dans les couches couvrantes	22	22	22	25	25	25
% fibres de bois ajoutées aux particules d'écorce de la couche médiane	5	9	13	5	9	13
Coefficients des cinq contrastes						
(22% versus 25%)	1	1	1	-1	-1	-1
%L	-1	0	1	-1	0	1
%Q	1	-2	1	1	-2	1
%L*(22% versus 25%)	-1	0	1	1	0	-1
%Q*(22% versus 25%)	1	-2	1	-1	2	-1

ANNEXE B: Données qui ont permis de faire l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, GE et DL) du chapitre 6

B1 Description des six types de panneaux de base

P_{p-35} : panneau avec les particules de bois dans la couche médiane et 35% (de la masse anhydre totale du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{p-40} : panneau avec les particules de bois dans la couche médiane et 40% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{p-45} : panneau avec les particules de bois dans la couche médiane et 45% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{f-35} : panneau avec les fibres de bois dans la couche médiane et 35% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{f-40} : panneau avec les fibres de bois dans la couche médiane et 40% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{f-45} : panneau avec les fibres de bois dans la couche médiane et 45% (de la masse anhydre totale des particules du panneau) de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes.

P_{réf} : panneau de contrôle ou de référence en particules de bois

Tableau B1 Valeurs du module d'élasticité (MOE)

Module d'élasticité (MOE) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{p-35}	P_{p-40}	P_{p-45}	P_{f-35}	P_{f-40}	P_{f-45}	P_{réf}
Rep 1	2188	1967	1723	1973	1554	1449	3358
Rep 2	2164	1737	1901	1891	1657	1448	3043
Rep 3	2261	1778	1859	2120	1536	1396	3149
Rep 4	2132	1848	1707	1831	1493	1510	3295
Moyenne	2186	1833	1798	1954	1560	1451	3211
E.T.	48	87	84	108	60	40	123
C.V. (%)	2,2	4,8	4,7	5,5	3,9	2,8	3,8

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau B2 Valeurs du module de rupture (MOR)

Module de rupture (MOR) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{p-35}	P_{p-40}	P_{p-45}	P_{f-35}	P_{f-40}	P_{f-45}	P_{réf}
Rep 1	17,7	16,9	15,9	27,1	23,1	18,2	21
Rep 2	17,5	14,7	16,8	24,2	25,8	17,8	18,8
Rep 3	17,8	15,5	15,7	28,3	23,4	19,1	19,7
Rep 4	17,3	15,2	13,5	24,4	18,3	20,6	22
Moyenne	17,6	15,6	15,5	26,0	22,7	18,9	20,4
E.T.	0,2	0,8	1,2	1,8	2,7	1,1	1,2
C.V. (%)	1,2	5,1	7,7	6,9	11,9	5,8	5,9

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau B3 Valeurs de la cohésion interne (CI)

Cohésion interne (CI) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{p-35}	P_{p-40}	P_{p-45}	P_{f-35}	P_{f-40}	P_{f-45}	P_{réf}
Rep 1	1,11	0,94	0,79	0,75	0,56	0,63	1,17
Rep 2	1,03	0,81	0,63	0,71	0,68	0,50	1,16
Rep 3	1,04	0,97	0,79	0,60	0,48	0,55	1,10
Rep 4	1,14	0,94	0,67	0,55	0,48	0,53	1,20
Moyenne	1,08	0,92	0,72	0,65	0,55	0,55	1,16
E.T.	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,05	0,04
C.V. (%)	4,63	6,52	9,72	12,31	14,55	14,55	3,45

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau B4 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)

Gonflement en épaisseur 24h (GE) en %							
	Variantes de panneau						
	P_{p-35}	P_{p-40}	P_{p-45}	P_{f-35}	P_{f-40}	P_{f-45}	P_{réf}
Rep 1	11,7	17,4	10,9	12,7	12,4	12,0	9,4
Rep 2	10,5	14,6	7,9	11,1	11,7	12,3	9,4
Rep 3	12,0	17,4	11,7	13,1	12,0	12,7	9,0
Rep 4	11,6	12,0	10,5	12,0	11,2	12,4	8,2
Moyenne	11,5	15,4	10,3	12,2	11,8	12,4	9,0
E.T.	0,6	2,2	1,4	0,8	0,4	0,3	0,5
C.V. (%)	5,2	14,3	13,6	6,6	3,4	2,4	5,6

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau B5 Valeurs de la dilatation linéaire (DL)

Dilatation linéaire (DL) en %							
	Variantes de panneau						
	P_{p-35}	P_{p-40}	P_{p-45}	P_{f-35}	P_{f-40}	P_{f-45}	P_{réf}
Rep 1	0,17	0,16	0,14	0,29	0,24	0,24	0,15
Rep 2	0,14	0,16	0,15	0,28	0,24	0,28	0,22
Rep 3	0,16	0,14	0,14	0,29	0,25	0,22	0,18
Rep 4	0,17	0,15	0,17	0,30	0,23	0,24	0,22
Moyenne	0,16	0,15	0,15	0,29	0,24	0,25	0,19
E.T.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
C.V. (%)	6,25	6,67	6,67	3,45	4,17	8,00	15,79

