

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR  
FRANÇOIS BERGERON

MISE EN PÂTE MÉCANIQUE AU PEROXYDE ALCALIN  
DE MÉLANGES PIN GRIS – ÉPINETTE NOIRE

JANVIER 2004

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## Remerciements

Je voudrais d'abord exprimer mes sincères remerciements à mon co-directeur, monsieur Claude Daneault et spécialement à mon directeur Robert Lanouette pour leurs conseils et leur patience à toute épreuve.

Je tiens aussi à remercier le personnel du Centre de Recherche en Pâtes et Papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour toute l'aide apportée et le CRSNG pour avoir contribué financièrement au projet de recherche.

Enfin j'aimerais spécialement remercier mes amis, ma famille et mon garçon Rémi. Sans vous je n'aurais pas terminé cet ouvrage.

Août 2003

## Table des Matières

<b>Remerciements .....</b>	ii
<b>Table des Matières .....</b>	iii
<b>Liste des tableaux .....</b>	vi
<b>Liste des figures .....</b>	ix
<b>Liste des abréviations .....</b>	x
<b>Chapitre 1 - Introduction .....</b>	1
1.1    Utilisation du pin gris ( <i>Pinus banksiana lamb.</i> ) dans l'industrie des pâtes et papiers .....	1
<b>Chapitre 2 - Problématique et objectifs de l'étude .....</b>	3
2.1    Travaux antérieurs.....	3
2.2    Structure chimique et morphologie du pin gris .....	13
2.2.1    Structure morphologique.....	13
2.2.2    Structure chimique .....	15
2.3    Propriétés comparatives des pâtes de pin gris et d'épinette .....	16
2.4    Objectif de la recherche.....	17
<b>Chapitre 3 - Théorie .....</b>	19
3.1    Caractéristique de la matière fibreuse .....	19
3.1.1    Bois juvénile.....	19
3.1.2    Bois de cœur .....	20
3.1.3    La structure en couches de la fibre .....	20
3.2    Procédé de mise en pâte mécanique .....	21
3.2.1    Traitement mécaniques .....	25
3.2.1    Pâte de raffineur .....	25
3.2.1.1    Théorie du raffinage .....	26
3.2.2    Pâte thermomécanique .....	27

3.2.3	Pâtes chimicomécaniques .....	28
3.2.4	Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin .....	29
3.3	Blanchiment des pâtes mécaniques .....	32
3.3.1	Blanchiment au peroxyde .....	35
3.3.2	Blanchiment au perborate de sodium. ....	41
3.3.3	Blanchiment au raffineur .....	42
<b>Chapitre 4 - Expérimentation.....</b>		<b>43</b>
4.1	Design statistique d'expériences .....	44
4.1.1	Surface de réponse; méthode et design .....	44
4.1.2	Blocage d'un CCD .....	45
4.2	Procédures expérimentales .....	46
4.2.1	Variables étudiées .....	46
4.2.2	Limites du plan.....	47
4.2.3	Procédé de mise en pâte .....	47
4.2.4	Essais expérimentaux.....	49
4.3	Propriétés de la pâte .....	50
4.3.1	Énergie spécifique de raffinage .....	50
4.3.2	Teneur en matières extractibles.....	50
4.3.3	Teneur en rejets.....	50
4.4	Propriétés mécaniques à évaluer .....	51
4.4.1	Force de traction .....	51
4.4.1.1	Longueur de rupture.....	51
4.4.1.2	Allongement .....	51
4.4.2	Résistance à l'éclatement .....	52
4.4.3	Résistance à la déchirure .....	53
4.5	Propriétés optiques.....	53
4.5.1	Blancheur.....	53
4.5.2	Opacité .....	53
4.5.3	Coefficient de diffusion de la lumière .....	53
<b>Chapitre 5 - Résultats et discussion .....</b>		<b>54</b>
5.1	Propriétés de la pâte .....	57

5.1.1	Teneur en matières extractibles.....	57
5.1.2	Énergie spécifique de raffinage .....	60
5.1.3	Rejets.....	64
5.2	Propriétés mécaniques.....	65
5.2.1	Indice de rupture .....	65
5.2.2	Bouffant .....	68
5.2.3	Résumé des propriétés mécaniques .....	70
5.3	Propriétés optiques.....	70
5.3.1	Blancheur.....	70
5.3.2	Coefficient de diffusion de la lumière .....	72
5.3.3	Résumé des propriétés optiques .....	73
5.4	Résultats comparatifs .....	74
5.4.1	Essais avec peroxyde d'hydrogène .....	74
5.4.2	Essais avec substitution du peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium .....	78
<b>Chapitre 6 - Conclusions .....</b>	<b>81</b>	
<b>Annexe A</b>	<b>Données expérimentales : pâtes de référence à 100%</b>	
épinette.....	88	
<b>Annexe B</b>	<b>Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir de</b>	
copeaux de pin gris traités .....	91	
<b>Annexe C</b>	<b>Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir de</b>	
copeaux de pin gris non traités.....	99	
<b>Annexe D</b>	<b>Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir de</b>	
copeaux de pin gris non traités avec substitution du peroxyde par le perborate de sodium.....	107	
<b>Bibliographie.....</b>	<b>110</b>	

## Liste des tableaux

Tableau 2-1	Propriétés comparatives de la PTM et de la PCTM de pin gris et [8].....	4
Tableau 2-2	Propriétés comparatives de la PTM de pin gris [11]. .....	5
Tableau 2-3	Propriétés comparatives de la pâte OPCO de pin gris [12].....	6
Tableau 2-4	Propriétés comparatives de la PTMPA de pin gris [1]. .....	7
Tableau 2-5	Conditions de traitement : Extraction à l'eau et au méthanol [5, 6]. .....	10
Tableau 2-6	Conditions de traitement : Extraction à la soude et au peroxyde alcalin [5, 6].....	11
Tableau 2-7	Conditions de traitement : Agents chimiques au premier stade de raffinage [5, 6].....	11
Tableau 2-8	Résultats comparatifs [6]. .....	12
Tableau 2-9	Pâte mécanique de raffineur de bois juvénile et de bois mature [25].....	14
Tableau 2-10	Caractéristiques physiques du pin gris et de l'épinette noire [9].....	14
Tableau 2-11	Caractéristiques chimiques du pin gris et de l'épinette noire [9].....	16
Tableau 2-12	Comparaison d'une PTM de pin gris et d'épinette noire [28] .....	17
Tableau 4-1	Plan expérimental: bloc 1.....	49
Tableau 5-1	Équations résultantes .....	56
Tableau 5-2	Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur.....	59
Tableau 5-3	Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais sans traitement des copeaux de pin gris et pour pâte à 100% épinette noire .....	60
Tableau 5-4	Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur.....	63
Tableau 5-5	Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais sans traitement des copeaux de pin gris et pour pâte à 100% épinette noire .....	63
Tableau 5-6	Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur.....	64
Tableau 5-7	Résultats comparatif entre la pâte témoin et un mélange pin gris – épinette noire .....	67

Tableau 5-8	Comparaison entre l'effet du perborate de sodium et l'effet du peroxyde d'hydrogène sur la blancheur de la pâte .....	71
Tableau 5-9	Comparaison entre l'effet du perborate de sodium et l'effet du peroxyde d'hydrogène sur le coefficient de diffusion de la lumière de la pâte .....	73
Tableau 5-10	Résultats sans traitement des copeaux de pin gris par extraction avant la mise en pâte PTM-PA en mélange avec l'épinette noire .....	75
Tableau 5-11	Résultats avec traitement des copeaux de pin gris par extraction avant la mise en pâte PTM-PA en mélange avec l'épinette noire .....	77
Tableau 5-12	Résultats comparatifs : Substitution du peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium.....	79
Tableau A-1	Pâte de référence : PTM d'épinette noire à 100% .....	89
Tableau A-2	Pâte de référence : PTM d'épinette noire à 100% (Reprise) .....	90
Tableau B-1	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 20% de pin gris et 0,5% de peroxyde alcalin.....	92
Tableau B-2	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 40% de pin gris et 0,5% de peroxyde alcalin.....	93
Tableau B-3	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 20% de pin gris et 2,5% de peroxyde alcalin.....	94
Tableau B-4	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 40% de pin gris et 2,5% de peroxyde alcalin.....	95
Tableau B-5	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin.....	96
Tableau B-6	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition).....	97
Tableau B-7	Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition).....	98
Tableau C-1	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 15,9% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin.....	100
Tableau C-2	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 44,1% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin.....	101
Tableau C-3	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 0% de peroxyde alcalin .....	102
Tableau C-4	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 2,9% de peroxyde alcalin.....	103
Tableau C-5	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin.....	104
Tableau C-6	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition).....	105

Tableau C-7	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition).....	106
Tableau D-1	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 4,4% de perborate de sodium (équivalent 1,5% peroxyde).....	108
Tableau D-2	Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 4,4% de perborate de sodium (équivalent 1,5% peroxyde).....	109

## Liste des figures

Figure 2-1	Opérations unitaires du procédé de mise en pâte.....	8
Figure 2-2	Opérations unitaires du procédé de mise en pâte utilisé dans la présente étude .....	17
Figure 3-1	Structure physique de la fibre de bois [].....	21
Figure 3-2	Structure physique de la fibre de bois, coupe transversale [] .....	22
Figure 3-3	Raffineur [] .....	26
Figure 4-1	Structure du CCD.....	46
Figure 4-2	Étapes du procédé de mise en pâte .....	47
Figure 5-1	Teneur en matières extractibles en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin.....	58
Figure 5-2	Énergie spécifique de raffinage en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin.....	61
Figure 5-3	Teneur en rejets fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin.....	64
Figure 5-4	Indice de rupture fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin .....	66
Figure 5-5	Fines en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin.....	67
Figure 5-6	Bouffant en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin .....	69
Figure 5-7	Blancheur en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin .....	71
Figure 5-8	Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin.....	72
Figure 5-9	Boucle d'itération pour solutionner les équations de régression.....	74

## Liste des abréviations

PTMPA	Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin
PTM-PA <sup>mc</sup>	
PTM	Pâte thermomécanique
PCTM	Pâte chimico thermomécanique
OPCO	Ontario paper company
PA	Peroxyde alcalin
CCD	Central composite design
DTPA	Diéthylènetriaminepentaacétate de sodium
EDTA	Acide Éthylènediaminetetraacétique

## Chapitre 1 - Introduction

### 1.1 Utilisation du pin gris (*Pinus banksiana Lamb.*) dans l'industrie des pâtes et papiers

Le pin gris a été étudié abondamment ces dernières années [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] et il semble que jusqu'à présent aucune solution finale n'a encore été découverte, ce qui en fait une espèce peu utilisée. C'est ce qui nous a poussé à étudier une facette du pin gris encore peu connue soit le comportement de ce dernier en mélange avec une espèce fortement utilisée dans l'industrie papetière, l'épinette noire.

Le pin gris compte pour 20% du volume de résineux. C'est une espèce désirable au niveau sylvicole puisque qu'il résiste très bien aux maladies et sa croissance est rapide. Toutefois, son taux d'utilisation pour la fabrication de la pâte à papier demeure très faible même si la disponibilité des espèces traditionnelles diminue.

La sous-utilisation du pin gris pose aussi un problème au secteur forestier. Cette espèce possède un taux de croissance rapide relativement à l'épinette noire (*Picea mariana*). De plus, c'est une espèce résistante aux maladies, ce qui fait du pin gris une espèce privilégiée en sylviculture. La population de pin gris au Canada est mature ou sur-mature. Afin d'exploiter efficacement la forêt canadienne, le taux d'utilisation de cette espèce devra être augmenté.

Plusieurs caractéristiques du pin gris empêchent son utilisation dans le secteur papetier. La haute teneur en matières extractibles cause des problèmes de poix sur les machines à papier, pouvant occasionner des problèmes de formation et des casses plus fréquentes.

Le pin gris nécessite de 25 à 50% plus d'énergie de raffinage que l'épinette noire pour arriver à un indice d'égouttage donné. Il est donc apparent que l'utilisation du pin gris dans un procédé de mise en pâte thermomécanique n'est pas une bonne affaire. En plus d'une demande énergétique accrue, les pâtes thermomécaniques de pin gris produisent un papier ayant des propriétés mécaniques de l'ordre de 35% plus faible.

Dans la mise en pâte mécanique, l'utilisation du pin gris est habituellement limitée à 20% ou moins [8] en terme de proportion de copeaux. Au cours de la dernière décennie, la disponibilité économique des espèces traditionnelles comme l'épinette et le sapin n'a cessé de décroître. Les papetiers doivent envisager de plus en plus avoir recours à des copeaux comme le pin gris dans leur production.

Évidemment, les coûts associés sont très importants. La haute énergie spécifique de raffinage, le nettoyage des rouleaux et des feutres augmentent les coûts de production. Les casses et problèmes de formation sur la machine à papier diminuent la productivité. Les propriétés mécaniques faibles obligent le papetier à utiliser plus de pâte chimique dans la recette afin de répondre aux spécifications des clients.

Depuis trente ans, on a tenté d'accroître l'utilisation du pin gris, particulièrement dans le procédé au sulfite qui n'est pratiquement plus utilisé de nos jours [9]. Ces dernières années, beaucoup de travaux [1, 2, 3, 4, 5, 6] ont été réalisés afin de surmonter les problèmes associés au pin gris dans la mise en pâte à haut rendement dont la haute teneur en matières extractibles, la forte consommation d'énergie électrique et ces faibles propriétés mécaniques.

## Chapitre 2 - Problématique et objectifs de l'étude

De façon générale, les espèces de pin sont problématiques pour le papetier, surtout dans le cas d'une production de pâte mécanique. La paroi épaisse de la cellule, la haute teneur en matières extractibles et la faible blancheur de la matière première est à la source de cette mauvaise réputation.

### 2.1 Travaux antérieurs

Dans le passé, les études menées sur les espèces de pin démontrent bien cette problématique.

Le pin gris ne fait pas exception. Pour ces raisons plusieurs études ont été menées ces dernières années [1, 2, 3, 4, 5, 6] afin de trouver une solution qui adoucirait les effets associés à la mise en pâte mécanique de pin gris. Ces études ont exploré la mise en pâte au peroxyde alcalin du pin gris avec un certain succès. Ces travaux sont à la base de notre étude, qui consiste à utiliser les résultats des études antérieures et les appliquer sur l'utilisation du pin gris en mélange avec l'épinette noire de façon à combler la faiblesse de certaines propriétés lorsque la mise se fait à partir d'un mélange à 100% pin gris.

Nombreux sont ceux qui se sont penchés sur les difficultés associées au pin gris. Munster [10] fut un des premiers à utiliser le pin gris dans la mise en pâte au peroxyde alcalin. Il montra que le procédé Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin (PTMPA) pouvait produire une pâte intéressante à partir de pin gris. Une PTMPA de cette espèce de pin possédait un allongement à la rupture, un indice d'éclatement, une densité de la feuille plus grande et une teneur en matières extractibles plus faible en comparaison à une pâte chimico-thermomécanique(PCTM) ou une pâte thermomécanique(PTM) correspondante. Par contre, le coefficient de diffusion de la lumière était plus faible et le niveau de bûchettes était plus important dans le cas de la PTMPA. Il démontra que la

teneur en matières extractibles pouvait être contrôlée de façon efficace avec le peroxyde alcalin pour déloger les résines avec une étape de lavage interstade.

Laliberté et al. [8] ont fait des essais sur les mélanges de pin gris et d'épinette. Le bois utilisé provenait en majorité de bois d'aubier. Pour cette raison, le contenu en matières extractibles des deux espèces était similaire.

Parce que le bois de pin gris provenait principalement de l'aubier, ils obtinrent des niveaux de blancheur plus élevés de 3,8 points dans le cas du PTM de pin gris et de 2,4 points pour ce qui est du PCTM de pin gris.

Le tableau 2-1 représente les résultats obtenus avec des pâtes d'espèce unique (pin gris) à 150 mL d'indice d'égouttage.

**Tableau 2-1 Propriétés comparatives de la PTM et de la PCTM de pin gris et [8].**

Essence	Pin gris		Épinette noire	
	PTM	PCTM	PTM	PCTM
Indice d'égouttage, mL	150	150	150	150
Énergie spécifique, MJ/kg	11,2	12,3	9,7	10,4
Longueur de rupture, km	3,5	3,9	3,7	4,5
Indice d'éclatement, kPa*m <sup>2</sup> /g	2,2	2,3	2,3	2,8
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	9,1	9,7	8,8	9,6
Blancheur, % ISO	57,1	61,9	53,3	59,5
Opacité, %	92,5	88,3	94,3	90,6

La présence de pin diminue la longueur de rupture ainsi que la résistance à l'éclatement alors qu'une sulfonation accroît les propriétés mécaniques (indice d'éclatement, indice de déchirure mais réduit l'opacité).

Les résultats obtenus ont démontré qu'il était possible d'incorporer jusqu'à 20% de pin gris sans augmenter l'énergie spécifique.

Jossart et al. [11] ont comparé les pâtes thermomécaniques de pin gris et d'épinette sur une gamme d'énergie spécifique de raffinage et d'indice d'égouttage. Ils s'aperçurent que les propriétés des pâtes de pin gris étaient inférieures à celles d'épinette noire à énergie spécifique de raffinage égale. Afin d'obtenir une pâte de pin gris d'indice d'égouttage comparable on devait appliquer 25 à 50% plus d'énergie.

Au tableau 2-2, on remarque qu'à l'exception de l'indice de déchirure, toutes les propriétés mécaniques de la pâte de pin gris étaient approximativement 35% plus faible pour les indices d'égouttage étudiés. On observe aussi que, malgré la haute teneur en matières extractibles du pin gris, la blancheur de la pâte d'épinette est légèrement supérieure.

**Tableau 2-2 Propriétés comparatives de la PTM de pin gris [11].**

	PTM	PTM
Indice d'égouttage, mL	150	150
Énergie spécifique, MJ/kg	11,1	8,55
Longueur de rupture, km	3,46	3,69
Indice d'éclatement, kPa*m <sup>2</sup> /g	1,85	2,25
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	10,04	12,60
Blancheur, % ISO	55,9	58,2
Opacité, %	94,2	94,2

Le tableau 2-3 contient les résultats d'une étude de Barbe et al.[12] qui ont comparé les propriétés des pâtes de pin gris PCTM et ayant subies un traitement interstade (pâte OPCO<sup>R</sup>) utilisant différentes charges de sulfite de sodium et différentes énergie spécifiques de raffinage sur deux stades de raffinage. Les pâtes avec traitement inter - stade, requièrent 25 à 30% moins d'énergie de raffinage pour un indice d'égouttage donné comparativement aux pâtes PCTM de pin gris. Ils ont démontré que ce type de pâte (OPCO<sup>R</sup>) peut être produit avec le même niveau d'énergie qu'une pâte thermomécanique d'épinette tout en conservant des caractéristiques similaires.

**Tableau 2-3 Propriétés comparatives de la pâte OPCO de pin gris [12].**

Espèce	Pin Gris			Épinette noire
Type de pâte	PTM	PCTM	OPCO	PTM
Indice d'égouttage, mL	150	150	150	150
Énergie spécifique, MJ/kg	10,1	10,9	8,50	9,11
Longueur de rupture, km	2,40	3,76	3,75	3,89
Indice d'éclatement, kPa*m <sup>2</sup> /g	1,60	1,87	2,07	2,63
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	7,57	9,53	8,14	9,56
Blancheur, % ISO	47,5	52,5	47,9	53,6
Opacité, %	97,3	94,0	95,2	96,2

Law et al. [9] ont fait le point sur l'utilisation du pin gris dans l'industrie papetière. Ils pointèrent la morphologie de la fibre ainsi que la haute teneur en extractibles comme la source des problèmes reliés au blanchiment et à la mise en pâte du pin gris. Gagné et al. [13] ont fait remarqué que les pâtes mécaniques de pin gris peuvent être blanchies efficacement par le biais du peroxyde d'hydrogène, procurant un gain de blancheur plus élevé ainsi qu'une plus faible teinte jaunâtre en comparaison à l'hydrosulfite. Redmond et al.[14] ont démontré que la réversion de couleur de la pâte de pin gris était due à la présence de flavonone pinobanksin. La grossièreté des fibres augmente la demande énergétique et réduit la capacité à créer des liens interfibre.