Rep = répétition, **E.T.** = écart-type, **C.V.** = coefficient de variation

B2 Coefficients des contrastes

Le facteur qualitatif est le « type de matériel dans la couche médiane ». Ce facteur a deux niveaux qui sont : les particules de bois et les fibres de bois. À « particules de bois », est affecté le coefficient 1 et à « fibres de bois » le coefficient -1 afin de montrer le contraste particules de bois versus fibres de bois. Quant au facteur pourcentage de particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes (35%, 40% et 45%), il est quantitatif parce qu'il est numérique et a trois niveaux. La décomposition des deux degrés de liberté associés à ce facteur quantitatif conduit à deux contrastes suivants : l'effet linéaire du pourcentage et l'effet quadratique du pourcentage. Les niveaux 35%, 40% et 45% sont également espacés (écart de 5% entre eux) et les coefficients affectés aux effets linéaires (abrévés %L) sont -1, 0, 1 et aux effets quadratiques (abrévés %Q), ils sont 1, -2, 1. Ces coefficients sont obtenus de la table des coefficients pour contrastes quantitatifs avec niveaux également espacés (*Little et Hills, 1978*). Le plan utilisé pour la fabrication de panneaux est celui d'une expérience factorielle de type $2 \times 3 = 6$ types de panneaux

possibles auxquels correspondent 5 degrés de liberté, nombre qui est aussi celui des contrastes.

Ces cinq contrastes sont :

1. Particules de bois versus fibres de bois en abrégé : (PB Vs PF)
2. %L = pourcentage linéaire
3. %Q = pourcentage quadratique
4. %L*(PB Vs PF)
5. %Q*(PB Vs PF)

Tableau B6 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS ayant permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées

Type de matériel dans la couche médiane	PB			FB		
% particules d'écorce externe de bouleau blanc dans les couches couvrantes	35	40	45	35	40	45
Coefficients des cinq contrastes						
(PB Vs FB)	1	1	1	-1	-1	-1
%L	-1	0	1	-1	0	1
%Q	1	-2	1	1	-2	1
%L*(PB Vs FB)	-1	0	1	1	0	-1
%Q*(PB Vs FB)	1	-2	1	-1	2	-1

PB = particules de bois, **FB** = fibres de bois

ANNEXE C: Données qui ont permis de faire l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, Dureté, GE et DL) du chapitre 7

C1 Description des six types de panneaux de base

P_{5%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 5% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{6,5%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 6,5% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{8%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes ne sont pas traitées à la soude et encollées avec 8% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{s-5%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 5% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{s-6,5%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 6,5% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{s-8%}: panneau dont les particules d'écorce externe de bouleau blanc des couches couvrantes sont traitées à la soude et encollées avec 8% (de la masse anhydre des particules des couches couvrantes) de résine phénol-formaldéhyde (PF)

P_{réf}: panneau de contrôle ou de référence en particules de bois

Tableau C1 Valeurs du module d'élasticité (MOE)

Module d'élasticité (MOE) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	2,232	2,049	2,129	1,766	1,682	2,065	3,862
Rep 2	2,129	2,215	2,2	1,782	1,76	2,371	3,552
Rep 3	2,312	2,186	1,963	2,234	1,804	2,092	4,042
Rep 4	2,176	2,279	2,364	1,999	1,972	2,213	4,432
Moyenne	2,212	2,182	2,164	1,945	1,805	2,185	3,972
E.T.	0,068	0,084	0,144	0,190	0,106	0,121	0,318
C.V. (%)	3,1	3,8	6,7	9,8	5,9	5,5	8,0

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau C2 Valeurs du module de rupture (MOR)

Module de rupture (MOR) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	25,5	24,2	23,1	16,1	15,7	20,9	26,4
Rep 2	24,9	25,5	23,1	16,4	16,8	25,9	24,9
Rep 3	26,1	23,8	22	18,1	16,9	22,1	29,9
Rep 4	24,1	25,6	27,7	19,4	20,2	20,3	36,5
Moyenne	25,2	24,8	24,0	17,5	17,4	22,3	29,4
E.T.	0,7	0,8	2,2	1,3	1,7	2,2	4,5
C.V. (%)	2,8	3,2	9,2	7,4	9,8	9,9	15,3

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau C3 Valeurs de la cohésion interne (CI)

Cohésion interne (CI) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	1,52	1,29	1,08	1,15	1,08	1,34	1,75
Rep 2	1,15	1,57	1,00	1,02	0,92	0,77	1,42
Rep 3	1,55	1,33	1,35	1,06	1,13	1,07	1,60
Rep 4	1,41	1,62	1,11	1,23	1,02	1,27	1,76
Moyenne	1,41	1,45	1,14	1,12	1,04	1,11	1,63
E.T.	0,16	0,14	0,13	0,08	0,08	0,22	0,14
C.V. (%)	11,30	9,70	11,40	7,10	7,70	19,80	8,60

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau C4 Valeurs de la dureté (D)

Dureté en Newton							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	5418	6534	4894	3781	4787	4931	5291
Rep 2	5193	5133	4711	4044	4459	5102	5482
Rep 3	4658	5847	5515	4166	4396	5411	5797
Rep 4	4377	5384	4889	4375	4914	5501	5962
Moyenne	4912	5725	5002	4092	4639	5236	5633
E.T.	414	533	305	215	217	230	262
C.V. (%)	8,4	9,3	6,1	5,3	4,7	4,4	4,7