À ce moment, les raisons fondamentales de la faible utilisation du pin gris se résument à la structure grossière des fibres et à la quantité et la qualité de ses extractibles. L'abondance de matières extractibles causant la réversion de blancheur en surplus des problèmes de poix sur les machines à papier [14, 15, 16, 17]. Tyrväinen et al. [1, 2], suite à une étude en deux volets ont montré que le traitement au peroxyde alcalin (PA) ne parvenait pas améliorer les propriétés mécaniques du pin gris pour une énergie spécifique donnée, alors qu'il en était tout autrement pour l'épinette noire. En se référant au tableau 2-4, on remarque qu'un gain de 10 points de blancheur peut être atteint avec le traitement inter - stade au détriment du coefficient de diffusion de la lumière.

Ils utilisèrent la technologie de la pâte mécanique au peroxyde alcalin (PMPA) pour produire dans le premier stade de raffinage une pâte thermomécanique de

faible énergie et d'indice d'égouttage élevé afin de prévenir le sectionnement excessif des fibres dans la phase de défibrage en plus de réduire la consommation d'énergie. Le traitement chimique entre les stades de raffinage (blanchiment interstade) réduit la teneur en extractibles du pin gris à un niveau acceptable, réduit la coloration jaune, assoupli la paroi de la cellule et réduit la consommation d'énergie spécifique.

Tableau 2-4 Propriétés comparatives de la PTMPA de pin gris [1].

Espèce	Pin Gris		Épinette noire	
Type de pâte	PTM	PTMPA	PTM	PTMPA
Indice d'égouttage, mL	200	200	200	200
Énergie spécifique, MJ/kg	8,28	6,30	7,01	7,72
Indice de rupture, mN/g	26,9	18,5	36,0	45,8
Indice d'éclatement, kPa*m <sup>2</sup> /g	1,23	0,76	1,92	2,50
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	6,1	4,5	8,6	10,2
Blancheur, % ISO	52	62,1	51,8	64,6
Opacité, %	96,8	87,0	96,8	87,7
Coefficient de diffusion de la lumière, m <sup>2</sup> /kg	59,3	44,0	58,6	47,2

Ils ont remarqué que l'épinette noire répondait généralement mieux aux traitements interstade au peroxyde alcalin. Dans le cas du pin gris, des réductions de l'ordre de 95% du contenu en extractibles furent atteintes et on remarqua une légère diminution de la coloration jaune.

La pâte à faible énergie spécifique de raffinage obtenue ne contenait que peu d'extractibles mais ce procédé de mise en pâte produit un sectionnement excessif des fibres, il en résulte des propriétés mécaniques faibles comparativement à l'épinette noire.

Une des conclusions de ces travaux consistait à optimiser les conditions du procédé de mise en pâte du pin gris afin de prévenir le sectionnement des fibres et les conséquences associées.

Lanouette et al. [3] utilisèrent un modèle de type D-Optimal afin de d'optimiser le processus complexe du traitement chimique interstade du pin gris. Ils ont considéré 7 variables connues pour leur influence sur le procédé pour cette étude. Les étapes du procédé utilisé sont exposées à la figure 2-1.

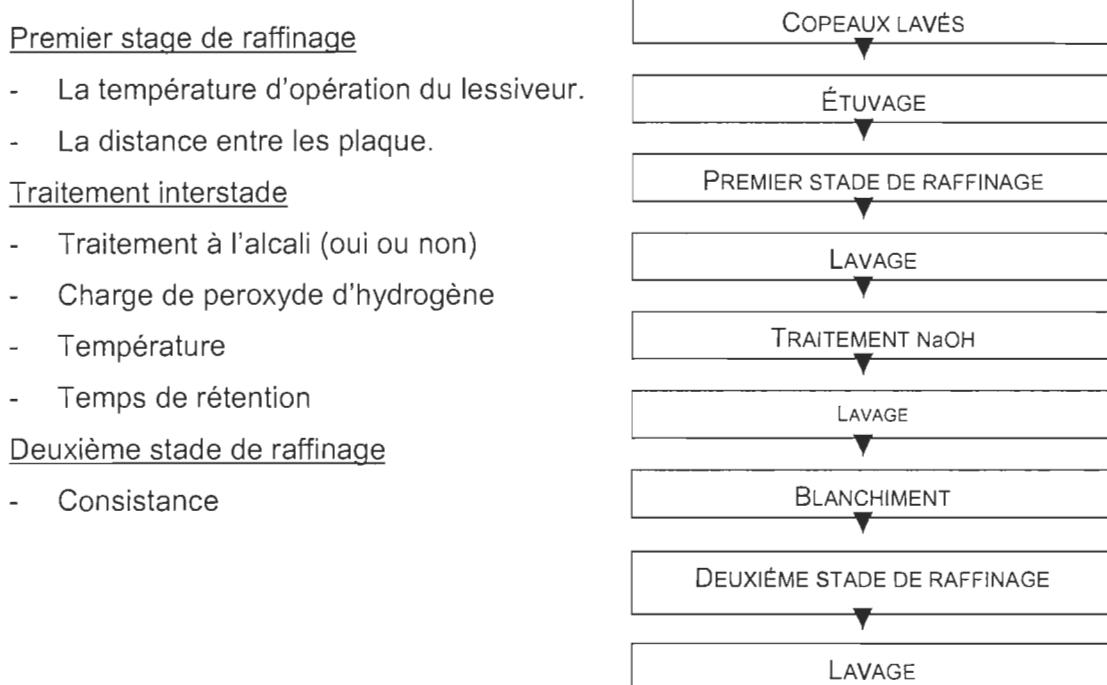


Figure 2-1 Opérations unitaires du procédé de mise en pâte.

Les conclusions qui ressortent de cette étude sont :

- La température au premier stage doit rester basse ( $115^{\circ}\text{C}$ )
- Une faible distance entre les plaques au premier stade permet d'augmenter la longueur des fibres et améliore les propriétés physiques sans affecter la consommation d'énergie.
- Une haute consistance au deuxième stade de raffinage permet le développement de meilleures caractéristiques de la fibre ainsi que de meilleures propriétés physiques. Par contre cela se produit au détriment d'une hausse de la consommation d'énergie spécifique.

- Le traitement à l'hydroxyde de sodium améliore les propriétés de liaison de façon marquée sans affecter la résistance à la déchirure. Un sacrifice de 4,6 points de blancheur ISO est observé.

La direction adoptée par Lanouette et al.[4] mettait l'emphase sur les traitements interstade au peroxyde alcalin afin d'obtenir une qualité de pâte intéressante.

Ils conclurent que le traitement interstade au peroxyde alcalin n'est pas approprié pour réduire la consommation d'énergie et que ce n'est pas la meilleure alternative pour améliorer les propriétés mécaniques. Les résultats de ces travaux [4] ont montré que l'imprégnation en deux stades et l'addition du peroxyde dans l'œil du raffineur étaient des avenues intéressantes.

L'imprégnation à deux stades à 115 °C avec de 3,5% de peroxyde d'hydrogène pour une période de 5 minutes diminua la consommation d'énergie spécifique sous la consommation requise par une pâte thermomécanique d'épinette noire tout en atteignant des propriétés physiques comparables à celles d'une pâte PTMPA d'épinette. Malheureusement la blancheur résultante est relativement faible comparativement à la valeur initiale.

L'addition de peroxyde d'hydrogène directement dans l'œil du raffineur procure sensiblement les mêmes résultats avec une légère diminution des propriétés mécaniques comparativement aux pâtes thermomécaniques de pin gris avec traitements interstade au peroxyde alcalin. Cette dernière avenue est particulièrement intéressante puisqu'elle ne demande aucun équipement spécial. Dans ces deux derniers cas, le niveau d'extractibles est à un niveau acceptable pour les équipements entrant dans la fabrication du papier.

Donc, tous les procédés au peroxyde alcalin ont démontré qu'il est possible d'atteindre ou de dépasser les propriétés mécaniques d'une pâte d'épinette noire en utilisant des copeaux de pin gris comme approvisionnement.

Les procédés retenus par ordre d'importance sont :

- 1- Procédés d'imprégnation à un et deux stades
  - Blancheur très faible en raison du long séjour à haute température, favorisant la dégradation du peroxyde, laissant l'hydroxyde de sodium sur place causant le noircissement de la pâte.
- 2- Procédé utilisant l'injection de liqueur de blanchiment au raffineur
- 3- Traitement interstade

Il est démontré que le raffinage en un stade demande plus d'énergie que le raffinage en deux stades.

Lanouette et al. [5, 6] ont également étudié l'effet de différentes solutions de trempage. Les copeaux tremment dans une solution (tableaux 2-5 à 2-7) pour une période de 15 minutes. Ils sont ensuite compressés pour enlever les extractibles avant un premier stade de raffinage.

Le tableau 2-5 contient les essais effectués par Lanouette et al. [5, 6] où un traitement à l'eau et/ou méthanol est utilisé. Le tableau 2-6 contient les essais où un traitement au peroxyde alcalin ou à la soude est utilisé. On y retrouve les conditions du trempage pour les différents essais en plus des températures du premier stade de raffinage. Au tableau 2-7, on voit les charges de produits chimiques utilisés lors du premier stade de raffinage.

**Tableau 2-5    Conditions de traitement : Extraction à l'eau et au méthanol [5, 6].**

	Température du raffinage 1 <sup>er</sup> stade, °C	Charge, % sur la solution		Charge, % sur le bois
Étapes d'extraction		Eau	MeOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
Essai #1	115	100		
Essai #5	115	75	25	
Essai #7	100	100		
Essai #10	115	100		

**Tableau 2-6    Conditions de traitement : Extraction à la soude et au peroxyde alcalin [5, 6].**

Étapes d'extraction	Température du raffinage 1 <sup>er</sup> stade, °C	Charge, % sur le bois			
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	NaOH	Stabilisants H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
Essai #2	115		1,5		
Essai #3	115		1,5		2
Essai #4	115	1,0	1,16	Oui	
Essai #6	115		4		
Essai #8	100		1,5		
Essai #9	100	1,0	1,16	Oui	

**Tableau 2-7    Conditions de traitement : Agents chimiques au premier stade de raffinage [5, 6].**

Étapes suivant l'extraction	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	NaOH	Stabilisants H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	DTPA
Imprégnateur				0,2
Blanchiment au raffineur	3,0	3,0	Non	0,05
Post Blanchiment	5,0	4,25 (alcali total)	3% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
			0,05% MgSO <sub>4</sub>	
			0,25% DTPA	

Ces différentes solutions de trempage (tableaux 2-5 et 2-6) ont été mises à l'essai suivi d'un raffinage PTM au cours duquel la liqueur de blanchiment est injectée directement dans l'œil du raffineur en même temps que l'eau de dilution en accord avec l'étude précédente de Lanouette et al. [5]. Le but de ce trempage tôt dans le procédé est de favoriser le développement des propriétés de surfaces des fibres.

Le tableau 2-8 contient les résultats retenus par Lanouette et al. [6] et comparés à une pâte commerciale. Deux essais sont retenus. L'essai #4 est le résultat d'une extraction au peroxyde alcalin alors que l'essai #5 provient de copeaux ayant subit une extraction à l'eau et au méthanol dans des proportions respectives de 75% et 25%. On remarque que les solutions alcalines ont des effets nocifs sur la blancheur des pâtes.

Tableau 2-8 Résultats comparatifs [6].

Propriétés	PTM-PA Essai #4	PTM-PA Essai #5	Pâte Commerciale A
Indice d'égouttage, mL	200	200	133
Énergie spécifique, MJ/kg	9,43	8,40	
Indice de rupture, mN/g	43,8	40,9	46,5
Indice d'éclatement, kPa*m <sup>2</sup> /g	2,43	2,19	2,64
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	10,6	10,6	8,75
Blancheur ISO, %	65,1	60,0	62,8
Opacité, %	87,4	90,5	93,3
Coefficient de diffusion de la lumière, m <sup>2</sup> /kg	45,6	48,6	54,9

Leur étude démontre les effets nocifs des solutions alcalines sur la blancheur des pâtes. Ils n'arrivaient pas à maintenir un niveau de blancheur acceptable pour la production de papier journal (60-65% ISO) lors des essais où la solution de trempage ne contenait que de l'hydroxyde de sodium (essais #2, 3, 6 et 9). On y remarque aussi l'importance du peroxyde dans le maintien d'un niveau de blancheur acceptable (essai #4).

Les travaux de Lanouette et al. [6] montrent qu'il est possible d'éliminer au moins 90% du contenu en matières extractibles. Cette diminution pourrait être amélioré en employant un taux de compression de 4 :1 ou plus élevé à la vis de compression au lieu de 2 :1 [18].

Lanouette et al. [6] ont montré la nécessité d'optimiser le procédé en répartissant les réactifs sur les trois étapes du procédé afin de minimiser la quantité de peroxyde consommé qui s'élevait à 4% sans le post blanchiment, de même que l'énergie spécifique requise.

Bien que ces pâtes soient acceptables du point de vue des propriétés mécaniques et de l'énergie spécifique, le coefficient de diffusion de la lumière demeure très bas.

## 2.2 Structure chimique et morphologie du pin gris

Pour une espèce donnée, des facteurs comme l'âge, le site et le climat affectent nombre de propriétés comme le ratio bois de cœur – bois d'aubier, la densité, la distribution d'humidité et la quantité de matières extractibles et leur distribution.

### 2.2.1 Structure morphologique

Il y a une diminution graduelle du volume de bois de cœur en suivant l'élévation dans l'arbre, ce qui n'est pas surprenant. Il est par contre étonnant de constater qu'à des niveaux de 60 pi, le bois de cœur est toujours présent, de même que dans les branches. Le bois de cœur représente 36% du volume du tronc de cette espèce.

Le pin gris a une densité légèrement supérieure à celle de l'épinette noire en raison de la paroi de la fibre plus épaisse. Le pourcentage de bois d'été est plus grand [19, 20, 21]. Ces propriétés contribuent à la plus grande rigidité des fibres, rendant le développement de propriétés mécanique plus ardu. Ces propriétés contribuent aussi à la plus grande résistance mécanique du bois de pin gris [22] comparativement à l'épinette noire.

Sinclair et Dymond [23] ont montré que les arbres plus jeunes, plus petit, contiennent moins d'extractibles que les spécimens plus âgés, ce qui montre l'importance d'un programme de récolte cyclique.

Corson [24] a constaté que l'âge du bois est l'élément qui influe le plus sur les propriétés de la pâte. On attribue ce fait à la longueur des trachéides qui augmentent avec l'âge du bois. Il note que la plus vielle partie d'un arbre produit une pâte résistante mais dont les propriétés optiques sont faibles et consomme plus d'énergie comparativement à la partie la plus jeune de l'arbre.

À l'inverse de Corson, Hatton [25] conclue que le bois juvénile consommait plus d'énergie que le bois mature en raison de la souplesse des fibres, les rendant

plus aptes à absorber l'énergie de raffinage. La finesse des fibres fait en sorte qu'il y a plus de fibres dans une tonne de pâte de bois juvénile qu'il en existe dans une tonne de bois mature. Les propriétés de diffusion de la lumière sont supérieures avec le bois juvénile (Tableau 2-9).

**Tableau 2-9 Pâte mécanique de raffineur de bois juvénile et de bois mature [25]**

Espèce de bois	Pin gris	
Type de bois	Juvénile	Mature
Énergie spécifique, MJ/kg	12,4	11,5
Longueur de fibre, mm	1,76	2,02
Indice de déchirure, mNm <sup>2</sup> /g	5,9	6,8
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	59,8	54,2

Dans l'étude de Law et al. [9] sur le statut de l'utilisation du pin gris dans l'industrie papetière on retrouve un résumé complet des caractéristiques physiques du pin gris et de l'épinette noire (Tableau 2-10).

**Tableau 2-10 Caractéristiques physiques du pin gris et de l'épinette noire [9]**

	Pin gris	Épinette noire	Référence
Couleur			
Bois d'aubier	Blanc	Blanc	[19]
Duramen	Teinte rougeâtre	Blanc jaunâtre	[19]
Blancheur du bois, %	40,4	42,3	[26]
Densité (o.d.), g/cm <sup>3</sup>	0,46	0,45	[19]
Zone de bois d'été	Large	Étroite	[21]
Canaux résinifères	Présents	Présents	[21]
Thyloïde	Duramen	Duramen	[21]
Trachéïdes			
Longueur, mm	3,5	3,5	[19]
Diamètre, µm	28-40	25-30	[19]
Grossièreté, mg/100m	18,0	15,8	[19, 20]
Épaisseur de la paroi, µm			
Bois de printemps	—	1	[19]
Bois d'été	—	3,5	[19]
Bois de printemps (calculé)	5,5	4,6	[20]
Bois d'été (calculé)	9,7	6,9	[20]
Ratio de flexibilité			

Bois de printemps	0,77	0,82	[20]
Bois d'été	0,39	0,51	[20]
Coefficient de rigidité			
Bois de printemps	1,2	1,1	[20]
Bois d'été	3,2	2,9	[20]
Résistance au cisaillement, lb/po <sup>2</sup> (// au grain)	840	790	[22]
Résistance au clivage, lb/po	200	180	[22]
Résistance en tension, lb/po <sup>2</sup> (⊥ au grain)	350	320	[22]

Les caractéristiques du bois jouent un rôle primordial dans la détermination de la qualité de la pâte. On s'attend à obtenir des propriétés mécaniques plus faibles avec l'ajout d'une proportion plus importante de pin gris dans le mélange pour les raisons suivantes :

- La densité du bois est inversement proportionnelle à la densité de la feuille ainsi qu'aux propriétés d'adhésion inter fibres, un point particulièrement important dans cette étude.
- Le pin gris est réputé pour la paroi épaisse de ses fibres comparativement à l'épinette noire. Les propriétés mécaniques du papier provenant de cette espèce comme l'allongement à la rupture ou la résistance à l'éclatement sont normalement plus faibles.
- Les fibres de pin gris avec leur paroi épaisse résistent moins bien aux forces de compression et de cisaillement induites par le raffinage [7]. Il est plus difficile de développer les propriétés d'adhésion de la fibre.

### 2.2.2 Structure chimique

Le tableau 2-11 montre les caractéristiques chimiques du pin gris et de l'épinette noire. Les principales composantes du bois de pin gris et d'épinette noire (hémicellulose, cellulose et lignine) sont très similaires. Cette différence entre ces composantes ne pose pas de problèmes dans un procédé de mise en pâte

[19, 27]. La plus grande distinction entre le pin gris et l'épinette noire est que la solubilité du pin gris dans les solvants organiques est plus élevée. Dans les matières extractibles du pin gris, on trouve la flavanone pinobanksin qui a été identifiée comme étant la source majeure de coloration jaune de la pâte de pin gris [14]. Il a été démontré que la couleur jaune des pâtes de pin gris est fonction du bois de cœur uniquement et que les pâtes produites à partir de bois d'aubier donnent des pâtes de blancheur équivalente ou plus élevée que les pâtes d'épinettes.

Selon Hatton [25], le pourcentage de lignine du pin gris est sensiblement le même dans le bois mature et le bois juvénile (20 ans ou moins). On note aussi que le niveau d'extractibles est plus faible dans le bois mature que dans le bois juvénile.

**Tableau 2-11 Caractéristiques chimiques du pin gris et de l'épinette noire [9]**

	Pin gris	Épinette noire	Références
Lignine, %	27,6	26,9	[27]
Pentosanes, %	10,6	8,9	[27]
Holocellulose, %	69,7	73,3	[27]
Cellulose Cross-Bevan, %	59,5	57,2	[27, 26]
Solubilité dans, %			
Eau froide	1,7	1,3 – 2,5	[27]
Eau chaude	2,8	2,5 – 4	[27]
NaOH 1%	12,7	13 – 15	[27]
Alcool-benzène	2,9	2,2	[27]
Éther	1,58	0,47	[20]
Méthanol	3,01	1,57	[20]
Acétone	8,1	—	[23]
Cendres, %	0,16	0,22	[27]

### 2.3 Propriétés comparatives des pâtes de pin gris et d'épinette

Dans le tableau 2-12, Leask [28] présente les caractéristiques d'une pâte thermomécanique de diverses espèces.

Tableau 2-12 Comparaison d'une PTM de pin gris et d'épinette noire [28]

	Épinette noire ( <i>Picea mariana</i> )	Pin gris ( <i>Pinus banksiana lamb.</i> )
Énergie spécifique, MJ/kg	6,1	6,5
Indice d'égouttage, ml	99	104
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	9	11
Longueur de rupture, km	5,4	3,9
Blancheur ISO, %	59	59
Opacité, %	96	94

## 2.4 Objectif de la recherche

L'objectif de la recherche est d'approfondir nos connaissances sur le comportement du pin gris soumis à une charge de peroxyde alcalin en mélange avec l'épinette noire. Les études précédentes nous portent à croire que le pin gris pourrait être efficacement utilisé dans un tel procédé.

À la figure Figure 2-2, un schéma montre les étapes du procédé utilisé pour cette étude. Afin de limiter la chute du coefficient de diffusion de la lumière, on omet de tremper les copeaux d'épinette noire dans la solution de trempage.

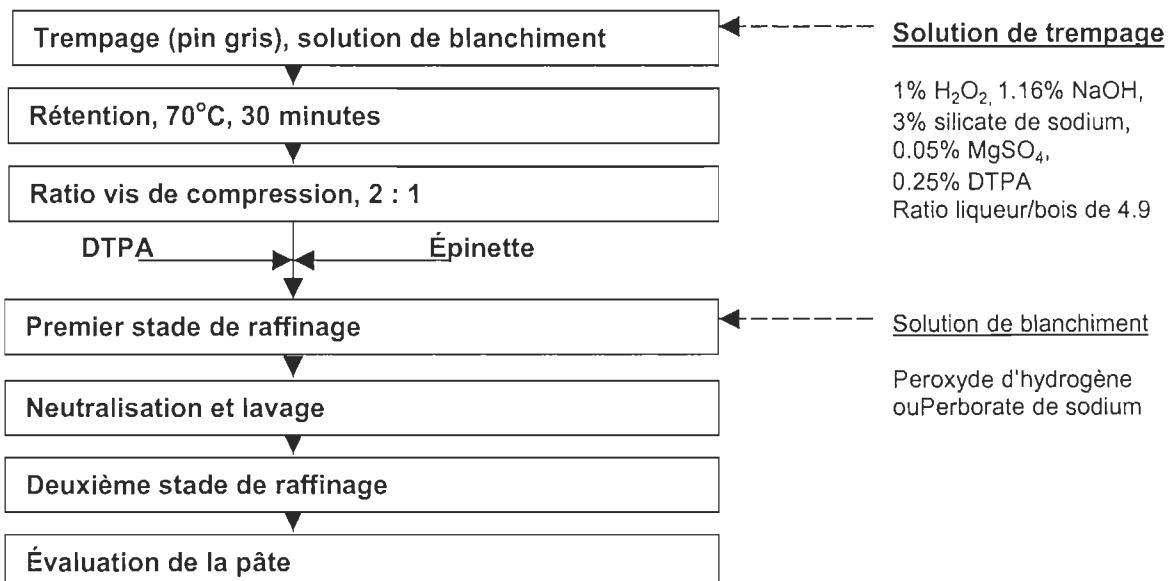


Figure 2-2 Opérations unitaires du procédé de mise en pâte utilisé dans la présente étude

À la fin de cette étude, on souhaite pouvoir :

- Caractériser une pâte à haut rendement de pin gris-épinette noire
  - En fonction de la charge de peroxyde au blanchiment
  - En fonction du pourcentage de pin gris dans le mélange
- Évaluer l'effet du trempage des copeaux de pin gris sur la mise en pâte PTMPA du mélange des deux espèces
- Être en mesure de comparer efficacement le peroxyde alcalin et le perborate de sodium comme agent de blanchiment.

## Chapitre 3 - Théorie

### 3.1 Caractéristique de la matière fibreuse

La matière première idéale pour la fabrication de pâte mécanique doit être défibrée à de faibles coûts, c'est-à-dire à faible énergie de raffinage, tout en procurant les propriétés souhaitées. Comme le papier est essentiellement fait de fibre de bois, on doit s'attendre à ce que ses propriétés dépendent fortement de la matière fibreuse.

La composition chimique du bois affecte directement les propriétés de la pâte, plus spécifiquement, la blancheur et la stabilité du procédé due au problème de poix. Le bois n'est pas un matériau homogène, les propriétés physiologiques des fibres dépendent, pour une même espèce, de la situation géographique du sujet et de la position de cette dernière dans l'arbre.

La chimie du bois du pin gris est complexe principalement en raison du contenu en matières extractibles.

#### 3.1.1 Bois juvénile

Chez les résineux, il est situé au pourtour du duramen là où les fibres n'ont pas atteint leur pleine maturation. C'est une zone où plusieurs propriétés changent du duramen au cambium de façon très rapide près du cœur.

Hatton et Hunt [29] ont étudié les propriétés chimiques du bois juvénile et mature de pin gris. On y apprend que la densité et l'humidité sont supérieures dans le bois mature alors que la teneur en matières extractibles était plus faible.

### 3.1.2 Bois de cœur

Dans la plupart des conifères, la formation de bois de cœur est généralement accompagnée par l'accumulation de matières extractibles. Les effets du bois de cœur sur la mise en pâte mécanique proviennent en grande partie de la différence au niveau du contenu en matières extractibles et de la teneur en humidité entre le bois d'aubier et le bois de cœur. Les caractéristiques sont fortement dépendantes de l'espèce de bois.

Dans les bois résineux, la forme et la structure des trachéides varient distinctement selon les saisons, le bois d'été et bois de printemps. Le bois de printemps possède un mur cellulaire plus mince que celui du bois d'été, de plus, l'épaisseur de la paroi de la fibre dans la direction radiale est plus importante. Il va sans dire que les fibres de bois de printemps sont de loin plus facile à déformer par compression.

### 3.1.3 La structure en couches de la fibre

Les fibres de bois résineux sont constituées de quatre couches soit les parois P, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> en plus d'une lamelle mitoyenne agissant comme un ciment liant les fibres les unes aux autres (figure 3-1). Il est important de comprendre les propriétés chimiques et mécaniques de chacune de ces couches afin réussir à séparer les trachéides de la matrice. Les trachéides sont d'autant plus intéressante pour le papetier dans la mesure où elles sont peu abîmées et offrent de bonnes propriétés de liaison interfibres.

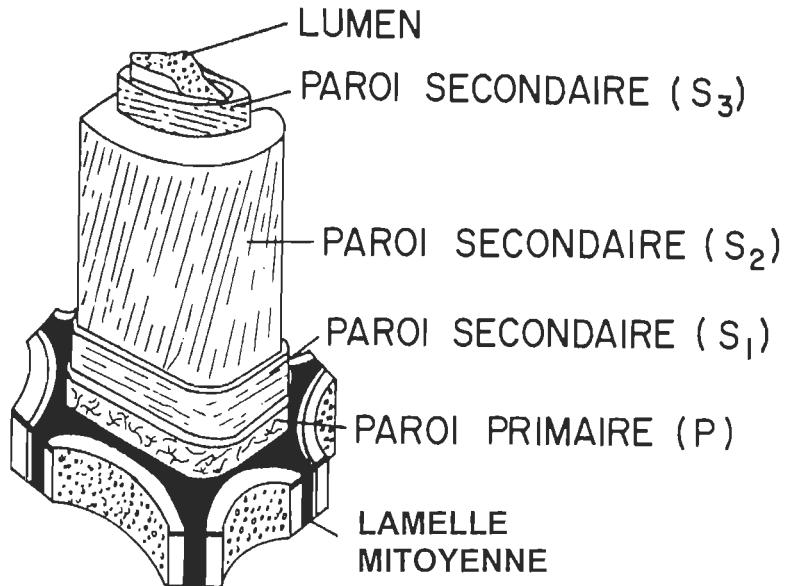


Figure 3-1 Structure physique de la fibre de bois [30]

Le bois est principalement constitué de trois polymères :

- La cellulose qui est une macro molécule linéaire en grande partie cristalline
- Les hémicelluloses, molécules linéaires et amorphes
- Un polymère amorphe et réticulé, la lignine.

### 3.2 Procédé de mise en pâte mécanique

Dans la mise en pâte mécanique, on soumet le bois (matière fibreuse) à des forces de différentes amplitudes et de durée variable lesquelles déformant les fibres afin de développer leurs propriétés papetière. Étant donné que le bois est un polymère naturel viscoélastique, le traitement mécanique de ce dernier sera grandement affecté par :

- Température
- Teneur en humidité
- Temps de séjour

Deux opérations sont particulièrement importantes :

### 1- La séparation des fibres

La séparation des fibres est essentielle étant donné qu'elle détermine le caractère des fibres obtenues. Si la température est trop élevée, il devient difficile de traiter subséquemment les fibres afin de développer leurs propriétés de cohésion. La position à laquelle la fracture se produit dépend des différents caractères des couches qui composent la fibre. À températures trop basses où la lignine est dans un état rigide, les fractures ont lieu de façon incontrôlée, entraînant une plus grande quantité de fibres brisées et une haute teneur en fines.

Lorsque la température d'opération est plus élevée, la zone de fracture se déplace vers la couche  $S_1$  et la paroi primaire et ainsi, une fibre plus longue est obtenue. En ajoutant un traitement chimique, la température de ramollissement de la lignine est abaissée, rendant possible l'amélioration de la séparation des fibres (figure 3-2).

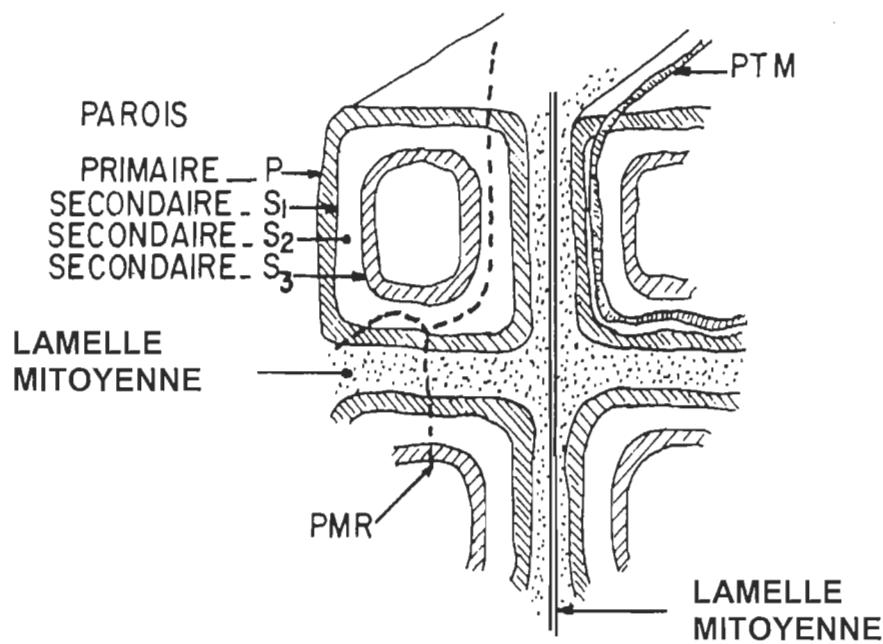


Figure 3-2 Structure physique de la fibre de bois, coupe transversale [31]

## 2- Traitement subséquent afin de développer la flexibilité des fibres.

Le traitement mécanique des fibres séparées est une étape essentielle si l'on désire développer la flexibilité des fibres. La création de fissures lamellaires dans la paroi cellulaire ainsi que la déduction du périmètre extérieur par délamination des couches externes accomplit l'assouplissement [32, 33, 34].

Une forme importante de transfert d'énergie dans les raffineurs conventionnels est le choc des fibres et des amas de fibres par les barres du raffineur.

Les effets principaux du battage sur les fibres individuelles peuvent être divisés comme suit :

- Enlèvement de la paroi primaire ainsi que la première couche de la paroi secondaire.
- Fibrillation interne.
- Fibrillation externe.
- Sectionnement de la fibre.

La paroi primaire est normalement enlevée dès le début du raffinage. Cette paroi primaire empêche la fibre de se ramollir et elle ne permet pas de former des liens efficaces avec les autres fibres.

L'enlèvement de la paroi primaire et d'une partie de la couche  $S_1$  de la paroi secondaire est très important puisqu'elle crée les conditions nécessaires afin qu'un raffinage subséquent développe les liens inter-fibres.

### Fibrillation interne

Relâchement de la structure interne de la fibre. La fibrillation interne rend la fibre souple et flexible de façon à ce qu'elle s'adapte les unes aux autres lors de la formation du matelas fibreux.

### Fibrillation externe

Réfère aux changements de la structure externe de la fibre. Cela peut être représenté comme l'enlèvement partiel de microfibrilles, lesquelles donnent un aspect « poilu » à la fibre. La fibrillation externe des fibres augmente la surface de la fibre et du même coup, la capacité de la fibre à créer des liens avec d'autres fibres est augmentée.

Dans un procédé de mise en pâte mécanique on doit rechercher les caractéristiques suivantes :

- Une bonne séparation des fibres.
- La conservation de la longueur des fibres.
- La délamination des fibres (fibrillation interne)
- Une grande quantité de fines possédant des caractéristiques intéressantes de liaison et de diffusion de la lumière produites par la lamelle mitoyenne et les parois primaire et secondaire.
- Une paroi secondaire bien fibrillée (liaison interfibre)

Afin que tous ces processus aient lieu simultanément, la désintégration de la fibre doit avoir lieu sur un endroit précis du mur de la cellule. Les différentes composantes de la cellule ont des points de ramollissement spécifiques permettant de ramollir la zone de la cellule qui interagissant avec les autres cellules. La différence dans la composition de la cellule est relativement faible

ne donnant que peu de choix aux papetiers sinon de séparer les fibres en utilisant un processus de rupture causé par le phénomène de fatigue.

### 3.2.1 Traitement mécaniques

Le conditionnement des copeaux par compression améliore les propriétés de la pâte finale. Law et al. [35] affirment que la compression statique des copeaux perpendiculaire au grain à l'aide d'une presse offre plusieurs avantages dont :

- Une réduction de 18 à 25 % de l'énergie de raffinage pour un indice d'égouttage dans la plage de 100 à 200 mL;
- Une augmentation du coefficient de diffusion de la lumière de près de 7%.
- À un degré moindre, une baisse de l'énergie de raffinage est aussi remarquée en utilisant la vis de compression avec un ratio de compression de 2 :1.

### 3.2.1 Pâte de raffineur

On catégorise généralement les pâtes mécaniques produites par raffinage des copeaux selon que leur production s'effectue à pression atmosphérique (PMR) ou sous pression précédé d'un traitement à la vapeur (PTM). On retrouve à la représentation d'un raffineur à la figure 3-3.

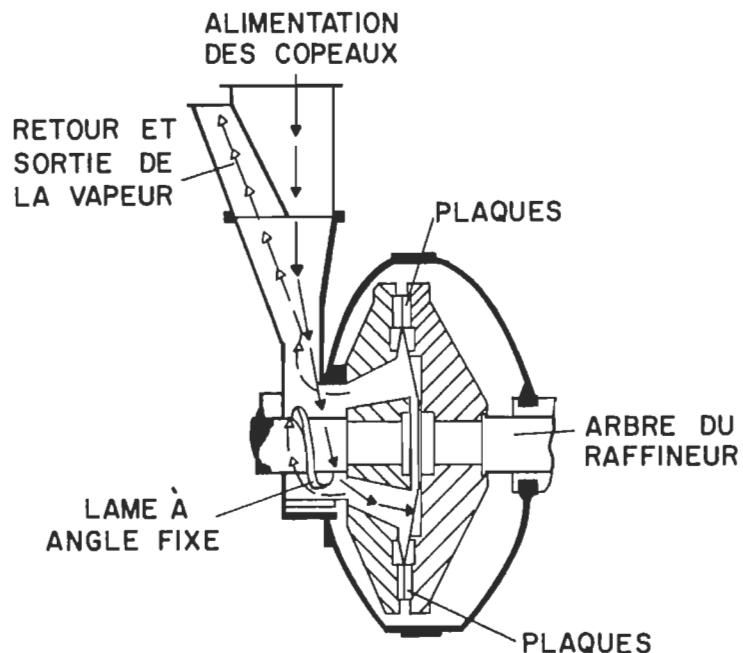


Figure 3-3 Raffineur [36]

### 3.2.1.1 Théorie du raffinage

Lorsque les particules individuelles sont immobilisées dans une agglomération sur une plaque du raffineur, elles sont sujettes à une action abrasive de la part des barres de la plaque opposée.

Des pulsations de pression associées au mouvement du dessin des barres de la plaque de raffineur au-dessus d'une telle agglomération ont été mesurées. Les pulsations de pression varient d'amplitude tout en observant des pointes de 600 kPa. On peut présumer que cette variation de pression est essentiellement déterminée par l'épaisseur et le degré de compressibilité de l'amas et elle est associée au passage de l'arrête au-dessus de sa surface.

Les forces qui lient les fibres entre elles dans le bois sont moins résistantes que la fibre elle-même. Cette faiblesse nous permet, en appliquant une force mécanique appropriée, de fabriquer une pâte mécanique.

Les pâtes mécaniques, à la différence des pâtes chimiques, dépendent des fines pour développer des liaisons. Il est donc évident que, pour obtenir des fines, il faut détruire les fibres.

### 3.2.2 Pâte thermomécanique

La pâte thermomécanique est produite à l'aide d'un raffineur pressurisé où la pression de vapeur correspond à la température de la vapeur saturée. Les copeaux frappent les arrêtes des barres grossières pour être immédiatement brisés en petites pièces. Le raffinage de ces pièces débute quand ces pièces se frappent les unes aux autres de même que les arrêtes des barres du stator et du rotor. Les forces centrifuges entraînent le mélange de pâte brute et de copeaux vers l'extérieur dans une direction radiale où l'entrefer s'amincit. C'est l'interaction entre le rotor, le stator et les fibres qui défibre et fibrille la matière fibreuse jusqu'à l'indice d'égouttage désiré.

Le procédé de mise en pâte consomme l'énergie par divers mécanismes, notons :

- Collision entre les fibres et les arrêtes des barres du rotor et du stator.
- Collision entre les fibres.
- Friction entre les fibres et la surface des segments
- Friction interne dans les fibres.

Cette énergie est transformée en chaleur qui, à son tour, augmente la température de l'eau et génère de la vapeur. Cette vapeur générée à une forte influence sur l'écoulement de la pâte dans l'entrefer.

Selon plusieurs, les facteurs les plus importants décrivant le processus de raffinage sont la consommation d'énergie spécifique (SEC) et l'intensité de raffinage qui décrit comment est appliquée l'énergie.

## Différents concepts de raffinage

### Raffinage doux (basse intensité) :

Produit une pâte longue et fibrillée.

Conditions : Haute énergie spécifique de raffinage, temps de résidence élevé, haute consistance.

### Raffinage sévère (haute intensité) :

Conditions : Basse énergie spécifique de raffinage, temps de résidence faible, basse consistance.

### 3.2.3 Pâtes chimicomécaniques

La pâte chimico-thermomécanique implique un stade de traitement chimique doux combiné à un défibrage comme un raffinage PTM afin de développer les propriétés mécaniques. Typiquement, les charges de produits chimiques sont relativement faibles comparativement aux pâtes chimico-mécaniques et des rendements de plus de 90% sont atteints.