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau C5 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)

Gonflement en épaisseur 24h (GE) en %							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	4,0	5,9	13,4	15,2	15,3	8,0	17,9
Rep 2	3,7	7,1	8,4	16,0	15,5	8,1	16,7
Rep 3	3,1	5,0	4,8	15,8	14,3	6,6	17,5
Rep 4	2,0	4,5	6,4	14,2	13,0	10,9	15,7
Moyenne	3,2	5,6	8,3	15,3	14,5	8,4	17,0
E.T.	0,8	1,0	3,2	0,7	1,0	1,6	0,8
C.V. (%)	25,0	17,9	38,6	4,6	6,9	19,0	4,7

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau C6 Valeurs de la dilatation linéaire (DL)

Dilatation linéaire (DL) en %							
	Variantes de panneau						
	P_{5%}	P_{6,5%}	P_{8%}	P_{s-5%}	P_{s-6,5%}	P_{s-8%}	P_{réf}
Rep 1	0,16	0,17	0,14	0,24	0,24	0,26	0,24
Rep 2	0,14	0,14	0,16	0,30	0,26	0,27	0,29
Rep 3	0,14	0,16	0,16	0,30	0,27	0,29	0,26
Rep 4	0,14	0,15	0,12	0,25	0,26	0,24	0,26
Moyenne	0,15	0,16	0,15	0,27	0,26	0,27	0,26
E.T.	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
C.V. (%)	6,7	6,3	13,3	11,1	3,8	7,4	7,7

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

C2 Coefficients des contrastes

Le traitement des particules d'écorce est le facteur qualitatif. Ce facteur a deux niveaux qui sont : particules d'écorce non traitées à la soude et particules d'écorce traitées à la soude. À « particules d'écorce non traitées à la soude », le coefficient 1 a été affecté et à « particules d'écorce non traitées à la soude » le coefficient -1, afin de montrer le contraste particules non traitées versus particules traitées. Quant au facteur pourcentage de résine PF utilisé pour encoller ces particules, (5%, 6,5% et 8%), il est quantitatif parce qu'il est numérique et a trois niveaux. La décomposition des deux degrés de liberté associés à ce facteur quantitatif conduit aux deux contrastes suivants : l'effet linéaire du pourcentage et l'effet quadratique du pourcentage. Les niveaux 5%, 6,5% et 8% sont également espacés (écart de 1,5% entre eux) et les coefficients affectés aux effets linéaires (abrévés %L) sont -1, 0, 1 et aux effets quadratiques (abrévés %Q), ils sont 1, -2, 1. Ces coefficients sont obtenus de la table des coefficients pour contrastes quantitatifs avec niveaux également espacés (*Little et Hills, 1978*). Le plan utilisé pour la fabrication de panneaux est celui d'une expérience factorielle de type $2 \times 3 = 6$ types de panneaux possibles auxquels correspondent 5 degrés de liberté, nombre qui est aussi celui des contrastes.

Ces cinq contrastes sont :

1. Particules d'écorce non traitées versus particules d'écorce traitées : (EnT Vs E T)
2. %L = pourcentage linéaire
3. %Q = pourcentage quadratique
4. %L*(EnT Vs ET)
5. %Q*(EnT Vs ET)

Tableau C7 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS qui a permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées

Types de particules dans les couches couvrantes	EnT	EnT	EnT	ET	ET	ET
% de la colle phénol-formaldéhyde (PF)	5	6,5	8	5	6,5	8
Coefficients des cinq contrastes						
(EnT Vs ET)	1	1	1	-1	-1	-1
%L	-1	0	1	-1	0	1
%Q	1	-2	1	1	-2	1
%L*(EnT Vs ET)	-1	0	1	1	0	-1
%Q*(EnT Vs ET)	1	-2	1	-1	2	-1

EnT = écorces non traitées à la soude, **ET** = écorces traitées à la soude

ANNEXE D: Données utilisées dans l'analyse statistique des principales propriétés normalisées (MOE, MOR, CI, Dureté, GE et DL) du chapitre 8

D1 Description des six types de panneaux de base

P_O: panneau mixte avec les lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans la couche médiane

P_{O-f}: panneau mixte avec les lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude auxquelles 10% (de la masse anhydre des particules utilisées dans la couche médiane) de fibres de bois sont ajoutées dans la couche médiane

P_{O-s}: panneau mixte avec les lamelles de bois orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc traitées à la soude dans la couche médiane

P_{nO}: panneau mixte avec les lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude dans la couche médiane

P_{nO-f}: panneau mixte avec les lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc non traitées à la soude auxquelles 10% (de la masse anhydre des particules utilisées dans la couche médiane) de fibres de bois sont ajoutées dans la couche médiane

P_{nO-s}: panneau mixte avec les lamelles de bois non orientées dans les couches couvrantes et les particules d'écorce externe de bouleau blanc traitées à la soude dans la couche médiane