Le traitement chimique peut être appliqué à différentes positions dans le procédé. Le prétraitement a plus de potentiel dans la modification les propriétés de la pâte étant donné que l'impact de ce traitement de fait ressentir avant l'étape de défibrage. L'étape de défibrage produira donc moins de rejets et la longueur des fibres sera plus élevée.

On peut modifier la pâte brute sortant du premier stade de raffinage avec un traitement inter-stade dans le procédé de raffinage en deux stades. Ce processus est connu sous le nom de traitement inter-stade.

Les procédés suivants découlent de ce concept :

- Procédé OPCO développé par l'Ontario Paper Company
- Procédé PTMC (pâte chimico-thermomécanique)

On peut produire la pâte chimico-mécanique en utilisant une combinaison de traitements chimiques :

- Sulfite de sodium (mise en pâte de bois mou)
- Hydroxyde de sodium
- Peroxyde d'hydrogène alcalin
  - PMPA (Pâte mécanique au peroxyde alcalin)
  - PTM-PA<sup>MC</sup> (Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin)

### **3.2.4 Pâte thermomécanique au peroxyde alcalin**

Une alternative à la sulfonation de la lignine pour augmenter la force du papier est la carboxylation de la lignine avec des agents oxydants, comme le peroxyde alcalin. De façon similaire à la sulfonation, la carboxylation s'exprime par des groupements carboxylates sur la lignine lesquels sont capables de créer des liaisons hydrogène. Ces liaisons augmentent la liaison inter-fibre favorisant les propriétés du papier. L'alcali produit une hydrolysatation des groupes esters et l'ionisation des groupes carboxylates et phénoliques, alors que le rôle du peroxyde est d'attaquer les groupements chromophores et de les convertir en groupes carboxylates. Il est connu que plus la concentration en groupements carboxylates est grande, meilleure seront les forces de tension [37].

La production d'une pâte à haut rendement à un niveau élevé de blancheur, en appliquant du peroxyde alcalin pendant où avant le raffinage, permet de diminuer les opérations de post-blanchiment. L'action du peroxyde alcalin sur le bois avant et pendant le raffinage offre la possibilité de réduire l'énergie de raffinage ainsi que de produire une pâte possédant une bonne longueur de fibre, un faible pourcentage de rejets, une longueur de rupture ainsi qu'une brillance élevées.

Par contre, le peroxyde, sous des conditions alcalines, lorsque la température augmente et lorsque certains métaux lourds sont présents, décroît en stabilité. Il est relativement facile d'enlever les métaux lourds lorsqu'on travaille avec de la pâte, lorsqu'on traite des copeaux, cette opération est beaucoup plus difficile parce que l'accessibilité est réduite et la taille des chélatants est élevée [**Error! Bookmark not defined.**].

Les variables de procédé qui affectent le blanchiment traditionnel de la pâte ont un effet similaire sur la performance du blanchiment des copeaux PMPA. Le rôle des agents séquestrants, du lavage, de la consistance, de la température et de la charge de produits chimiques sur la brillance de la pâte sont équivalents.

En blanchissant les copeaux avant le raffinage, les variables de réaction pour le blanchiment affectent aussi le développement des propriétés mécaniques de la pâte en plus du processus de raffinage. Si l'on désire une pâte complètement blanchie sans l'apport d'une unité de blanchiment séparée, on utilisera un raffineur à pression atmosphérique afin de minimiser les réactions de noircissement. La blancheur est fortement dépendante de la quantité de peroxyde appliquée alors que la force de la pâte et la consommation d'énergie dépend de la quantité de caustique appliquée.

Le problème de la stabilité du peroxyde à haut pH a reçu beaucoup d'attention. Fennel [38] a proposé un prétraitement avec du NaOH suivi par l'addition d'une solution de peroxyde dans le raffineur. Par contre, Ahrel [39] proposa l'imprégnation en deux stades avant le raffinage, le premier stade étant une solution à haute teneur en hydroxyde de sodium et faible teneur en peroxyde et la deuxième étant l'inverse.

Le traitement au peroxyde alcalin des copeaux ramollit la lignine, facilitant ainsi la séparation des fibres générant ainsi moins de fines lors du raffinage. Un bénéfice de ce procédé est que le peroxyde alcalin au raffineur peut

potentiellement éliminer le besoin d'un post blanchiment. Cette alternative au sulfite pour la production de pâte chimico-mécanique blanchie fait de plus en plus d'adeptes. Selon Gentile et al. [18] une des clés du succès est la stabilité du peroxyde sous des conditions hautement alcaline ainsi qu'aux températures de raffinage. Le procédé d'imprégnation breveté des copeaux de la Scott [18] utilise des étapes séparées et non compétitives afin de réduire la teneur en catalyseurs métalliques dégradant le peroxyde. Le procédé permet l'utilisation de haut degré d'alcalinité requis pour préserver la longueur des fibres et le développement des propriétés mécaniques de la feuille et cela en atteignant des niveaux de brillance élevée avec des ajouts économiques de peroxyde. Gentile et al. [18] affirment que les avantages maximums attribuables à une haute alcalinité ne peuvent être atteints à moins que les conditions soient maintenues pendant les étapes de raffinage. Finalement, il est important que le copeau en entier soit imprégné avec toute solution réactive.

Heimburger et al. [40] ont étudié la technologie PTMPA sur différents mélanges espèces de bois et a déterminé les divers critères d'opération comme le besoin de stabilisation de peroxyde après une imprégnation efficace des produits chimiques et l'enlèvement des espèces d'ions métalliques néfastes au peroxyde avant le blanchiment au raffineur. Deux agents sont principalement utilisés pour la séquestration :

A) L'agent stabilisant utilisé : Silicate de sodium

Il est ajouté soit dans le premier stage d'imprégnation (si procédé à un stage) ou dans le deuxième stage (si procédé à deux stages). Par contre, selon Valade et al. [41], certaines composantes de la liqueur de blanchiment comme le silicate de sodium peuvent être omises sans causer des différences significatives en raison du très faible temps de réaction.

Toutefois, lors du trempage des copeaux, il y a avantage à utiliser le silicate de sodium parce le temps de rétention est plus élevé. Le peroxyde est alors plus sujet à se décomposer.

#### B) Utilisation du DTPA

Le DTPA est efficace pour l'enlèvement des ions métalliques comme le fer et le manganèse lesquels décomposent le peroxyde d'hydrogène. Il est ajouté à un taux constant de 0,8% sur la base de pâte séchée au four lors du premier stage d'imprégnation.

Des essais précédents, ont montré que les fibres PTMPA sont plus fortes que leur homologues PTM [42], qu'elles ont de meilleures caractéristiques de liaison tout en étant plus propres, ce qui est confirmé dans cet article. Par contre, aucune diminution de la consommation d'énergie spécifique n'est observée.

### 3.3 Blanchiment des pâtes mécaniques

La coloration qui apparaît quand le bois qui est mis en pâte provient principalement des constituants autres que les hydrates de carbone.

Les conditions de mise en pâte à haut rendement comme la température élevée, l'oxydation atmosphérique et l'absorption d'ions métalliques de l'équipement ou de l'eau sont propices au développement de la couleur et occasionne une perte de blancheur.

Cette perte de blancheur est associée à des groupements spécifiques appelés chromophores. Un chromophore est un groupement d'atomes dont la structure provoque une coloration suite à l'absorption de lumière. Le blanchiment des pâtes mécaniques est une modification des groupements chromophores.

Les principaux groupements chromophores de la lignine et des matières extractibles sont :

- Doubles liaisons éthyléniques
- Groupements carbonyles
- Noyaux phénoliques
- Quinones

Les groupements carbonyle et phénolique absorbent tous deux la lumière mais l'absorption peut être intensifiée, de même que la coloration générée, par conversion du phénol en quinone ou par un réarrangement électronique du système conjugué avec le carbonyle.

Ces réactions sont du type condensation et peuvent avoir lieu dans les conditions de mise en pâte utilisées. Les températures élevées et l'acidité du milieu vont contrôler la cinétique de condensation. Les réactions peuvent être intra ou inter moléculaire provoquant un léger noircissement des pâtes.

La réversion de blancheur des pâtes à haut rendement en présence d'air ou de lumière est due à une réaction d'oxydation qui s'intensifie en milieu alcalin.

Le blanchiment des pâtes à haut rendement est grandement influencé par l'espèce de bois utilisée, les conditions d'entreposage, le procédé de mise en pâte ainsi que la qualité de l'eau. Des pâtes de meule fabriquées d'épinette, de sapin, de peuplier et de bouleau seront plus faciles à blanchir que celle de pin [43]. Les conditions d'entreposage sont également très importantes, la couleur du bois tend à changer durant l'entreposage. Un entreposage de 2 mois avant le raffinage diminue la blancheur de la pâte approximativement de 6 points.

La blancheur de la pâte est déterminée par la diffusion et l'absorption de la lumière. Le premier est le résultat de l'apparence physique de la pâte surtout affecté par les actions mécaniques (les pâtes de faible indice d'égouttage ont un

coefficient de diffusion plus élevé) alors que le second est surtout relié à la composition chimique de la pâte, en d'autres mots, la concentration en chromophores. En terme d'absorption de lumière, le noircissement de la pâte observée pour un PTM résulte de réactions nombreuses et compliquées lesquelles sont difficiles voir impossibles à identifier. Il est raisonnable d'affirmer que le degré auquel les réactions de noircissement progressent dépend de la température et du temps que la pâte ou les copeaux passent à l'intérieur du raffineur. En combinant les effets de l'intensité de raffinage et le temps de séjour de la pâte, une contradiction apparaît. En augmentant la vitesse de raffinage ou en diminuant la consistance de raffinage, on s'attend à une amélioration de la blancheur puisque le coefficient de diffusion est augmenté et le temps de séjour est diminué. Du point de vue énergie de raffinage, la situation devient plus compliquée, l'augmentation de l'énergie augmente l'intensité donc le coefficient de diffusion mais on augmente aussi la température dans le raffineur augmentant les réactions de noircissement. L'effet net sur la blancheur est un combinaison de ces deux facteurs en compétition [44]. Selon Xu [44], la vitesse de raffinage à l'effet le plus dominant, alors que l'énergie de raffinage à peu d'effet sur la blancheur.

L'objectif du blanchiment est toujours le même, que ce soit pour une pâte chimique ou une pâte mécanique. La façon d'y parvenir est par contre différente. En ce qui concerne la pâte mécanique, on cherche à conserver le rendement donc, au lieu d'éliminer la lignine comme pratiqué dans le blanchiment des pâtes chimiques, modifie les composants colorés de la lignine. Par l'élimination des chromophores, il est possible de limiter grandement l'absorption de la lumière de la lignine et ainsi augmenter la blancheur de la pâte.

Les deux agents de blanchiment les plus utilisés dans le blanchiment des pâtes mécaniques sont l'hydrosulfite (agent réducteur) et le peroxyde d'hydrogène (agent oxydant).

Une étude de Lee et al. [45] montre que les pâtes blanchies à l'hydrosulfite sont plus sujettes à la réversion de blancheur que celles blanchies au peroxyde. Il mentionne que l'addition d'agents chélatants améliore la stabilité de blancheur des pâtes blanchies au peroxyde.

L'alcali hydrolyse les groupements esters et ionise les groupements carboxyliques et phénoliques alors que le peroxyde transforme les groupements chromophoriques sur la fibre en groupements carboxyliques. Plus élevée est la concentration en groupements carboxyliques, meilleures sont les propriétés de tension [46].

Il a été reporté [47] que le traitement au sulfite améliore la séparation des fibres au niveau de la lamelle mitoyenne, riche en lignine. En situation de raffinage mécanique [48-49] cela entraîne une concentration plus élevée en lignine à la surface de la fibre. La lignine de surface réagit immédiatement avec le sulfite et est éliminée par l'intermédiaire des réactions de délignification. Par contre, la perte de lignine de surface ne favorise pas le développement des propriétés de tension du papier lesquelles sont reconnues pour être dépendantes de la flexibilité des fibres [50, 51, 52, 53] autant que la délignification dans la paroi de la fibre. La plupart des réactions d'hydrolyse alcaline et d'oxydation du peroxyde ont lieu à travers le mur de la fibre, ayant ainsi plus d'impact sur la flexibilité des fibres, elles favorisent le développement des propriétés de tension.

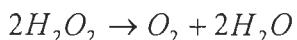
### 3.3.1 Blanchiment au peroxyde

Lorsque le peroxyde est appliqué sous des conditions douces, il est un agent de blanchiment très efficace. L'activité du peroxyde comme agent de blanchiment est basée sur son pouvoir oxydant. Il est accepté que le mécanisme d'élimination des chromophores par le peroxyde d'hydrogène implique l'ion

perhydroxyl  $\text{OOH}^-$ . Afin de produire l'ion actif, le blanchiment au peroxyde s'effectue à pH alcalin.



Des niveaux de pH élevés favorisent l'équilibre vers l'ion perhydroxyl mais accélèrent aussi la décomposition du peroxyde d'hydrogène en eau et oxygène :



L'hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ) est utilisé comme source d'alcalinité dans la préparation de la solution de blanchiment. Il est difficile de déterminer le pH initial directement puisque le pH chute immédiatement après le contact de la liqueur de blanchiment avec la pâte.

L'intervalle de pH où l'ion perhydroxyle est présent et stable est étroit. Le pH utilisé lors du blanchiment est de 11, donc sous des conditions alcalines. Par contre, une trop grande alcalinité du milieu est néfaste. Ceci est dû à la tendance du peroxyde à se décomposer en milieu très alcalin. La production d'oxygène lors de cette décomposition occasionne le noircissement de la pâte. Cette décomposition est activée par la présence d'ions métalliques.

Les principaux ions métalliques qui catalysent la décomposition du peroxyde sont les ions du fer, du manganèse et du cuivre. Dans les conditions utilisées, seulement les noyaux phénoliques non éthérifiés et les monomères ayant des carbonyles sur la chaîne latérale sont susceptibles d'être attaqués par le peroxyde. La structure macromoléculaire de la lignine n'est ni détruite, ni solubilisée ce qui permet de préserver le rendement. Dans les conditions utilisées industriellement, les réactions entre le peroxyde et les polysaccharides sont presque nulles. Il y a donc peu de dépolymérisation. De façon générale, les propriétés papetières de la pâte sont améliorées par ce traitement.

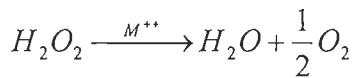
Le gain de blancheur obtenu lors d'un blanchiment au peroxyde est dépendant de l'espèce de bois. Le pin gris répond difficilement au blanchiment au peroxyde et atteint un plafond après un gain de 10 points de blancheur. Il est admis que, de façon générale, la dépendance du blanchiment au peroxyde est reliée au contenu en matières extractibles, une partie de la charge de peroxyde est consommée par ces substances.

Les principaux facteurs qui influencent le blanchiment d'une pâte avec le peroxyde sont :

### 1) Prétraitement

Un prétraitement de la pâte qui élimine partiellement les matières extractibles et les ions métalliques et permet un gain supplémentaire de blancheur.

Les ions métalliques entrent dans le système avec l'essence de bois et l'eau de procédé. Contrairement au blanchiment des pâtes chimiques, les réactions initiées par les métaux de transition sont plus problématiques. Les composés métalliques comme le fer, le magnésium et le cuivre catalyse la décomposition du peroxyde d'hydrogène sous des conditions alcalines selon la réaction suivante :



Il a été démontré que la décomposition du peroxyde d'hydrogène est accompagnée par la formation de radicaux hydroxyl et superoxyde résultant en une basse viscosité de la pâte et de faibles propriétés mécaniques. On sait que le manganèse décompose le peroxyde d'hydrogène sans que des radicaux ne soient formés pendant le processus. Le cuivre décompose rapidement le peroxyde produisant des radicaux hydroxyl et superoxyde. Le fer, de son côté, décompose le peroxyde de façon beaucoup plus lente.

Les traitements proposés pour enrayer les effets des métaux de transition sont des prétraitements avec des agents chélatants. Beaucoup de ces métaux sont neutralisés lorsque que le pH diminue. Les profiles de désorption en fonction du pH varient selon le métal [54]. Le manganèse, le magnésium et le calcium sont éliminés en diminuant le pH alors que le fer est plus difficile à éliminer à pH acide.

Le prétraitements avec un agent chélatant procure une blancheur plus élevée dans le cas d'un blanchiment au peroxyde comparativement au traitement précédent. Le DTPA est bien connu pour ses affinités avec le manganèse. Polcin et Rapson [55] ont démontré l'importance d'éliminer les métaux lourds afin d'augmenter l'efficacité de blanchiment du peroxyde. L'utilisation de DTPA est donc de mise afin de limiter une utilisation excessive de peroxyde et par conséquent le coût de revient. Dans le cas d'un blanchiment à l'hydrosulfite avec l'épinette, les effets d'un prétraitements avec l'acide tétra acétique ethylenediamine (EDTA) sont également observés. Dans le cas du pin gris, l'effet de l'EDTA était appréciable lors d'un blanchiment au peroxyde.

Les ions ferriques causent un noircissement immédiat de la pâte, ils accélèrent aussi la réversion de blancheur, alors que les ions de plomb, de manganèse, de zinc et de cuivre ont des effets pratiquement négligeables sur ces propriétés [56]. Le manganèse a les effets les plus néfastes sur la décomposition du peroxyde et la blancheur résultante alors que le cuivre, le plomb et le fer ont des effets intermédiaires [57].

L'origine du bois, de la même espèce, peut affecter la blancheur obtenue par plus de deux points [58, 59]. Il a été démontré que le calcium et le magnésium stabilise les liqueurs de blanchiment au peroxyde. Les effets des contaminants métalliques peuvent être réduits considérablement avec

l'utilisation d'agents séquestrant [60]. Les matières extractibles jouent également un rôle sur la consommation du peroxyde ou de l'hydrosulfite.

Le bois d'aubier de pin gris comparativement au duramen contient [61]::

- 1) Plus de graisses avec une teneur plus élevée d'oléates et moins de linoléates.
- 2) Moins d'acides résiniques lesquels possèdent des structures C=C conjuguées
- 3) Plus de composés aromatiques de type lignanes et polyphénols.

On peut donc supposer que les acides résiniques du pin gris et les graisses ont une certaine influence sur la réversion thermique.

L'agent chélatant le plus utilisé pour la séquestration des ions métalliques est le DTPA. De façon générale, l'agent chélatant est ajouté à une concentration de 0,2 à 0,8% par rapport à la pâte sèche.

Les matières extractibles consomment une partie importante du peroxyde durant le blanchiment.

## 2) Concentration de peroxyde

Dans la majorité des systèmes de blanchiment utilisés commercialement, des charges de 2 à 3% de peroxyde sont ajoutées, ce qui permet des gains de blancheur de 10 à 15 points.

## 3) Consistance de la pâte

Au début, le blanchiment au peroxyde était effectué à basse consistance (3 à 7%), mais on constata que les meilleurs résultats pouvaient être atteints à des consistances plus élevées. La décomposition du peroxyde et d'autres

réactions secondaires, en compétition avec les réactions de blanchiment, sont moins favorisées quand la pâte est à une consistance plus élevée. Une plus grande proportion de réactifs se retrouve à proximité des sites de blanchiment.

Un blanchiment effectué à basse consistance est moins efficace et plafonne rapidement quand la concentration en peroxyde augmente. En pratique, si la charge de peroxyde et la température sont maintenues constantes, le temps de rétention doit être augmenté quand la consistance baisse.

Une consistance moyenne de 12 à 15% pour le premier stade est généralement utilisée dans plusieurs procédés de blanchiment au peroxyde. Une haute consistance (25%) occasionne des problèmes d'homogénéité.

#### 4) Alcalinité et pH

Un contrôle sévère du taux d'alcalinité lors du blanchiment au peroxyde est nécessaire. La liqueur de blanchiment doit être suffisamment alcaline pour maintenir une concentration adéquate d'ions perhydroxyles. À une alcalinité excessive, le peroxyde se décompose en générant de l'oxygène qui initie de nouveaux chromophores sur la pâte. Une alcalinité initiale de la suspension fibreuse qui donne un pH compris entre 10,5 et 11 est idéale pour les réaction de blanchiment. Ce pH chute à un pH de 9 – 9,5 à la fin du traitement. L'alcalinité de la solution de blanchiment est obtenue avec du silicate de sodium et de l'hydroxyde de sodium.

L'alcalinité totale de la solution de blanchiment a une grande influence sur le taux optimum de blancheur obtenu. Dans tous les cas, le taux de blancheur passe par un maximum quand le taux d'alcalinité augmente.

#### 5) Température et temps de rétention

Ces deux variables sont inter reliées. Dans une certaine limite, une augmentation de la température et/ou du temps de rétention occasionne les mêmes effets sur le taux de blancheur obtenu.

#### 6) Neutralisation

Lorsque le traitement au peroxyde est terminé, il demeure en solution de peroxyde et d'alcali pour s'assurer d'atteindre le maximum de blancheur. Le pH de la suspension se situe à environ 9. La pâte se doit d'être neutralisée jusqu'à pH 5-5,5. Cette neutralisation permettra de stabiliser la blancheur, d'éviter le noircissement par les alcalis et d'éliminer le peroxyde.

#### 7) Autres produits chimiques

La concentration de sulfate de magnésium généralement utilisée est de 0,05% tandis que la concentration de silicate de sodium se situe entre 1 et 3%.

#### **3.3.2 Blanchiment au perborate de sodium.**

Le perborate de sodium tétrahydrate ( $\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) est un composé cristallin formé par la réaction entre le borate de sodium et le peroxyde d'hydrogène. C'est un composé blanc soluble dans l'eau. Quand il est dissout dans l'eau, le perborate de sodium libère le peroxyde d'hydrogène. Sa solution aqueuse agit comme une solution de peroxyde d'hydrogène. Sa structure particulière lui procure une grande stabilité intrinsèque.

Le perborate de sodium ( $\text{NaBO}_3$ ) existe sous les formes suivantes, tétrahydraté, trihydrate, monohydraté et anhydre. De ces formes, les formes tétrahydraté et trihydrate sont les plus importantes commercialement.

Leduc et al. [62] ont utilisé le perborate de sodium comme agent de blanchiment en l'injectant directement dans l'œil du raffineur. Dans le cadre de cette étude, un mélange d'épinette et de sapin beaumier (75 :25) a été utilisé. Chose intéressante, le perborate, à charge d'agents oxydants égale, permet d'atteindre une blancheur supérieure (gain de 20,2 points) à la blancheur atteinte avec le peroxyde d'hydrogène (gain de 13,8 points). Tout comme le peroxyde, le perborate occasionne une légère baisse d'opacité. Le perborate de sodium offre donc, une opacité similaire à celle obtenue avec le peroxyde tout en offrant un gain de blancheur supérieur.

Ces résultats prometteurs, nous ont convaincus d'évaluer l'aptitude du blanchiment au perborate de sodium sur le pin gris.

### 3.3.3 Blanchiment au raffineur

L'avantage du blanchiment au raffineur est relié aux coûts. En effet, le blanchiment au raffineur offre la possibilité d'éviter les coûts associés à la construction d'une unité de blanchiment malgré que celui-ci n'est pas aussi efficace que le blanchiment conventionnel (tour). Les températures élevées à l'intérieur du raffineur ainsi que le court temps de séjour de la pâte à l'intérieur du raffineur sont les causes de cette différence.

Le blanchiment au raffineur est un procédé breveté pour le blanchiment au peroxyde d'une PTM au premier stage de raffinage [63].

## Chapitre 4 - Expérimentation

Le ratio alcali/peroxyde dans la liqueur détermine la force et la blancheur de la pâte produite. Plus de brillance demande plus de peroxyde donc plus d'alcali.

Le but du traitement alcali/peroxyde consiste à améliorer les propriétés de liaison interfibre et la flexibilité des fibres, à diminuer la teneur en matières extractibles et les bûchettes tout en maintenant la longueur des fibres. On peut aussi s'attendre à un gain de blancheur vu l'effet blanchissant du peroxyde d'hydrogène.

Un traitement au peroxyde alcalin avant le processus de raffinage aidera à assouplir la lignine. Le ramollissement de la lignine se produit à des températures plus basses. Le résultat nous procure des fibres séparées au niveau de la lamelle mitoyenne et non dans les couches  $S_1$  et  $S_2$ . Les fibres ainsi obtenues sont plus longues que leur équivalent non traité. Les pâtes résultant d'un traitement chimique sont plus fortes mais l'imprimabilité est affectée. Dans de telles pâtes, la teneur en fines est minimale causant une baisse d'opacité, un désavantage important. Un coefficient de diffusion de la lumière trop faible rend une telle pâte indésirable pour presque tous les grades d'impression. Le degré de diminution du coefficient de diffusion de la lumière dépend du degré d'absorption des produits chimiques [64].

Les espèces de pin répondent d'une façon différente aux traitements par rapport aux épinettes ou aux sapins. On peut expliquer ce comportement à l'aide de la morphologie de la fibre et de la composition chimique des ces essences qui est varie beaucoup d'une essence à une autre.

## 4.1 Design statistique d'expériences

Par design statistique d'expériences, on se réfère au processus de planification des expériences de façon à ce que les données appropriées pouvant être analysées par des méthodes statistiques.

L'approche statistique au design expérimental est nécessaire si l'on désire tirer des conclusions valables à partir des données recueillies. Quand les données recueillies qui sont sujettes à des erreurs expérimentales, la méthodologie statistique est la seule approche objective d'analyse.

Il y a deux aspects à toute méthode expérimentale :

- Le choix du plan d'expérimentation
- L'analyse statistique des données

Ces deux aspects sont intimement reliés puisque la méthode d'analyse dépend directement du design utilisé.

### 4.1.1 Surface de réponse; méthode et design

Une surface de réponse est la représentation géométrique obtenue lorsqu'une variable de réponse est portée en graphique en fonction d'un ou plusieurs facteurs quantitatifs. C'est une combinaison de techniques mathématiques et statistiques utiles pour modéliser et analyser une réponse influencée par plusieurs variables et que l'objectif est d'optimiser cette réponse.

Une variable dépendante (propriété) dépend de plusieurs paramètres expérimentaux. Les paramètres expérimentaux varient dans une plage établie par le plan expérimental. La variable dépendante est affectée par les paramètres et sera perturbée par l'erreur expérimentale. Dans l'équation suivante,  $y$  correspond à la variable dépendante,  $x_1$  et  $x_2$  sont les variables

indépendantes (paramètres expérimentaux) et  $\varepsilon$  correspond à l'erreur expérimentale.

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

La surface de réponse ( $\eta$ ) peut être exprimée graphiquement et être représentée comme une surface solide dans un espace tridimensionnel.

$$E(y) = \eta = f(x_1, x_2)$$

L'utilisation d'un design d'expériences afin d'étudier ou de caractériser une surface de réponse est intéressante pour plusieurs raisons dont :

- La fonction de la réponse peut être caractérisée à l'intérieur d'une région d'intérêt.
- Des niveaux de facteurs peuvent être déterminés pour lesquels la variable réponse est optimale.

#### 4.1.2 Blocage d'un CCD

Une caractéristique utile des CCD (figure 4.1) est qu'ils peuvent être bloqués facilement. Le blocage est désirable quand un certain temps s'est écoulé entre deux moitiés d'une série d'expérimentations. Le blocage protège l'interprétation des résultats des effets incontrôlables liés à ce délai. Le blocage peut aussi servir à évaluer l'effet d'une variable qualitative à deux niveaux. La variable bloc sera donc associée à cette variable qualitative.

En général, lorsque deux blocs sont requis, il devrait y avoir un bloc axial et un bloc factoriel.

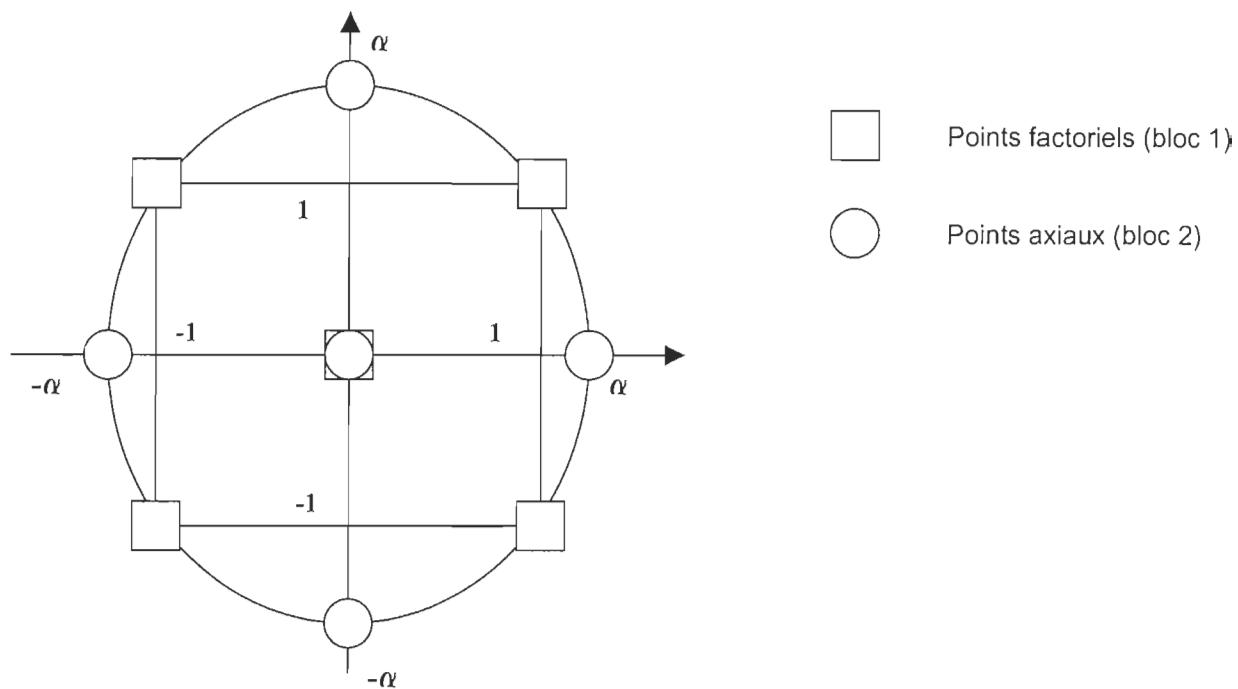


Figure 4-1 Structure du CCD

## 4.2 Procédures expérimentales

### 4.2.1 Variables étudiées

Dans le cadre de cette étude, nous avons étudié les variables suivantes afin de rencontrer les objectifs de notre recherche.

- Le pourcentage de pin gris dans le mélange.
- La charge de la solution de blanchiment au peroxyde alcalin appliquée au raffineur. Le perborate de sodium remplacera le peroxyde dans une répétition d'essais pour évaluer son efficacité.
- L'effet du trempage des copeaux de pin gris dans une solution fixe (variable bloc).

#### 4.2.2 Limites du plan

- Actuellement, les papetiers ne tolèrent pas plus de 20% de pin gris dans leur approvisionnement
  - Plage d'étude comprise entre 20% et 40%
- La plage de peroxyde dans la solution de blanchiment étudiée est fixée à 0,5% - 2,5%
- La réduction du nombre d'essais de raffinage en bloquant le plan expérimental
  - Blocage du trempage des copeaux pour limiter le nombre d'essais

#### 4.2.3 Procédé de mise en pâte

La figure 4-2 représente les étapes de mise en pâte que nous avons étudié.

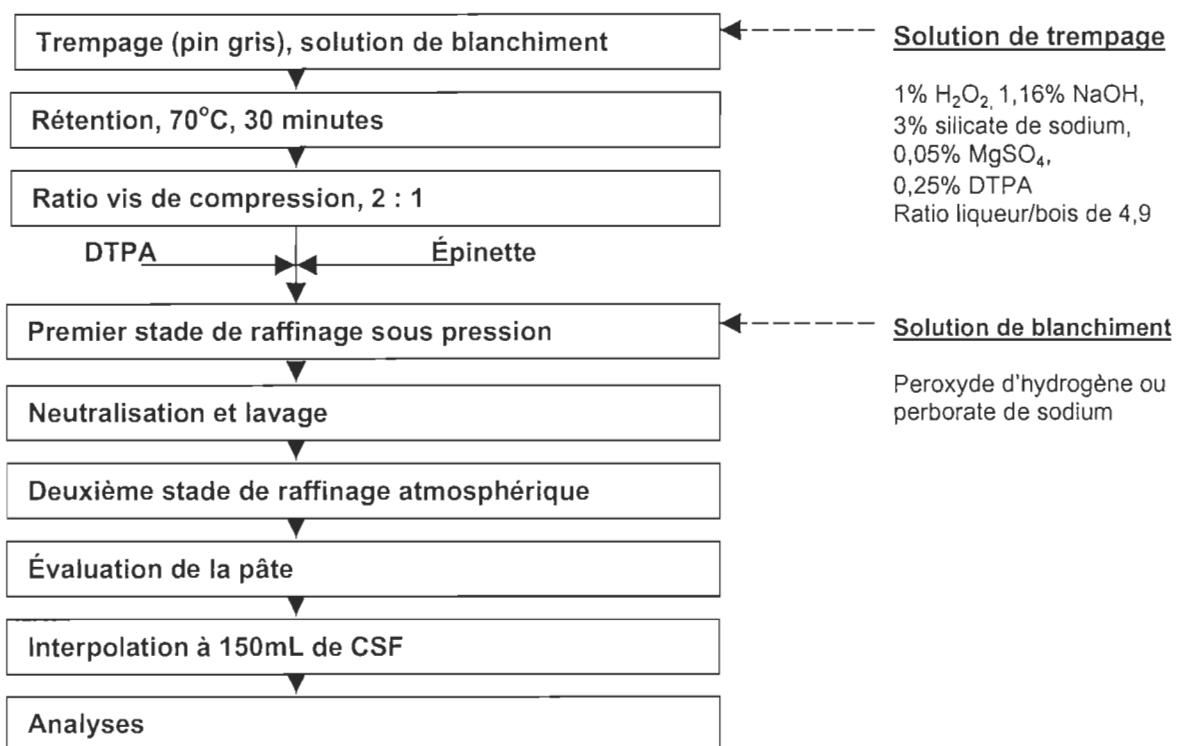


Figure 4-2 Étapes du procédé de mise en pâte

Pour tous les essais, nous avons utilisé des charges d'agents séquestrant compris entre 0,1% et 0,4%.

- 0,1% DTPA ajouté à la solution de blanchiment
- 0,4% DTPA injecté à l'imprégnateur

Le premier stade de raffinage a été effectué à 128°C tandis et le deuxième stade à pression atmosphérique. La neutralisation a été réalisée avant le lavage interstade par ajour de métabisulfite jusqu'à pH 5.5.

#### 4.2.4 Essais expérimentaux

Le tableau 4-1 représente le plan expérimental utilisé pour cette étude. On y voit les essais des blocs 1 et 2 du CCD. On substitue le peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium dans une répétition du point central sans trempage des copeaux. Des essais sans aucun traitement chimique avec 100% d'épinette noire sont effectués. Ces essais correspondent à la pâte témoin.

**Tableau 4-1 Plan expérimental: bloc 1**

% épinette	% pin gris	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> et NaOH	Trempage des copeaux
80	20	0,5	Oui (bloc1)
60	40	0,5	Oui (bloc1)
80	20	2,5	Oui (bloc1)
60	40	2,5	Oui (bloc1)
70 <sup>1</sup>	30 <sup>1</sup>	1,5	Oui (bloc1)
84,14	15,86	1,5	Non (bloc2)
55,86	44,14	1,5	Non (bloc2)
70	30	0	Non (bloc2)
70	30	2,91	Non (bloc2)
70 <sup>1</sup>	30 <sup>1</sup>	1,5	Non (bloc2)
70	30	4,4 (perborate) <sup>2</sup>	Non
70	30	4,4 (perborate) <sup>2</sup>	Non
100	0	0	Non
100	0	0	Non

<sup>1</sup> Trois répétitions

<sup>2</sup> Équivalent 1,5% peroxyde alcalin

### 4.3 Propriétés de la pâte

#### 4.3.1 Énergie spécifique de raffinage

La quantité d'énergie de raffinage nous renseigne sur les coûts en énergie reliés au traitement mécaniquement des fibres. La fibrillation, le raccourcissement et l'assouplissement des fibres nécessitent une certaine quantité d'énergie. Découlant de ce fait, la comparaison des pâtes est fortement basée sur les critères de qualité de la pâte et de leur coût de production.

#### 4.3.2 Teneur en matières extractibles

L'enlèvement des matières extractibles permet de diminuer la consommation d'agent de blanchiment. La plupart des matières extractibles sont hydrophobiques. L'enlèvement de ces derniers améliorera l'accessibilité et les contacts inter faciaux des agents de blanchiment avec les composés colorés.

#### 4.3.3 Teneur en rejets

Les bûchettes sont des amas de fibres qui sont restées collées ensemble après l'action du raffinage. Elles ne s'unissent pas bien aux autres fibres dans la structure du papier et sont une cause majeure de rupture du papier au calandrage.

## 4.4 Propriétés mécaniques à évaluer

### 4.4.1 Force de traction

Une façon utile de représenter le rapport force de traction-poids est de diviser la force de traction par le grammage du papier.

$$\frac{(N \cdot m)}{g} = \frac{N}{m} \cdot \frac{m^2}{g}$$

Le même rapport peut aussi être représenté par la longueur de rupture.

#### 4.4.1.1 Longueur de rupture

C'est une mesure de la résistance du papier face à une tension directe. La longueur de rupture correspond à la longueur d'une bande papier nécessaire pour causer sa rupture sous son propre poids.

$$LR = \frac{R \times 1000}{l \times f} \text{ En mètres}$$

R = Charge de rupture en grammes force

l = Largeur de la bande de papier en mm

f = Grammage du papier en g/m<sup>2</sup>

La longueur de rupture dépend de la combinaison de deux facteurs :

- Le degré de fibrillation
- La longueur des fibres

#### 4.4.1.2 Allongement

L'allongement se défini comme étant le rapport de la variation de la longueur du papier sur sa longueur initiale. La courbe contrainte-allongement du papier permet de déterminer une caractéristique importante : l'énergie absorbée jusqu'à la rupture (aire sous la courbe).

#### 4.4.2 Résistance à l'éclatement

La résistance à l'éclatement est la pression hydrostatique nécessaire pour rompre la surface circulaire d'un échantillon. Cette pression est appliquée grâce à un diaphragme se gonflant à un taux constant et uniforme. La valeur de la résistance à l'éclatement représente la pression maximale requise pour rompre l'échantillon à l'endroit du moindre allongement. La résistance à l'éclatement représente la résistance limite d'une éprouvette de papier soumise à une pression uniformément répartie exercée perpendiculairement à sa surface.

Indice d'éclatement

$$E = \frac{P}{M}$$

$M$  = Grammage

$P$  = Pression d'éclatement

Deux facteurs affectent la résistance à l'éclatement :

- La longueur des fibres (la résistance à l'éclatement est directement proportionnelle à la longueur des fibres)
- L'adhésion fibre à fibre (fibrillation)

L'indice d'éclatement s'accroît avec l'augmentation de la surface spécifique. L'éclatement augmente selon les différents stades de raffinage dû à la fibrillation accrue augmentant les liaisons fibre à fibre. À un certain point, l'effet de la coupe des fibres supplante la fibrillation induite par le raffinage. C'est un bon indicateur de la qualité des fibres composant le matelas fibreux.

#### 4.4.3 Résistance à la déchirure

La résistance à la déchirure a pour but de mesurer la résistance à la déchirure d'un nombre déterminé d'éprouvettes superposées (5) et préalablement entaillées, en exerçant dans des conditions déterminées un effort perpendiculaire au plan des éprouvettes.

### 4.5 Propriétés optiques

Les propriétés optiques du papier sont celles qui affectent son apparence visuelle.