P_{réf}: panneau de contrôle ou de référence en lamelles de bois

Tableau D1 Valeurs du module d'élasticité dans le sens de la longueur du panneau (MOE*)

Module d'élasticité sens longueur (MOE*) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	4580	5080	6218	3355	2970	2766	7196
Rep 2	4254	4356	6162	3390	3368	3500	5851
Rep 3	6858	3792	5116	3686	3169	3373	5263
Moyenne	5231	4409	5832	3477	3169	3213	6103
E.T.	1158	527	507	148	162	320	809
C.V. (%)	22,1	12,0	8,7	4,3	5,1	10,0	13,3

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D2 Valeurs du module d'élasticité dans le sens de la largeur du panneau (MOE[⊥])

Module d'élasticité sens largeur (MOE[⊥]) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	1411	1969	2148	3475	3034	3768	5293
Rep 2	1382	2041	1269	3784	2822	3522	3660
Rep 3	1355	1753	1384	3305	3121	4314	4071
Moyenne	1383	1921	1600	3521	2992	3868	4341
E.T.	23	122	390	198	126	331	694
C.V. (%)	1,7	6,4	24,4	5,6	4,2	8,6	16

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D3 Valeurs de module de rupture dans le sens de la longueur du panneau (MOR*)

Module de rupture sens longueur (MOR*) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	24,1	30	31,1	22,2	17,6	21,5	37,6
Rep 2	24,3	23,9	32,6	18,7	19,9	19,3	21,7
Rep 3	36	20,2	29,5	22,9	18,6	18,6	26,4
Moyenne	28,1	24,7	31,1	21,3	18,7	19,8	28,6
E.T.	5,6	4,0	1,3	1,8	0,9	1,2	6,7
C.V. (%)	19,9	16,2	4,2	8,5	4,8	6,1	23,4

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D4 Valeurs de module de rupture dans le sens de la largeur du panneau (MOR^ξ)

Module de rupture sens largeur (MOR^ξ) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	8,7	11,5	12,7	28	18,3	21,4	29,2
Rep 2	8,2	14,7	10,2	18,9	17,7	16,5	27,2
Rep 3	11,8	12,1	10,7	18,2	21,3	28,5	23
Moyenne	9,6	12,8	11,2	21,7	19,1	22,1	26,5
E.T.	1,6	1,4	1,1	4,5	1,6	4,9	2,6
C.V. (%)	16,7	10,9	9,8	20,7	8,4	22,2	9,8

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D5 Valeurs de la cohésion interne (CI)

Cohésion interne (CI) en MPa							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	0,50	0,31	0,50	0,66	0,26	0,50	0,43
Rep 2	0,64	0,44	0,53	0,44	0,33	0,59	0,45
Rep 3	0,64	0,4	0,54	0,51	0,28	0,47	0,41
Moyenne	0,59	0,38	0,52	0,54	0,29	0,52	0,43
E.T.	0,07	0,05	0,02	0,09	0,03	0,05	0,02
C.V. (%)	11,9	13,2	3,8	16,7	10,3	9,6	4,7

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D6 Valeurs du gonflement en épaisseur (GE)

Gonflement en épaisseur 24h (GE) en %							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	20,1	15,6	31,8	17,7	13,2	27,1	13,3
Rep 2	17,2	15,8	23,9	17,5	15,1	27,6	15,2
Rep 3	20,1	15,5	28,1	17,7	17,7	32,2	19,5
Moyenne	19,1	15,6	27,9	17,6	15,3	29,0	16,0
E.T.	1,4	0,1	3,2	0,1	1,8	2,3	2,6
C.V. (%)	7,3	0,6	11,5	0,6	11,8	7,9	16,3

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

Tableau D7 Valeurs de la dilatation linéaire (DL)

Dilatation linéaire (DL) en %							
	Variantes de panneau						
	P_O	P_{O-f}	P_{O-s}	P_{nO}	P_{nO-f}	P_{nO-s}	P_{réf}
Rep 1	0,22	0,14	0,19	0,13	0,06	0,17	0,15
Rep 2	0,18	0,17	0,15	0,13	0,05	0,08	0,10
Rep 3	0,06	0,09	0,16	0,14	0,18	0,13	0,12
Moyenne	0,15	0,13	0,17	0,13	0,10	0,13	0,12
E.T.	0,07	0,03	0,02	0,00	0,06	0,04	0,02
C.V. (%)	46,7	23,1	11,8	0,0	60,0	30,8	16,7

Rep = répétition, E.T. = écart-type, C.V. = coefficient de variation

D2 Coefficients des contrastes

L'orientation des lamelles de bois dans les couches couvrantes est un facteur qualitatif à deux niveaux qui sont : lamelles orientées et lamelles non orientées. À « lamelles orientées », le coefficient 1 a été affecté et à « lamelle non orientées » le coefficient -1. Quant au facteur type de matériel dans la couche médiane, il est aussi qualitatif et a trois niveaux qui sont : les particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois, les particules d'écorce non traitées à la soude avec ajout de fibres de bois et les particules d'écorce traitées à la soude sans ajout de fibres de bois. La décomposition des deux degrés de liberté associés à ce facteur qualitatif conduit aux deux contrastes suivants :

- [particules non traitées à la soude] versus [particules traitées à la soude]

Dans ce contraste les particules non traitées à la soude sont les particules d'écorce externe de bouleau sans fibre de bois d'une part et avec ajout de fibres de bois d'autre part. Donc le coefficient affecté au niveau : (particules d'écorce non traitées à la soude et sans ajout de fibres de bois) est 1, le coefficient affecté au niveau : (particules d'écorce non traitées

à la soude avec ajout de fibres de bois) est 1 et le coefficient affecté au niveau : (particules d'écorce traitées à la soude sans ajout de fibres de bois) est -2. Ces coefficients sont choisis de telle manière que le principe d'orthogonalité (somme des coefficients = 0) soit vérifié, ce qui est bien le cas ici parce que $1+1+(-2) = 0$.