#### 4.5.1 Blancheur

La blancheur est définie comme étant la quantité de lumière d'une longueur d'onde de 457 nm réfléchie à 90° d'angle par une feuille de papier et en provenance d'une source lumineuse située à 45° d'angle par rapport à la feuille en comparaison avec le sulfate de magnésium.

#### 4.5.2 Opacité

L'opacité d'une feuille de papier consiste à mesurer jusqu'à quel degré cette feuille empêche le passage de la lumière. L'opacité et le coefficient de diffusion de la lumière sont deux propriétés étroitement liées. Si on désire augmenter l'opacité, on doit nécessairement augmenter le coefficient de diffusion.

L'opacité est influencée par le nombre d'interfaces air-fibres et par la couleur de la pâte.

#### 4.5.3 Coefficient de diffusion de la lumière

Essentiellement, la feuille de papier est composée de fibres et d'air. Sous une lumière visible incidente, nous retrouvons des phénomènes de réfraction et de réflexion à toutes les interfaces.

La diffusion de la lumière est donc influencée par la dimension des fibres. L'écrasement des fibres a un effet néfaste sur le coefficient de diffusion. L'amincissement de la paroi cellulaire aura un effet néfaste sur la diffusion.

## Chapitre 5 - Résultats et discussion

Dans cette section, nous exposons et interprétons les résultats obtenus. La présentation des résultats se fait en trois grands volets :

- Les propriétés de la pâte
- Les propriétés physiques du papier
- Les propriétés optiques du papier

Le but premier de l'expérimentation était d'améliorer l'utilisation du pin dans le monde des pâtes et papier. Le papetier refuse le pin gris en tant que matière première pour les raisons suivantes :

- La faible blancheur et la haute teneur en matières extractibles causant des problèmes de poix sur la machine à papier.
- La grossièreté de la fibre et les faibles propriétés mécaniques qui en découlent.
- La forte consommation d'énergie de raffinage associée à cette espèce.

L'objectif n'est pas ici d'en faire une espèce vedette mais plutôt de l'utiliser dans une certaine proportion sans que cette dernière n'affecte le résultat final.

Pour y arriver, un traitement au peroxyde alcalin est utilisé. Le peroxyde alcalin est déjà connu pour son efficacité face à l'enlèvement des matières extractibles. Il permet aussi un assouplissement de la fibre (alcali) de même qu'un maintien de la blancheur (peroxyde).

Tous les traitements chimiques sont en quelque sorte un compromis où les propriétés mécaniques sont améliorées et où les propriétés tels l'opacité et le coefficient de diffusion de la lumière sont diminuées.

On s'attend à retrouver des propriétés représentatives de la composition du mélange d'espèces. Étant donné que l'énergie spécifique de raffinage est plus élevée pour une pâte de pin gris que pour une pâte d'épinette, une proportion accrue devrait influencer négativement l'énergie.

Deux courbes (surfaces) apparaissent sur les graphiques présents dans les pages suivantes. L'une d'elles correspond au modèle de régression lorsque les copeaux ont subi un trempage précédent le raffinage alors que la deuxième courbe correspond aux essais lorsque aucun trempage n'a été appliqué. Les résultats complets peuvent être retrouvés à l'annexe A.

#### Modèles des propriétés (régressions multiples)

Étant donné que la variable bloc interagit fortement avec la majorité des variables dépendantes, les modèles des propriétés ont été développés en considérant trois variables :

- Le bloc (trempage des copeaux de pin gris oui/non)
- Le peroxyde
- Le pin gris

Le tableau 5-1 présente les équations de modélisation obtenues. La déchirure à été omise étant donné que le coefficient de corrélation était trop faible pour que l'on puisse tirer des conclusions valable de la régression.

Tableau 5-1 Équations résultantes

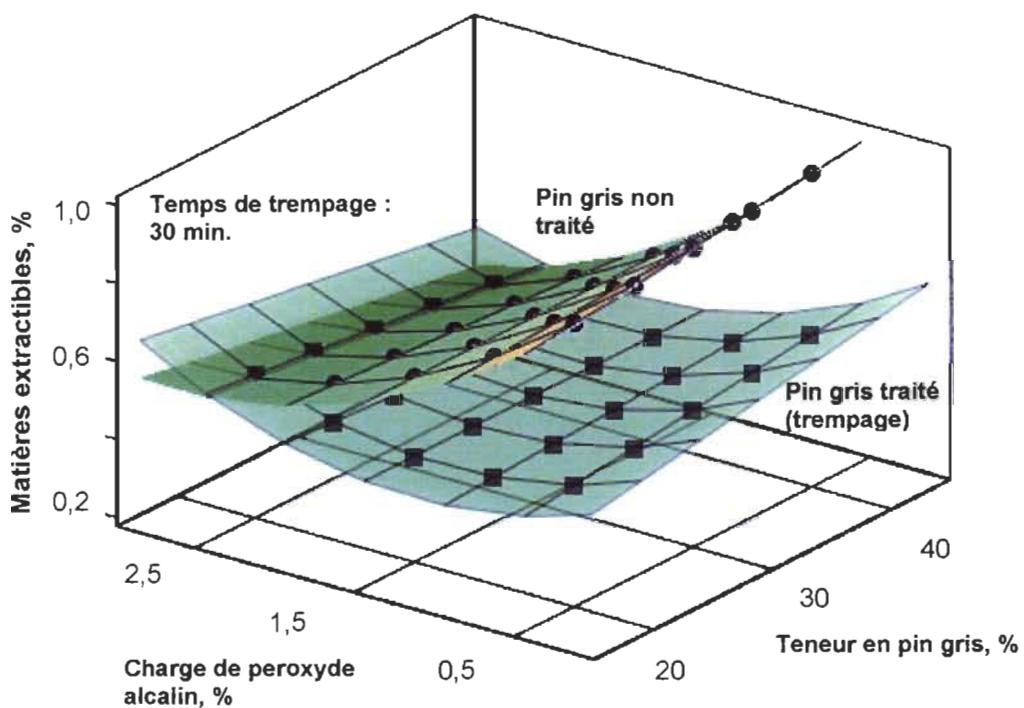
Propriétés	<i>Int.</i>	<i>B</i>	<i>B · PG</i>	<i>B · PE</i>	<i>PG</i>	<i>PE</i>	<i>PG · PE</i>	<i>PG<sup>2</sup></i>	<i>PE<sup>2</sup></i>	<i>R<sup>2</sup> aj.</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Énergie spécifique, MJ/kg	10,2	1,04			0,25	0,39		-0,27	0,92	0,95	
Rejets Pulmac (0,004"), %	0,33	-0,26		0,23	0,08	-0,36			0,30	0,87	0,92
Bouffant, cm <sup>3</sup> /g	2,93	-0,12		0,04	0,06	-0,16	-0,05		0,04	0,79	0,84
Indice de rupture, N·m/g	44,2	1,93	-0,952		-0,45	2,34			-0,9	0,95	0,97
TEA, g/cm	38,7	2,65	-2,08		4,19				-2,47	0,83	0,89
Indice d'éclat., kPa·m <sup>2</sup> /g	2,68	0,19			0,22	0,08			-0,06	0,93	0,95
Blancheur ISO, %	59,3	0,49		0,43		1,0			-1,83	0,95	0,97
Opacité, %	91,0	-0,48		-0,35		-0,53	-0,31	-0,299	0,92	0,84	0,92
Coeff. De disper., m <sup>2</sup> /kg	50,1	-1,09			-1,04				0,70	0,75	
Teneur en extractibles, %	0,55	0,1		0,11		-0,12	-0,04		0,07	0,94	0,97

## 5.1 Propriétés de la pâte

Les irritants majeurs reliés au pin gris sont directement associés à la mise en pâte et à la mise en feuilles. La diminution de la teneur en matières extractibles et de l'énergie de raffinage sont deux pré-requis à l'utilisation du pin gris.

### 5.1.1 Teneur en matières extractibles

La principale contrainte empêchant l'utilisation du pin gris est sa haute teneur en matières extractibles. Ses faibles propriétés mécaniques jouent également en sa défaveur. La présence de matières extractibles amplifie ses faibles propriétés d'adhésion, augmente la consommation d'agent de blanchiment en plus de causer certains problèmes sur la machine à papier. Les matières extractibles qui ne seront pas retenues au bout humide se retrouveront dans le circuit d'eau blanche et au traitement des effluents. La teneur en matières extractibles d'une PTM d'épinette est d'environ 0,5% [20]. Ce niveau de matières extractibles est le premier critère à respecter.



**Figure 5.1** Teneur en matières extractibles en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin

À la figure 5-1, on remarque qu'on fait subir un trempage aux copeaux de pin gris, ce traitement à lui seul suffit à abaisser le pourcentage des matières extractibles près des 0,5% visés. Préférablement, 0,5% de peroxyde alcalin doit être injecté dans l'œil du raffineur pour atteindre ce taux. Sans traitement des copeaux de pin gris, une charge importante d'un minimum de 2,5 % de produits chimiques doit être utilisée (œil du raffineur) pour atteindre le seuil de 0,5% de matières extractibles. Du point de vue de la teneur en matières extractibles, il est possible d'atteindre un taux acceptable avoisinant 0,5% sans un trempage préalable des copeaux de pin gris.

En regardant les essais où les copeaux de pin gris ont été préalablement traités, on observe que le pourcentage d'extractibles est nettement plus bas. La teneur en extractibles dépend peu de la quantité de pin gris lorsque les copeaux de pin gris subissent un traitement (trempage). Par contre, la proportion de pin gris augmente légèrement le pourcentage de matières extractibles de la pâte

lorsque les copeaux de pin gris ne subissent pas de trempage. Ce comportement est probablement dû à la teneur très élevée en matières extractibles de l'épinette noire utilisée. La PTM de référence pour cette étude (100% épinette noire) contient un pourcentage de matières extractibles de 0,91%.

Au Tableau 5-2 on voit que les essais avec perborate de sodium ont aussi performé de façon adéquate. Selon les résultats de laboratoire, on remarque que le perborate est plus efficace que le peroxyde dans le cas des essais sans trempage.

**Tableau 5-2 Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur**

Propriété	Essai avec perborate de sodium	Essai avec peroxyde alcalin
Teneur en matières extractibles, %	0,37	0,66

Au Tableau 5-3, on observe que dans la majorité des essais sans trempage des copeaux de pin, l'ajout d'au moins 1,5% de peroxyde alcalin permet de réduire la teneur en matières extractibles sous le pourcentage de matières extractible de la pâte témoin (100% épinette noire) de 0,91%. Donc, on peut, sans traitement des copeaux de pin gris, arriver à une teneur en extractibles acceptable.

**Tableau 5-3 Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais sans traitement des copeaux de pin gris et pour pâte à 100% épinette noire**

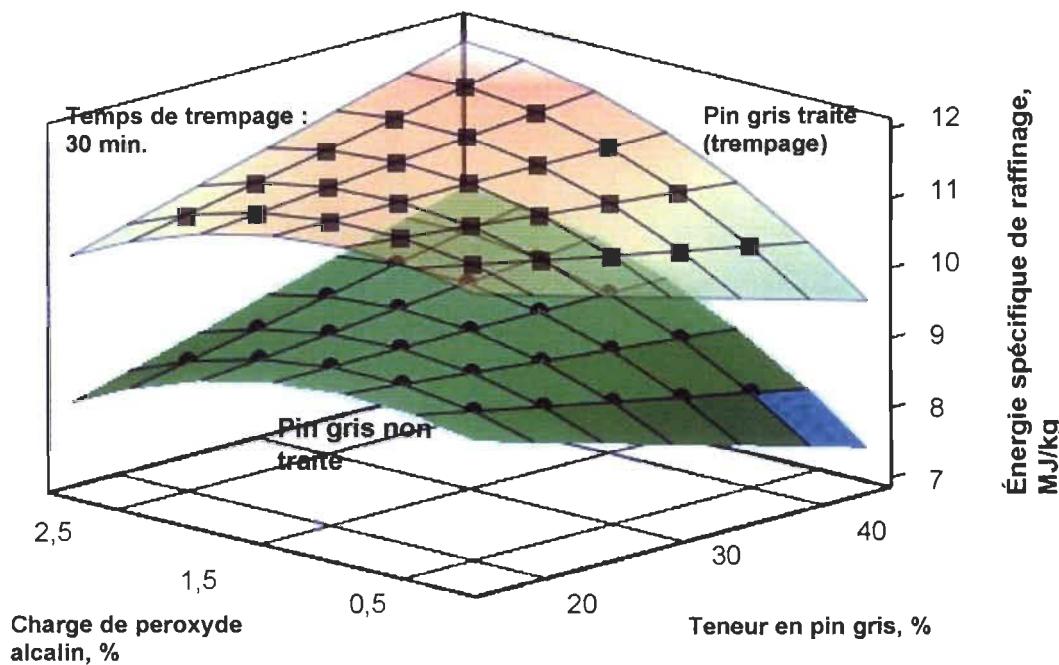
Propriété	Pâte 100% épinette noire	Essai avec 0% de peroxyde alcalin et 30% de pin gris	Essai avec 1,5% de peroxyde alcalin et 30% de pin gris	Essai avec 1,5% de peroxyde alcalin et 44,1% de pin gris
Teneur en matières extractibles, %	0,91	1,13	0,66	0,65

### 5.1.2 Énergie spécifique de raffinage

Plus on fournit de l'énergie aux disques du raffineur, plus on développe la surface des fibres et plus la quantité de fines produites sera grande. Les matières fines de la pâte et fibrilles présentes sur les fibres ont plus de facilité à créer des liaisons interfibres étant donné qu'elles augmentent les contacts fibre à fibre. Ces liens augmentent les propriétés physiques de la feuille de papier excluant l'indice de déchirure qui lui est directement lié à la longueur moyenne des fibres.

Selon Munster [10], le pin gris demande plus d'énergie spécifique de raffinage et possède de moins bonnes propriétés que l'épinette noire. Ces différences sont dues à la morphologie des fibres de pin gris ainsi qu'à son plus haut taux de résines.

Des travaux antérieurs ont montré que le pin gris répond différemment de l'épinette aux traitements chimiques. Par exemple, Sabourin et Presley [65], dans leur étude de la mise en pâte APTMP, ont remarqué que des économies d'énergie de 300-350 kWt/t ont été obtenues pour un mélange de pin Lodgepole (*Pinus contorta*) et de pruche (*Tsuga heterophylla*) par rapport à aucun gain dans le cas de l'épinette noire (*Picea glauca*).



**Figure 5.2** Énergie spécifique de raffinage en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin

La figure 5-2 montre la variation d'énergie spécifique de raffinage en fonction de la charge de peroxyde alcalin et de la proportion de pin gris. Le peroxyde alcalin n'abaisse pas l'énergie spécifique de raffinage comme Tyrväinen al. avait observé [1]. Selon eux, le procédé PTM-PA permet de réaliser des baisses substantielles de l'énergie spécifique de raffinage. Ils ont constaté que le peroxyde alcalin avait un impact plus marqué lorsque appliqué sur le pin gris comparativement à l'épinette noire. La fraction longue (R48) de l'épinette noire ne change pas de façon significative suite à un traitement interstade au peroxyde alcalin. Dans l'étude présente, on n'observe aucune baisse d'énergie spécifique de raffinage suite à une augmentation de la charge de peroxyde alcalin. Le peroxyde a plutôt un effet négatif sur l'énergie de raffinage.

Toutefois, lorsque les copeaux de pin gris ne trempe pas dans la solution de peroxyde alcalin pour 30 minutes, l'effet négatif du peroxyde alcalin diminue. Le niveau d'alcalinité de la solution de trempage des copeaux de pin gris provoque la hausse de la consommation d'énergie spécifique de raffinage. L'assouplissement des fibres par l'alcali occasionne une demande d'énergie supplémentaire pour augmenter la surface spécifique des fibres. Le peroxyde a un effet plus marqué sur les essais avec une proportion de pin gris élevée. Le peroxyde ajouté dans l'œil du raffineur a un impact faible lorsque la proportion de pin gris est faible (20%). Toutefois, avec plus de pin gris (40%), l'effet est plus marqué sans toutefois atteindre des valeurs extrêmes comme dans le cas des essais avec trempage.

Selon la figure 5-2, on remarque que le pin gris réagit fortement au peroxyde injecté l'œil du raffineur. Lorsque la charge de peroxyde injectée dans l'œil du raffineur est faible (0,5%), on ne remarque pas d'effet négatif sur l'énergie spécifique de raffinage lorsque la proportion de pin gris augmente. À 2,5% de peroxyde injecté dans l'œil du raffineur, l'augmentation de la proportion de pin gris augmente l'énergie consommée. Le pin gris est plus réceptif au traitement au peroxyde alcalin que l'épinette noire.

Le trempage des copeaux de pin gris augmente de façon significative l'énergie spécifique de raffinage à des seuils difficilement justifiables. Pour les essais sans trempage, le peroxyde alcalin augmente l'énergie consommée, mais toujours en demeurant à un niveau inférieur aux essais avec trempage ce qui s'accorde avec les résultats de Lanouette et al. [5, 6]. Les essais sans trempage avec perborate de sodium (Tableau 5-4) ont une énergie spécifique de raffinage moins élevée que les essais comparables avec peroxyde d'hydrogène (Tableau 5-11).

**Tableau 5-4 Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur**

Propriété	Essai avec perborate de sodium	Essai avec peroxyde alcalin
Teneur en matières extractibles, %	0,37	0,66

**Tableau 5-5 Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais sans traitement des copeaux de pin gris et pour pâte à 100% épinette noire**

Propriété	Pâte 100% épinette noire	Essai avec 0% de peroxyde alcalin et 30% de pin gris	Essai avec 1,5% de peroxyde alcalin et 30% de pin gris	Essai avec 1,5% de peroxyde alcalin et 44,1% de pin gris
Teneur en matières extractibles, %	0,91	1,13	0,66	0,65

En résumé, au niveau de l'énergie, le trempage (essais avec peroxyde alcalin) augmente la consommation d'énergie spécifique. Un niveau d'alcalinité trop élevé de la solution de trempage augmente l'énergie spécifique de raffinage étant donné que cette dernière rend les fibres plus souples.

L'ajout de peroxyde alcalin dans l'œil du raffineur fait varier considérablement la quantité d'énergie consommée lorsqu'une grande quantité de pin gris est utilisée et de façon surprenante, la proportion de pin gris a peu d'impact lorsque la dose de peroxyde alcalin est faible (0,5%), impact qui est négatif. Cette observation est vraie pour les séries d'essais avec et sans trempage.

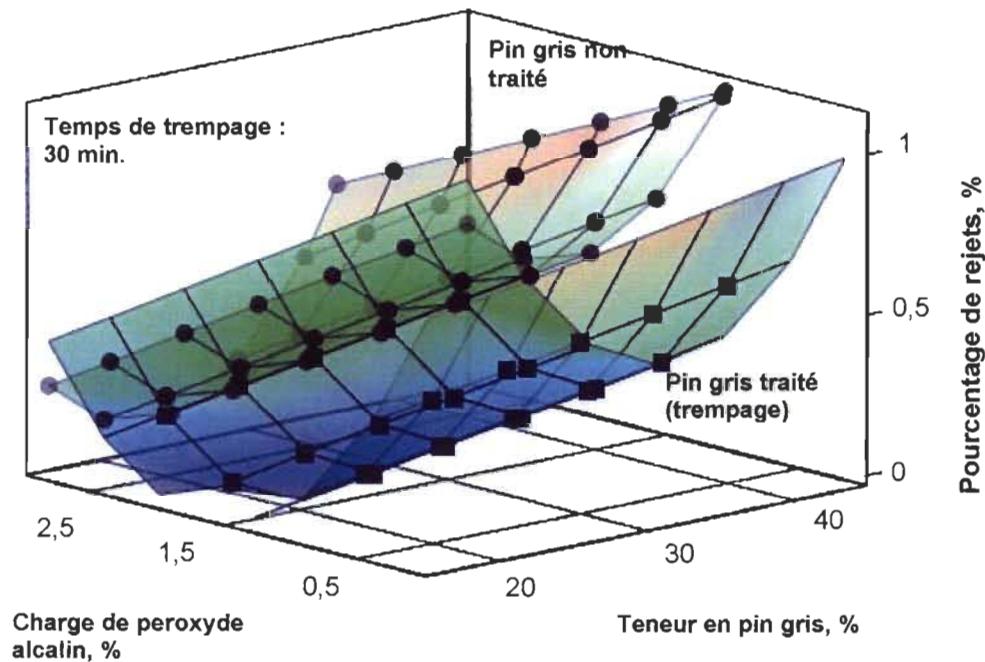
### 5.1.3 Rejets

À partir de la figure 5-3, on remarque que la quantité totale de produits chimiques ajoutée est directement reliée à la teneur en rejets. Le pourcentage de pin gris a une influence négligeable sur le taux de rejet comparativement à la teneur en peroxyde alcalin. Les essais avec perborate (Tableau 5-12)

produisent des pâtes dont la teneur en rejet est plus élevée que les pâtes utilisant le peroxyde d'hydrogène.

**Tableau 5-6 Résultats de pourcentage de matières extractibles pour essais avec 30% de pin gris non traité et 1,5% de peroxyde alcalin ou 4,4% de perborate de sodium injecté dans l'œil du raffineur**

Propriété	Essai avec perborate de sodium	Essai avec peroxyde alcalin
Teneur en matières extractibles, %	0,37	0,66



**Figure 5.3 Teneur en rejets fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin**

En ce qui concerne les propriétés de la pâte, la mise en pâte PTM-PA du pin gris non traité en mélange avec l'épinette noire produit des pâtes possédant:

- Une teneur en matières extractibles plus élevée que les pâtes avec traitement des copeaux de pin gris. L'ajout d'une dose plus forte de peroxyde dans l'œil du raffineur est nécessaire pour atteindre le seuil de 0,5% de matières extractibles.

- Une énergie spécifique se situant entre 9 et 9,5 MJ/kg.

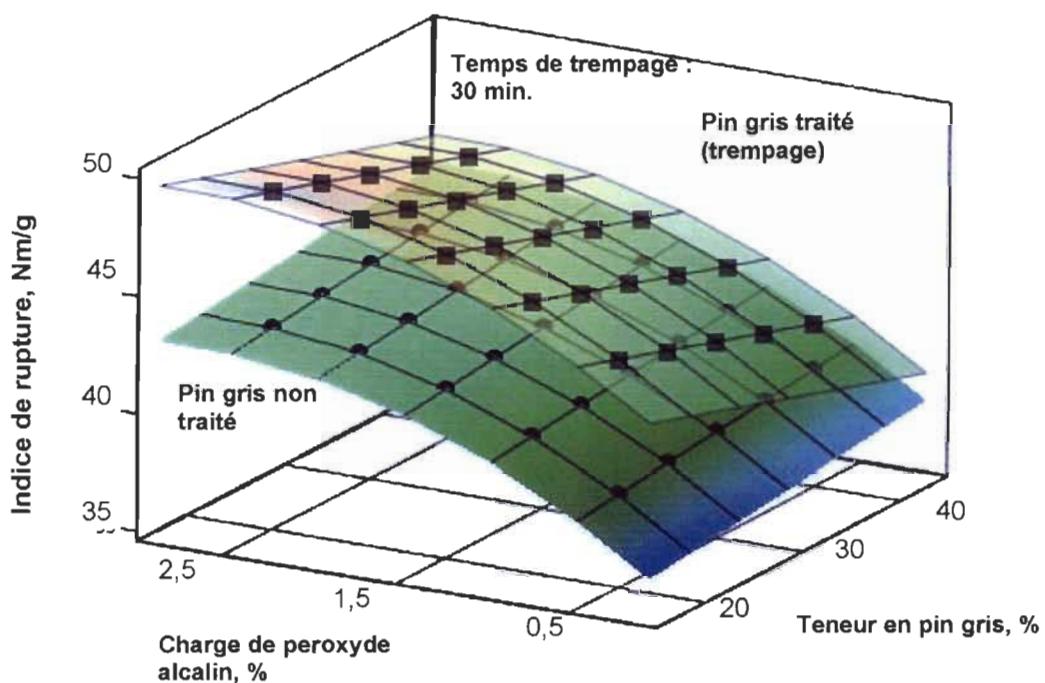
## 5.2 Propriétés mécaniques

La longueur de rupture, pour un procédé de raffinage donné, est directement reliée à la consommation d'énergie spécifique de raffinage. Elle peut être améliorée en augmentant la surface de la fibre en utilisant différent produits chimiques d'extraction avant de raffinage.

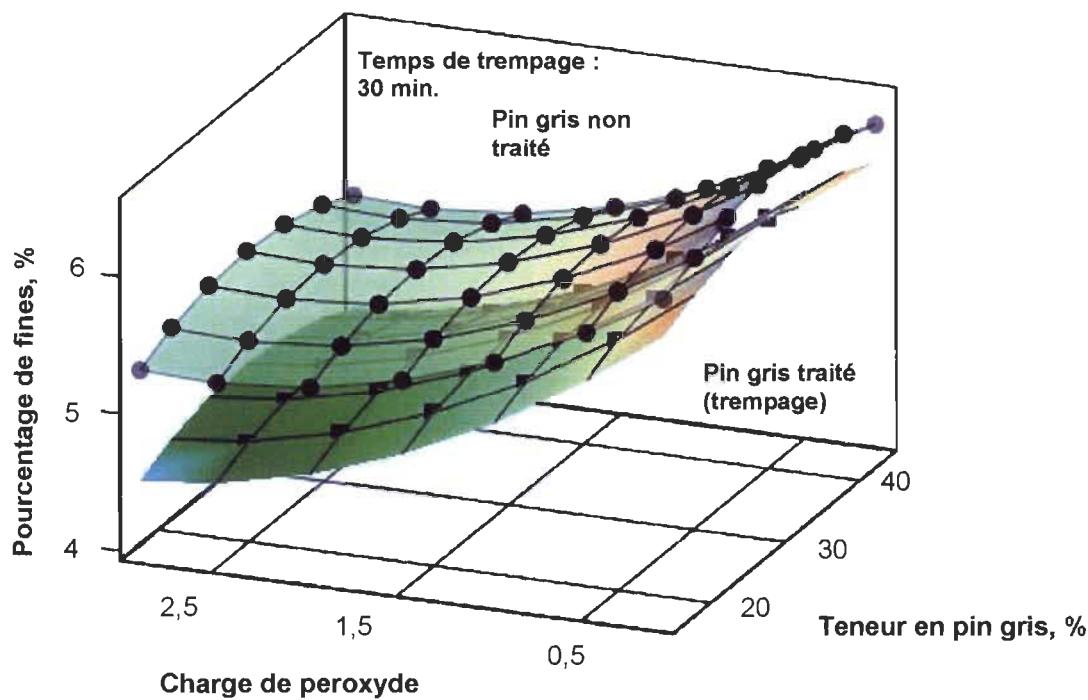
### 5.2.1 Indice de rupture

À la figure 5-4, on observe que le trempage des copeaux de pin gris modifie l'impact de la liqueur de blanchiment injecté dans l'œil du raffineur sur l'indice de rupture. On s'attendait à observer les mêmes tendances à des degrés différents, au contraire, il semble que les fibres de pin gris soient responsables de la tendance observée pour les essais avec trempage. Le traitement chimique appliqué sur les fibres de pin gris est trop important lorsque les copeaux de pin gris sont trempés dans la solution de peroxyde alcalin de sorte que les fibres de pin gris deviennent fragiles et source de faiblesse à l'intérieur du matelas fibreux. En regardant les résultats pour le pourcentage de fines à figure 5-5, on remarque que le pourcentage de fines dépend peu du pourcentage de pin gris par rapport à l'influence du peroxyde alcalin injecté dans l'œil du raffineur. Les fibres sont probablement peu fibrillées et ont subi un traitement chimique trop sévère. Cette supposition est supportée par les résultats du bouffant qui montrent que les fibres ayant subit un traitement préalable possèdent un bouffant faible (figure 5-6). On suppose que le raffinage n'a pas l'effet escompté sur les fibres de pin gris et les fibres sont peu fibrillés, par conséquent, moins aptes aux liaisons interfibres.

L'utilisation du perborate en remplacement au peroxyde d'hydrogène donne un indice de rupture comparable à celui des pâtes faites de pin gris non traités utilisant le peroxyde d'hydrogène comme agent de blanchiment.



**Figure 5.4** Indice de rupture fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin



**Figure 5.5** Fines en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin

À la Figure 5.7, on remarque que l'on arrive à un indice de rupture de 44,2 N\*m/g pour le mélange pin gris-épinette noire, supérieur à la pâte de référence tout en conservant une consommation d'énergie spécifique de moins de 9 MJ/kg, comparable à la PTM d'épinette noire (pâte témoin)

**Tableau 5-7** Résultats comparatif entre la pâte témoin et un mélange pin gris – épinette noire

	Pâte témoin	Mélange pin gris – épinette noire
Trempage des copeaux de pin gris	Non	Non
Pourcentage de pin gris	0	30
Pourcentage de peroxyde alcalin injecté dans l'œil du raffineur, %	0	2,9
Indice de rupture, N*m/g	40,8	44,4
Énergie spécifique de raffinage, MJ/kg	7,40	8,88

Les essais sans traitement des copeaux de pin gris procurent des résultats intéressant. La tendance nous montre que l'ajout de pin gris couplé à une dose de peroxyde alcalin améliore la résistance à la rupture. Une concentration élevée de peroxyde alcalin favorise le développement des propriétés de liaison inter fibres particulièrement à haute teneur en pin gris. Il semble donc que des essais supplémentaires sans traitement des copeaux avec une plus forte proportion de pin gris pourraient révéler des résultats intéressants.

Le peroxyde alcalin injecté dans l'œil du raffineur permet d'observer un gain d'indice de rupture. Ces résultats sont observés à fortes doses de peroxyde et faibles pourcentages de pin gris ce qui ne rencontre pas l'objectif de cette étude.

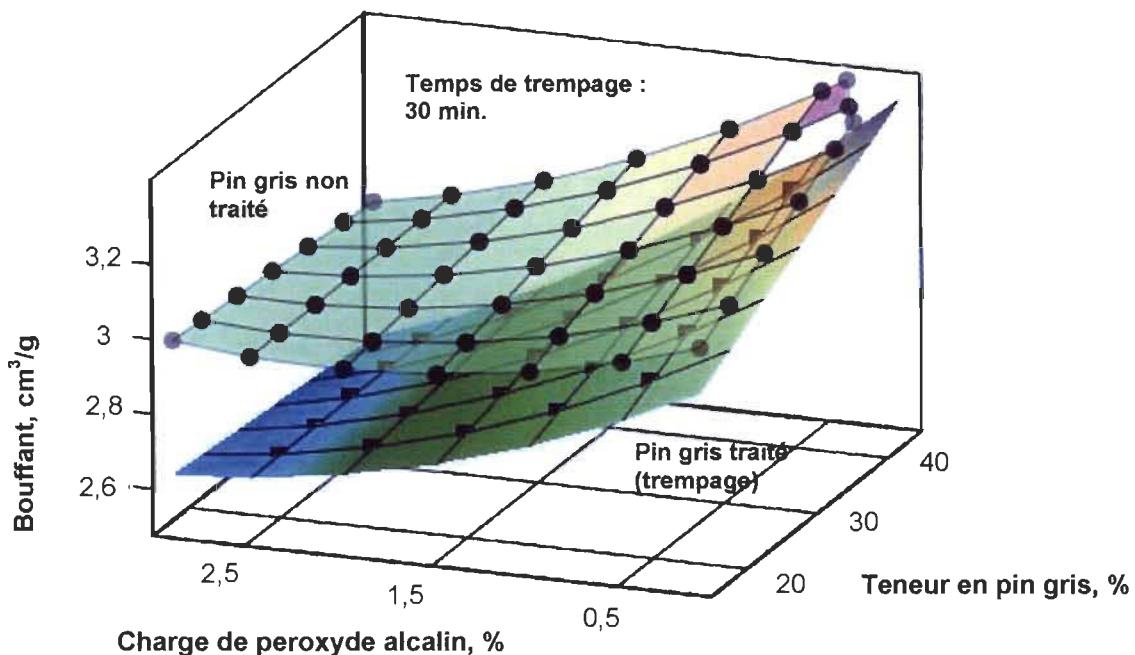
Avec trempage, l'ajout de plus de pin gris traité ne fait que diminuer la longueur de rupture, ce qui est normalement relié à de faibles liaisons inter fibres. Cet effet n'est probablement pas lié à la diminution de la proportion d'épinette noire puisque l'ajout de pin gris n'ayant subit aucun trempage affecte positivement la longueur de rupture. L'effet du trempage des copeaux de pin gris n'a pas l'effet escompté.

### 5.2.2 Bouffant

La densité du papier est un indicateur de la capacité de la fibre à créer des liens inter fibres. C'est un bon indicateur de la qualité d'une pâte.

Plus la fibre est souple et apte à un affaissement, plus les vides de structure du papier seront minimisés, le bouffant diminuera avec la souplesse des fibres. Le milieu alcalin favorise la flexibilité des fibres toutefois, les caractéristiques morphologiques de l'espèce utilisée est un paramètre important influençant le résultat de bouffant obtenu.

Selon Laliberté et al. [8], le bouffant est plus grand pour les pâtes de pin gris (PTM, PCTM) que pour les pâtes d'épinette. Si les fibres sont plus flexibles, le bouffant devrait diminuer. On souhaite corroborer nos résultats avec les résultats de longueur de rupture (figure 5-6).



**Figure 5.6** Bouffant en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin

À la figure 5-6, on observe que la concentration de peroxyde alcalin affecte le bouffant, avec moins de peroxyde on augmente le bouffant. Une concentration plus élevée de peroxyde alcalin produit une fibre plus souple et donc plus apte aux liaisons inter fibres produisant un matelas fibreux plus compact. À l'inverse, on produit une fibre plus cassante avec une plus faible concentration de peroxyde alcalin, moins apte à obtenir la forme des autres fibres.

Le bouffant se comporte de façon conventionnelle, c'est-à-dire que plus il y a de peroxyde alcalin plus le bouffant est faible donc nos essais avec trempage ont produit un papier de densité plus élevée. De la même façon, le pin augmente le bouffant de façon linéaire lorsque la concentration de peroxyde

alcalin est faible. Le bouffant à 2,5% de peroxyde alcalin est peu dépendant de la quantité de pin gris.

### 5.2.3 Résumé des propriétés mécaniques

- Le trempage de copeaux de pin gris avant la mise en pâte PTM-PA en mélange avec l'épinette combiné à une solution de blanchiment injectée dans l'œil du raffineur produit des pâtes qui ont des propriétés mécaniques supérieures aux essais qui n'utilisent pas le trempage.
- Le traitement par trempage des copeaux de pin gris semble trop sévère. La proportion de pin gris est une source de faiblesse dans les essais où le pin gris est traité.
- L'action unique de la liqueur de blanchiment (peroxyde alcalin) injectée au raffineur permet d'atteindre des propriétés qui dépassent les propriétés mécaniques de la pâte témoin. Des résultats légèrement inférieurs (4%) sont obtenus avec le perborate de sodium.

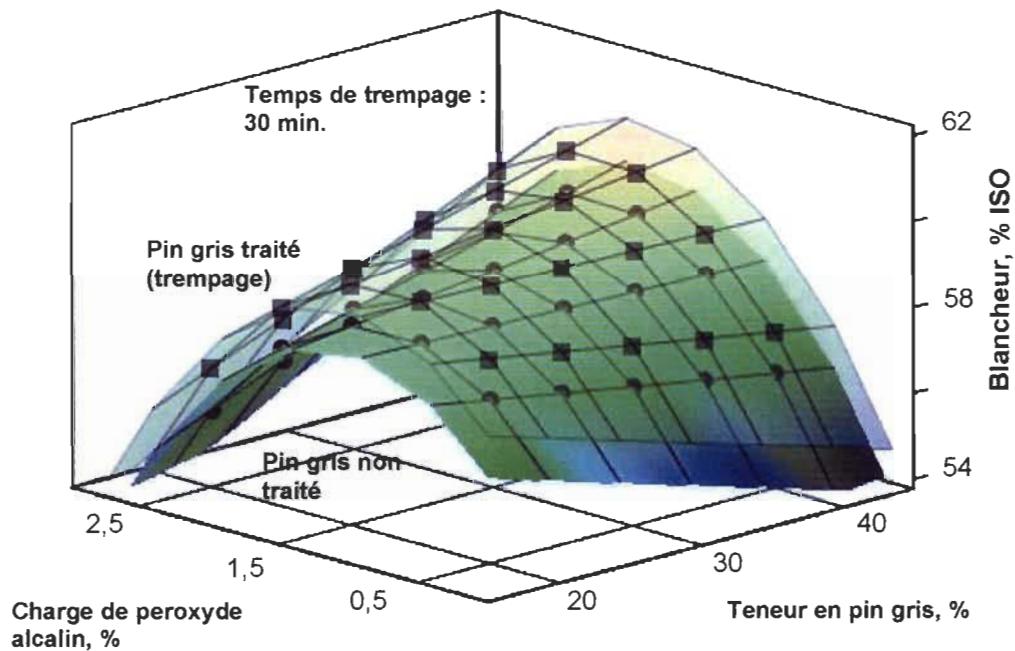
## 5.3 Propriétés optiques

### 5.3.1 Blancheur

À la figure 5-7, on remarque que le niveau de blancheur est peu influencé par le traitement des copeaux de pin gris. Les deux surfaces de réponse se confondent. On peut supposer que l'injection de liqueur de blanchiment dans l'œil du raffineur suffit à blanchir la pâte au niveau observé. Le peroxyde ajouté au traitement interstade limite la perte de blancheur associée à l'alcali, sans plus. Au Tableau 5-8, on remarque que le perborate de sodium est moins efficace pour blanchir la pâte que le peroxyde d'hydrogène.

**Tableau 5-8 Comparaison entre l'effet du perborate de sodium et l'effet du peroxyde d'hydrogène sur la blancheur de la pâte**

	Peroxyde d'hydrogène	Perborate de sodium
Trempage des copeaux de pin gris	Non	Non
Pourcentage de pin gris	30	30
Pourcentage de peroxyde alcalin injecté dans l'œil du raffineur, %	1,5	1,5 (4,4% perborate)
Blancheur, % ISO	59	57,5



**Figure 5.7 Blancheur en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin**

### 5.3.2 Coefficient de diffusion de la lumière

Le coefficient de diffusion de la lumière dépend du pourcentage de fines (figure 5-5). Plus on injecte d'alcali, plus le coefficient de diffusion de la lumière diminue. En analysant la figure 5-8, on remarque :

- Que l'ajout de peroxyde d'hydrogène a une influence négative sur le coefficient de diffusion de la lumière.
- Que le pin gris n'influence pas le coefficient de diffusion de la lumière.