- [particules d'écorce sans ajout de fibres de bois non traitées à la soude] versus [particules d'écorce non traitées à la soude avec ajout de fibres de bois]

À [particules d'écorce sans ajout de fibres de bois non traitées à la soude] est affecté le coefficient 1 et à [particules d'écorce non traitées à la soude avec ajout de fibres de bois] le coefficient -1.

Le plan utilisé pour la fabrication de panneaux est celui d'une expérience factorielle de type $2*3 = 6$ types de panneaux possibles auxquels correspondent 5 degrés de liberté, nombre qui est aussi celui des contrastes.

Ces cinq contrastes sont :

1. [Lamelles de bois orientées (O)] versus [Lamelles de bois non orientées (nO)] = (O vs nO)
2. [particules non traitées à la soude (nT)] versus [particules traitées à la soude (T)] = (nT vs T)
3. [particules d'écorce sans ajout de fibres de bois non traitées à la soude (nT)] versus [particules d'écorce non traitées à la soude avec ajout de fibres de bois (nTf)] = (nT vs nTf)
4. (O vs nO) * (nT vs T)
5. (O vs nO) * (nT vs nTf)

Tableau D8 Coefficients utilisés pour écrire le programme SAS ayant permis de faire l'analyse de variance des variables dépendantes mesurées

Orientation des lamelles dans les couches couvrantes	O			nO		
Type de matériel dans la couche médiane	Éc. nT	Éc. nTf	Éc. T	Éc. nT	Éc. nTf	Éc. T
Coefficients des cinq contrastes						
(O vs nO)	1	1	1	-1	-1	-1
nT vs T	1	1	-2	1	1	-2
(O vs nO)*(nT vs T)	1	1	-2	-1	-1	2
nT vs nTf	1	-1	0	1	-1	0
(O vs nO)*(nT vs nTf)	1	-1	0	-1	1	0

O = lamelles orientées; **nO** = lamelles non orientées; **nT** = particules non traitées à la soude (englobe nTf) dans ce cas; **T** = particules traitées à la soude; **nTf** = particules non traitées à la soude avec ajout des fibres de bois.

ANNEXE E: Mesure d'angle de contact de l'écorce externe de bouleau blanc

E.1 Matériel d'essai et équipements

Vieilles feuilles d'écorce externe de bouleau blanc ([conservées pendant 14 mois](#)); et feuilles nouvellement récoltées d'écorce externe de bouleau blanc; placage de bouleau jaune ([c'est un vieux bois](#)). Le bois de bouleau jaune est utilisé dans cette expérience pour servir de comparaison à l'écorce. Ces matériaux sont au préalable conditionnés à une température de 20° C et une humidité relative de 65% pendant deux semaines. En ce qui concerne la préparation de ces échantillons, ils sont découpés dans le sens de la longueur suivant la direction des fibres aux dimensions de 2cm * 1cm. Un goniomètre du type FTA200 qui fonctionne avec l'assistance du logiciel FTA32; cinq seringues contenant dans l'ordre l'eau, la formamide, le 1-4 dioxane, la glycérine et l'éthylène glycol; une paire de ciseaux; deux petits écrous pour bien aplatir l'échantillon sur son support en dessous de l'objectif du goniomètre.

E.2 Manipulation

Le système est mis en fonction et est calibré par la suite. Les paramètres liés à la luminosité sont fixés comme suit : lumière avant 0%, lumière arrière 100%, brillance 50% et contraste 100%. La seringue ainsi que l'échantillon de bois sont montés. Puis le grossissement et la mise au point sont ajustés. Les limites de l'aiguille sont fixées sur l'écran et on fait tomber la goutte pendante sur l'échantillon. Le système mesure automatiquement les angles de contact de la goutte avec la surface de l'échantillon. À l'aide de l'option CINELOOP, les images sont visionnées afin de sélectionner celles correspondant à la mesure objective de l'angle de contact, c'est-à-dire la mesure prise quand la goutte est assez stable à un instant donné.

E.2.1 Résultats des mesures d'angle en degré (Tableau E1)

Tableau E1 Résultats des mesures d'angle de contact

	Types de solvant									
	Eau		Formamide		Glycérine		1-4 dioxanne		Ethylène glycol	
Vieux bois de bouleau jaune	2 mesures d'angle de contact (θ_1 et θ_2) en ($^\circ$) pour chaque type de solvant									
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
	105,99	107,07	80,36	81,84	134,33	130,33	17,07	9,66	73,17	78,61
θ_m	106,53		81,10		132,33		13,36		75,89	
$\text{Cos } \theta_m$	-0,284		0,155		-0,673		0,973		0,244	
Écorces externes fraîches de bouleau blanc	2 mesures d'angle de contact (θ_1 et θ_2) en ($^\circ$) pour chaque type de solvant									
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
	111,17	104,39	76,78	76,78	98,26	111,11	7,39	7,00	50,63	57,05
θ_m	107,78		76,78		104,68		7,20		53,84	
$\text{Cos } \theta_m$	-0,305		0,229		-0,253		0,992		0,590	
Vieilles écorces externes de bouleau blanc	2 mesures d'angle de contact (θ_1 et θ_2) en ($^\circ$) pour chaque type de solvant									
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
	97,98	98,48	89,23	95,98	123,26	116,75	9,21	7,30	66,48	64,94
θ_m	98,23		92,61		120,00		8,25		65,71	
$\text{Cos } \theta_m$	-0,143		-0,046		-0,500		0,989		0,411	

θ_m est la valeur moyenne des deux mesures d'angle de contact pour chaque type de solution, $\text{Cos } \theta_m$ est le cosinus de la valeur moyenne des deux angles de contact mesurés.

E.3 Détermination de la tension de surface critique par la méthode de Zisman

Les valeurs de la tension de surface γ_s des différentes solutions sont données dans le Tableau E2

Tableau E2 Tension de surface des différents liquides utilisés

	Eau	Formamide	Glycérine	1-4 dioxanne	Ethylène glycol
γ_s (mJ/m ²)	72,80	58,0	64,00	33	47,99

E.3.1 Tension de surface de bouleau jaune

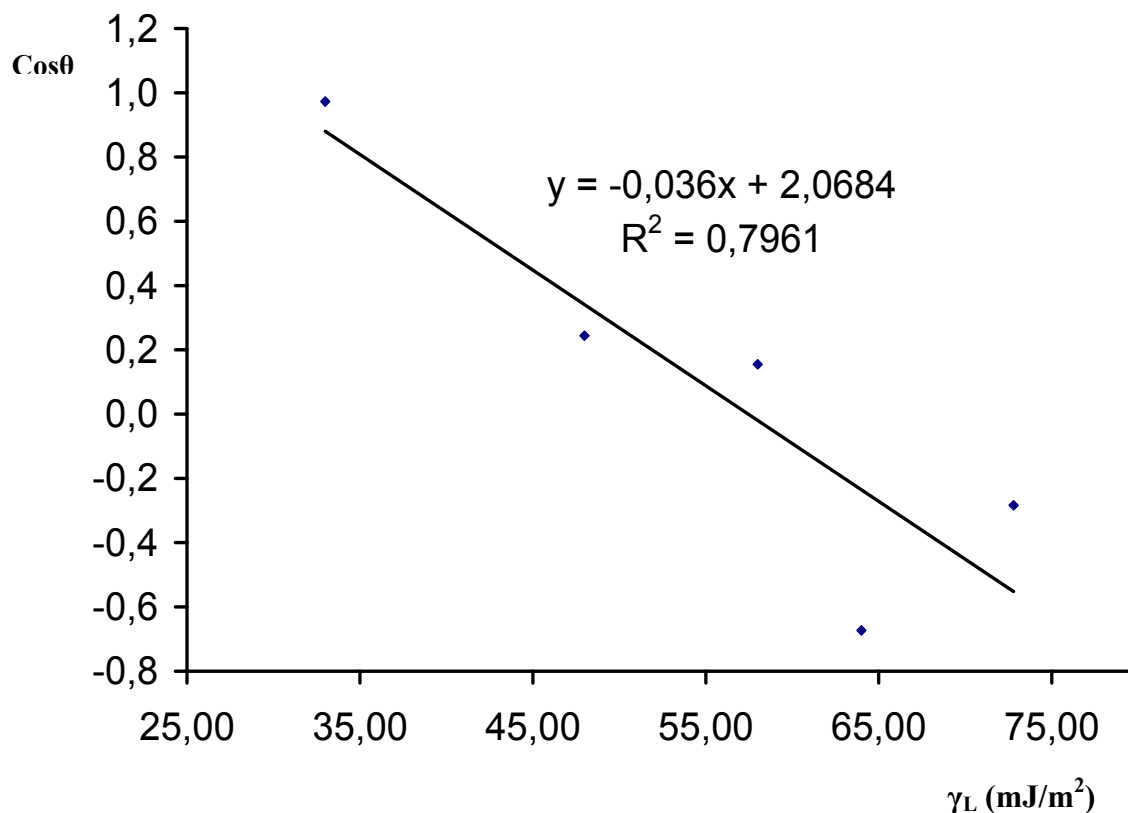


Figure E1 Droite de Zisman pour le bouleau jaune

La valeur de la tension de surface critique de bouleau jaune est obtenue en prolongeant la droite de la Figure E1 jusqu'à $\text{Cos}\theta = 1$ et en résolvant l'équation $-0,036 \gamma_s + 2,0684 = 1$

$$\text{Donc } \gamma_s = \gamma_c = (1-2,0684)/(-0,036) = 29,7 \text{ mJ/m}^2$$

La tension de surface critique de bouleau jaune vaut $\gamma_s = 29,7 \text{ mJ/m}^2$

Cette valeur de la tension de surface est inférieure à celle retrouvée dans la littérature qui est de 39 mJ/m^2 . La différence serait due à l'effet de vieillissement des échantillons de bois utilisés.

E.3.2 Tension de surface des écorces externes fraîches de bouleau blanc

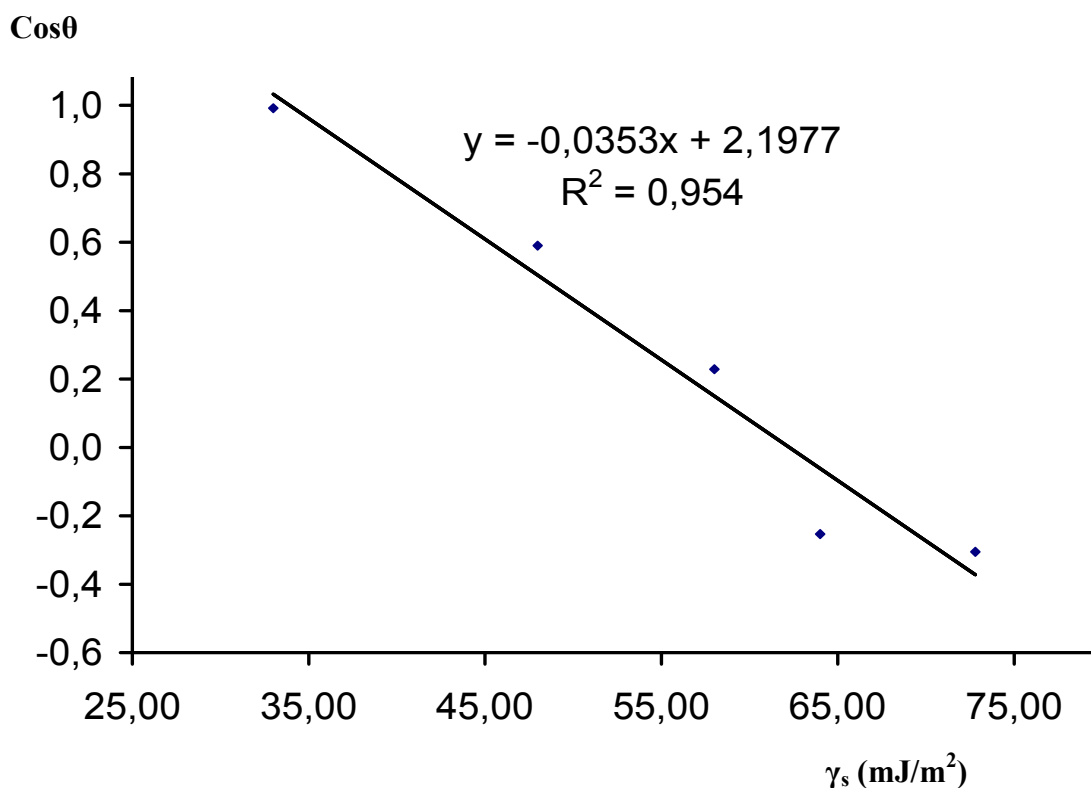


Figure E2 Droite de Zisman pour les écorces externes fraîches de bouleau blanc

En résolvant l'équation $-0,0353 \gamma_s + 2,1977 = 1$ de la Figure E2, on a $\gamma_s = \gamma_c = 1 - 2,1977 / -0,0353 = 33,9$; $\gamma_s = 33,9 \text{ mJ/m}^2$

La tension de surface critique des écorces externes fraîches de bouleau blanc vaut $\gamma_s = 33,9 \text{ mJ/m}^2$

E.3.3 Tension de surface des vieilles écorces externes de bouleau blanc

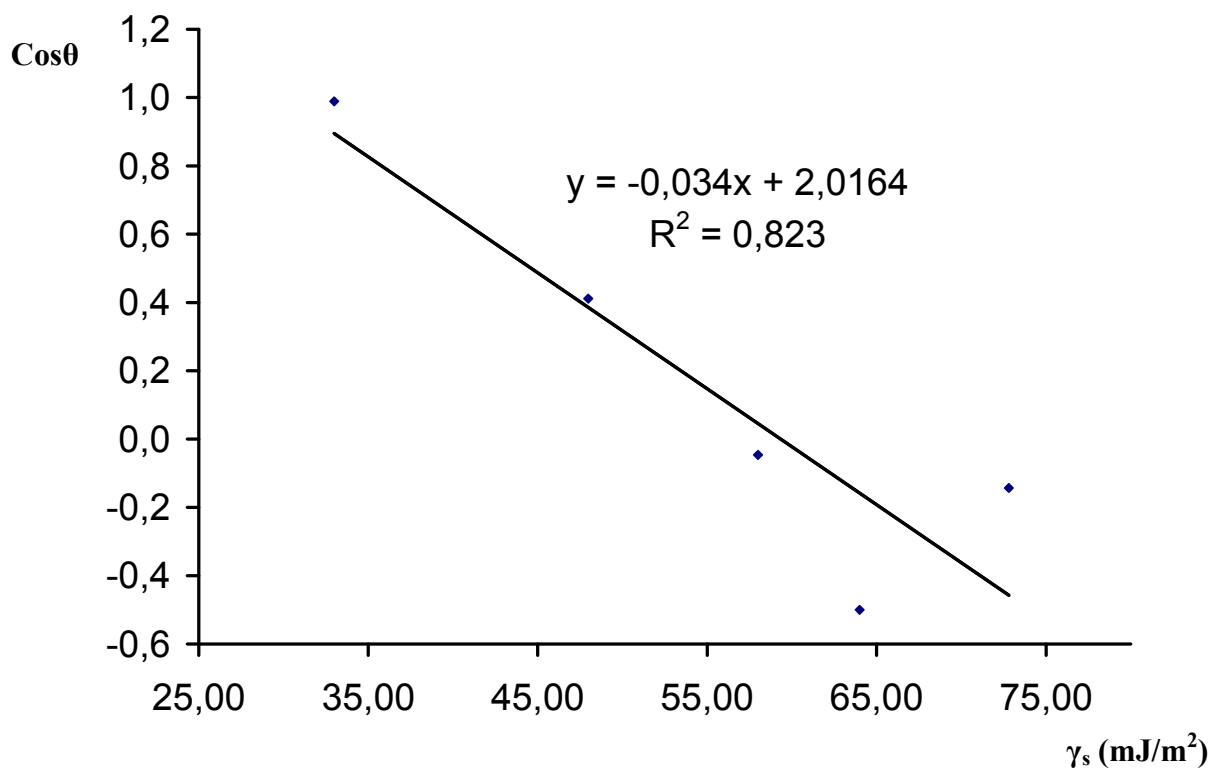


Figure E3 Droite de Zisman pour les vieilles écorces externes de bouleau blanc

En résolvant l'équation $-0,034 \gamma_s + 2,0164 = 1$ de la Figure E3, on a $\gamma_s = \gamma_c = 1 - 2,0164 / -0,034 = 29,9$; $\gamma_s = 29,9 \text{ mJ/m}^2$

La tension de surface critique des vieilles écorces externes de bouleau blanc vaut $\gamma_s = 29,9 \text{ mJ/m}^2$

E.4 Discussion

L'angle de contact mesuré avec la solution d'eau tant sur les écorces fraîches que sur les vieilles écorces externes de bouleau blanc a donné des valeurs très élevées comme indiquées dans le Tableau E1, ce qui confirme bien la difficulté de mouillage de ces écorces avec la résine urée-formaldéhyde (UF) qui est une colle basée sur l'eau. Il est prouvé dans le cas du bois que l'angle de contact augmente avec son vieillissement. Mais dans le cas des écorces que nous avons utilisées l'angle de contact mesuré en utilisant la solution d'eau nous a donné $107,78^\circ$ pour les écorces fraîches et $98,23^\circ$ pour les écorces ayant été conservées pendant 14 mois. Ce qui est tout à fait le contraire de ce qui se passe avec le bois. Les raisons de cette curieuse observation sont difficiles à expliquer et pourraient faire l'objet d'une recherche plus poussée. Par contre la tension de surface diminue avec le vieillissement de l'écorce comme c'est le cas avec le bois. Elle est passée de $33,9 \text{ mJ/m}^2$ pour les écorces fraîches à $29,9 \text{ mJ/m}^2$ pour les écorces conservées pendant 14 mois dans le laboratoire à la température moyenne de 21°C . Leur taux d'humidité était de 3%. À titre de comparaison, la tension de surface des écorces fraîches est presque égale à la tension de surface du bois de bouleau jaune. Ceci est dû au fait que le bouleau jaune choisi étant un vieux bois, sa tension de surface a diminué. La preuve de cette observation est que la tension de surface des vieilles écorces de bouleau blanc est bien inférieure à celle du vieux bois de bouleau jaune. Il a été difficile de déterminer la composante dispersive de la tension de surface des écorces et du bois de bouleau utilisés dans cette expérience parce que les faibles valeurs du coefficient de détermination (R^2) ont montré l'absence d'une linéarité entre la composante dispersive et le cosinus de l'angle de contact mesuré. La valeur de la tension de surface trouvée dans la littérature pour le bouleau jaune (peut être un bois frais de bouleau jaune) est autour de 39 mJ/m^2 . Donc la différence entre la valeur mesurée et celle obtenue de la littérature serait due au vieillissement de l'échantillon utilisé.

E.5 Conclusion

Les tests portant sur la mesure d'angle de contact et du calcul de la tension de surface d'écorce externe de bouleau blanc ont confirmé qu'elle est très hydrophobe, parce qu'avec l'eau, la valeur moyenne d'angle de contact mesurée est d'environ 100° , ce qui est

largement supérieure à la valeur requise pour la mouillabilité des résines comme la UF utilisées pour encoller les particules de bois. De même la valeur moyenne de la tension de surface de l'ordre de 30 mJ/m^2 est petite comparée à celle du bois qui est de l'ordre de 40 mJ/m^2 . Il a été impossible à l'aide de la droite de *Zisman (1963)* de déterminer la composante dispersive de la tension de surface des écorces utilisées.