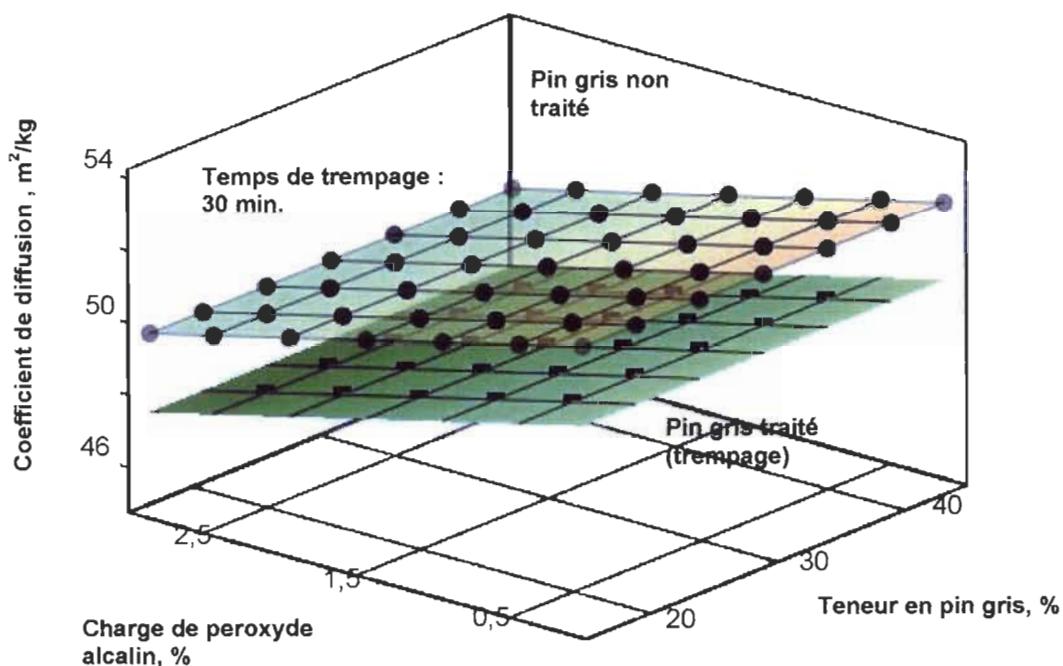


Figure 5.8 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du pourcentage de pin gris et de la charge de peroxyde alcalin

Le Tableau 5-9 nous indique que le perborate de sodium permet de mieux conserver le coefficient de diffusion de la lumière que le peroxyde d'hydrogène.

**Tableau 5-9 Comparaison entre l'effet du perborate de sodium et l'effet du peroxyde d'hydrogène sur le coefficient de diffusion de la lumière de la pâte**

	Peroxyde d'hydrogène	Perborate de sodium
Trempage des copeaux de pin gris	Non	Non
Pourcentage de pin gris	30	30
Pourcentage de peroxyde alcalin injecté dans l'œil du raffineur, %	1,5	1,5 (4,4% perborate)
Coefficient de diffusion de la lumière, m <sup>2</sup> /kg	51,4	52,8

### 5.3.3 Résumé des propriétés optiques

Le traitement des copeaux de pin gris par extraction avant la mise en pâte PTMPA en mélange avec l'épinette noire :

- Affecte négativement le coefficient de diffusion de la lumière. Une charge de produits chimiques supplémentaire affecte de façon plus prononcée le coefficient de diffusion de la lumière
- Influence peu la blancheur. La blancheur est fortement influencée par l'ajout de peroxyde alcalin au raffineur

Le perborate de sodium est moins efficace que le peroxyde d'hydrogène pour le blanchiment de la pâte, par contre, il permet d'obtenir un coefficient de diffusion de la lumière plus élevé.

## 5.4 Résultats comparatifs

### 5.4.1 Essais avec peroxyde d'hydrogène

On vise des résultats comparables à la pâte d'épinette noire témoin. À l'aide d'une boucle de programmation (figure 5-9), les équations de régression suivantes sont solutionnées :

```
A(e,f,g,h,i) := | y ← -4
                  | for a ∈ pgi,incPg..pgf
                  |   for b ∈ pei,incPe..pef
                  |     if ex_ST(a,b) ≤ f ∧ en_ST(a,b) ≤ e ∧ bl_ST(a,b) ≥ g ∧ scat_ST(a,b) ≥ h ∧ IR_ST(a,b) ≥ m
                  |       | y ← a
                  |       | break
                  |       y
```

**Figure 5-9 Boucle d'itération pour solutionner les équations de régression**

Pour les essais sans trempage des copeaux :

- Énergie
  - o La solution de l'équation de l'énergie spécifique de raffinage doit être plus petite que 10 MJ/kg.
- Matières extractibles
  - o Le résultat de la solution de cette équation doit être plus petit ou égal à 0,91 %, le teneur en extractible de la PTM d'épinette noire témoin.
- Blancheur
  - o Le résultat de la solution de cette équation doit être plus grand ou égal à 55,2 % ISO, la blancheur de la pâte de référence.
- Coefficient de diffusion de la lumière
  - o C'est une propriété importante. Lorsqu'une solution alcaline est utilisée, le coefficient de diffusion chute. On fixe, comme condition de départ, le coefficient de diffusion à 50,5 m<sup>2</sup>/kg.

- Indice de rupture

- Le résultat de la solution de cette équation doit être plus grand ou égal à 40,8 Nm/g, l'indice de rupture de la pâte de référence.

On cherche à couvrir la totalité de la plage de pin gris étudiée. Au Tableau 5-11 et au Tableau 5-12, la concentration de peroxyde alcalin injectée dans l'œil du raffineur qui donne les résultats les plus près des objectifs mentionnés au paragraphe précédent est extraite pour un pourcentage de pin gris donné.

**Tableau 5-10 Résultats sans traitement des copeaux de pin gris par extraction avant la mise en pâte PTM-PA en mélange avec l'épinette noire**

	PTM témoin	Solution de blanchiment au peroxyde alcalin		
Épinette, %	100	80	70	60
Pin gris, %	0	20	30	40
$\text{H}_2\text{O}_2$ et NaOH (en proportion de 1:1)				
Prétraitement	Non	Non	Non	Non
Œil du raffineur	0	1,8	1	0,9
Énergie spécifique de raffinage, MJ/kg	7,39	9,17	8,96	8,67
Rejet, %	2,47	0,72	0,97	1,14
Bouffant, $\text{cm}^3/\text{g}$	3,28	3,02	3,12	3,23
Indice de rupture, Nm/g	40,8	41,0	40,9	41,1
TEA, g/cm	35,8	31,6	33,3	34,7
Indice d'éclatement, $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$	2,23	2,45	2,38	2,30
Blancheur, % ISO	55,2	59,8	58,7	58,4
Opacité, %	94,2	91,2	91,8	91,8
Coeff. de diffusion de la lumière, $\text{m}^2/\text{kg}$	51,7	51,5	51,7	51,8
Matières extractibles, %	0,91	0,71	0,78	0,83

Au Tableau 5-11, on observe que sans trempage de copeaux on peut ajouter jusqu'à 40% de pin gris dans le mélange sans qu'il soit nécessaire d'utiliser une concentration élevée de peroxyde alcalin dans l'œil du raffineur. À un niveau de 40% de pin gris dans le mélange et 0,9% de peroxyde alcalin dans l'œil du raffineur, on arrive à maintenir les propriétés de la PTM d'épinette noire, même le coefficient de diffusion de la lumière.

Une faible concentration (1%) de peroxyde alcalin permet d'atteindre le niveau de matières extractibles de la pâte témoin et du même coup limite l'énergie spécifique de raffinage et la chute du coefficient de diffusion de la lumière. La solution de blanchiment agit de façon efficace, même avec 40% de pin gris, on obtient un gain de blancheur très significatif.

Pour les essais avec trempage des copeaux de pin gris :

- Énergie
  - o La solution de l'équation de l'énergie spécifique de raffinage doit être plus petite que 12 MJ/kg. Comparativement aux essais sans trempage, il a été impossible d'obtenir une énergie de moins de 10 MJ/kg, ce qui explique la nécessité de cet ajustement aux contraintes.
- Coefficient de diffusion de la lumière
  - o C'est une propriété importante. Étant donné que le trempage des copeaux a un effet important sur le coefficient de diffusion, on fixe, comme condition de départ, le coefficient de diffusion à 49,5  $\text{m}^2/\text{kg}$ , ce qui représente un faible compromis par rapport aux essais sans trempage.
- Matières extractibles, blancheur et indice de rupture
  - o Les mêmes contraintes ont été utilisées.

**Tableau 5-11 Résultats avec traitement des copeaux de pin gris par extraction avant la mise en pâte PTM-PA en mélange avec l'épinette noire**

	PTM témoin	Solution de blanchiment au peroxyde alcalin		
Épinette, %	100	80	70	60
Pin gris, %	0	20	30	40
$\text{H}_2\text{O}_2$ et NaOH (en proportion de 1:1)				
Prétraitement	Non	Oui	Oui	Oui
Œil du raffineur	0	0,5	0,5	0,9
Énergie spécifique de raffinage, MJ/kg	7,39	11,1	10,7	10,3
Rejet, %	2,47	0,42	0,51	0,59
Bouffant, $\text{cm}^3/\text{g}$	3,28	2,95	3,06	3,16
Indice de rupture, Nm/g	40,8	44,3	42,9	41,5
TEA, g/cm	35,8	35,8	35,8	31,6
Indice d'éclatement, $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$	2,23	2,68	2,59	2,51
Blancheur, % ISO	55,2	58,2	57,5	58,0
Opacité ISO, %	94,2	91,6	92,2	92,2
Coeff. de diffusion de la lumière, $\text{m}^2/\text{kg}$	51,7	50,0	50,0	50,0
Matière extractibles, %	0,91	0,49	0,53	0,57

Au Tableau 5-12, les résultats des essais avec trempage des copeaux de pin gris avant la mise en pâte PTMPA en mélange avec l'épinette noire. Comme avec les essais sans trempage, la consommation d'énergie spécifique de raffinage est moins élevée lorsqu'un pourcentage élevé de pin gris est utilisé. Le trempage augmente l'énergie spécifique de raffinage et affecte la qualité des fibres de pin gris. Les propriétés mécaniques, comme l'indice de rupture, diminuent avec l'augmentation de la proportion de pin gris trempé dans le mélange de copeaux.

Même avec une faible concentration de peroxyde alcalin au raffineur (0,5%), on obtient un gain de blancheur. Toutefois, avec 0,5% de peroxyde alcalin, le coefficient de diffusion de la lumière demeure très loin de la pâte témoin. Il est lourdement affecté par le trempage des copeaux de pin gris ce qui limite les possibilités d'utiliser ce traitement.

Donc selon les données des tableaux 5-10 et 5-11, on peut conclure que :

- L'utilisation d'un pourcentage élevé de pin gris (40%) dans le mélange sans trempage des copeaux de pin gris favorise l'obtention d'une pâte de faible énergie. Le trempage des copeaux produit une pâte d'énergie spécifique de raffinage élevée sur toute la plage étudiée.
- L'unique action de la solution de peroxyde alcalin (1%) parvient à abaisser le pourcentage de matières extractibles sous une PTM d'épinette noire.
- Les propriétés mécaniques comparables à la pâte témoin d'épinette noire sont obtenues avec ou sans trempage des copeaux de pin gris. Les fibres de pin gris trempées diminuent les propriétés mécaniques.
- Avec ou sans trempage, on obtient un niveau de blancheur acceptable.
- Sans trempage des copeaux, le coefficient de diffusion de la lumière de la PTM témoin ( $51,7 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) est maintenu, le trempage des copeaux abaisse le coefficient de diffusion de la lumière ( $50 \text{ m}^2/\text{kg}$ ).

#### **5.4.2 Essais avec substitution du peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium**

Pour pouvoir comparer les deux agents de blanchiment, les résultats au tableau 5-4 sont obtenus avec des concentrations équivalentes de peroxyde et des pourcentages identiques de pin gris.

**Tableau 5-12 Résultats comparatifs : Substitution du peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium**

	PTM	Peroxyde d'hydrogène	PBS
Épinette, %	100	70	70
Pin gris, %	0	30	30
$\text{H}_2\text{O}_2$ et NaOH (en proportion de 1:1)			
Prétraitement	Non	Non	Non
Œil Du raffineur	0	1,5	1,5 (eq)
Énergie spécifique, MJ/kg	7,39	9,15	8,57
Rejets, %	2,47	0,60	0,87
Bouffant, $\text{cm}^3/\text{g}$	3,28	3,05	2,88
Indice de rupture, mN/g	40,8	42,0	40,4
TEA, g/cm	35,8	37,3	36,1
Indice d'éclat., $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$	2,23	2,50	2,31
Blancheur, % ISO	55,2	59,0	57,5
Opacité, %	94,2	91,5	93,6
Coeff. de diffusion, $\text{m}^2/\text{kg}$	51,7	51,2	52,8
Matières extractibles, %	0,91	0,65	0,37

Selon les données observées au tableau 5-4, la pâte obtenue lorsqu'on substitue le peroxyde d'hydrogène par le perborate de sodium, possède des propriétés optiques supérieures, tout comme Leduc et al. l'avaient observé [62], alors que le peroxyde d'hydrogène permet d'obtenir des propriétés mécaniques supérieures. Le peroxyde généré par le perborate de sodium semble moins affecté par la chaleur du raffinage que le peroxyde d'hydrogène.

Le perborate de sodium arrive à peine à atteindre les propriétés mécaniques de la PTM d'épinette noire de référence. Même si les propriétés optiques sont nettement supérieures à la pâte témoin et que l'énergie spécifique de raffinage est moins élevée que les pâtes où le peroxyde d'hydrogène est utilisé, on ne peut abaisser le pourcentage de perborate sous 1,5%. Toutefois, les résultats

sont sommaires et il faudrait une étude plus approfondie sur le perborate pour confirmer son efficacité sur les mélanges pin gris-épinette noire.

La substitution de 1,5% de peroxyde d'hydrogène par 4,4% de perborate de sodium :

- Nécessite une énergie spécifique de raffinage comparable
- Occasionne une légère perte de propriétés mécaniques et un gain de coefficient de diffusion
- Abaisse la teneur en extractibles à des pourcentages plus faibles qu'avec le peroxyde d'hydrogène.

## Chapitre 6 - Conclusions

L'utilisation de peroxyde alcalin s'avère très efficace lors de la mise en pâte du pin gris. La lignine et les matières extractibles réagissent avec le peroxyde et l'alcali ce qui réduit la teneur en matières extractibles dans la pâte produite. Par ce processus, on arrive à une teneur en matières extractibles comparable à une pâte commerciale d'épinette. Le peroxyde alcalin permet le maintient de la blancheur de la pâte de pin gris à un niveau acceptable.

Bien que la majorité des problèmes associés au pin gris aient été surmontés, les précédentes études nous ont démontré que l'utilisation du pin gris comme unique approvisionnement était difficilement réalisable. Pour les pâtes à 100% pin, comme dans les études précédentes il faut concéder quelques points d'opacité pour atteindre un niveau de matières extractibles et des propriétés mécaniques compétitives.

Pour limiter la chute du coefficient de diffusion de la lumière sans totalement éliminer le pin gris de l'approvisionnement en copeaux, un mélange de pin gris avec l'épinette noire a été étudié. Une caractérisation des mélanges pin gris – épinette noire à l'intérieur d'un procédé au peroxyde alcalin nous a permis de connaître l'impact du pin gris dans de tels mélanges.

Le procédé utilisé est constitué de plusieurs étapes, soit un trempage des copeaux de pin gris dans une solution de peroxyde alcalin pour une période de 30 minutes et les copeaux imbibés sont ensuite comprimés. L'épinette noire et le DTPA sont ajoutés au pin gris au premier stade de raffinage pressurisé où une solution de blanchiment est injectée directement dans l'œil du raffineur. Suivant le premier stade de raffinage, la pâte est lavée et neutralisée pour ensuite se diriger vers un deuxième stade de raffinage atmosphérique.

Trois variables ont été évaluées dans le plan expérimental utilisé dans cette étude, la proportion de pin gris et la charge de peroxyde alcalin injectée dans l'œil du raffineur et le trempage des copeaux de pin gris. Dans un deuxième volet, le peroxyde d'hydrogène a été remplacé par le perborate de sodium afin d'observer l'effet de cet agent sur de tels mélanges.

Les essais ont été séparés en deux blocs. Afin de circonscrire l'effet du trempage des copeaux sur la proportion de pin gris de tels mélanges. Un premier bloc d'essais n'utilisait pas de trempage des copeaux alors que le deuxième bloc l'utilisait.

Les résultats des études précédentes ont influencé notre plan expérimental. La charge de peroxyde alcalin dans la solution de blanchiment est fixée entre 0,5% et 2,5%. Sachant que 20% de pin gris dans la recette avait un impact sur la production, nous avons utiliser cette valeur référence. Le pourcentage de pin gris utilisé dans les mélanges a été fixé entre 20% et 40%.

Un plan expérimental de type CCD (central composite design) est utilisé dans cette étude de façon à limiter le nombre d'essais. Les variables étudiées sont la charge de peroxyde alcalin et le pourcentage de pin gris dans le mélange. Le trempage de la fraction de pin gris est la variable fixée.

L'évaluation du perborate comme agent de blanchiment se limite à une répétition du point central du plan expérimental sans trempage en remplaçant le peroxyde par le perborate :

- 4,4% de perborate de sodium (équivalent à 1,5% peroxyde d'hydrogène)
- 30% de pin gris

Pour cette partie d'étude, notre objectif visait le maintient des propriétés de la pâte, des propriétés mécaniques et les propriétés optiques d'une PTM faite à

100% d'épinette noire. Une série d'essais à 100% épinette noire est utilisée comme référence (pâte témoin). Les PTM ont été produites avec le même approvisionnement d'épinette noire que celui utilisé lors des mélanges pin gris-épinette noire. Aucun traitement (trempage ou liqueur de blanchiment dans l'œil du raffineur) n'a été appliqué à la PTM de référence.

Dans les études précédentes, le coefficient de diffusion de la lumière et l'énergie spécifique de raffinage freinaient l'utilisation du pin gris. On observait que pour obtenir des propriétés mécaniques acceptables, une charge assez importante de peroxyde alcalin devait être appliquée. Le ramollissement des fibres de pin gris en présence d'alcali occasionne une demande accrue d'énergie de raffinage pour atteindre les propriétés mécaniques voulues, une diminution des matières fines et la baisse du coefficient de diffusion de la lumière.

#### A) **Trempage des copeaux de pin gris**

Dans notre étude, le trempage préalable des copeaux de pin gris abaisse le pourcentage de matières extractibles bien en dessous du pourcentage de la pâte de référence mais ce traitement à un effet négatif sur le coefficient de diffusion de la lumière. Les propriétés mécaniques de la pâte finale bénéficient du traitement sur la fraction pin gris, toutefois, l'énergie de raffinage est accrue à un niveau avoisinant 11 MJ/kg. La demande énergétique supplémentaire est occasionnée par le ramollissement des fibres. L'action du raffinage à un effet moins immédiat sur les fibres puisqu'elles se conforment aux barres des plaques de raffineur plutôt que de se sectionner. Le sectionnement des fibres de pin gris est moins important d'où la hausse de l'indice d'éclatement. Toutefois l'action du raffinage n'arrive pas à développer suffisamment la surface des fibres, ce qui se reflète dans l'indice de rupture.

Les propriétés de force sont nettement supérieures lorsqu'un traitement est appliqué sur la fraction de pin gris. On a certainement avantage à explorer plus en profondeur ce type de procédé.

La blancheur est nettement supérieure à la PTM de référence, par contre le coefficient de diffusion de la lumière est très affecté par le trempage des copeaux de pin gris qui augmente l'alcalinité de la pâte. Cela ne signifie pas que le trempage des copeaux est inefficace, par contre, les résultats nous indiquent que la solution de trempage des copeaux est probablement trop agressive. Une solution moins concentrée nous aurait permis de mieux évaluer l'effet conjoint des deux traitements (trempage et solution de blanchiment). Une série d'essais où une solution de trempage moins concentrée couplé à une faible addition de peroxyde alcalin dans l'œil du raffineur pourrait mener à des résultats intéressant du point de vue des propriétés de force. De cette façon, la proportion d'épinette noire serait exempte de traitement chimique trop sévère et un gain de coefficient de diffusion de la lumière pourrait être observé.

#### **B) Injection de solution au peroxyde alcalin/perborate dans l'œil du raffineur**

Le pourcentage de pin gris influence peu le pourcentage de matières extractibles. L'énergie spécifique de raffinage diminue (9,17 MJ/kg – 8,67 MJ/kg) quand le pourcentage de pin gris dans le mélange augmente (20% - 40%). L'influence du peroxyde alcalin sur l'énergie spécifique de raffinage est plus marquée que la proportion de pin gris. Il y a beaucoup d'avantages à utiliser un traitement chimique plus doux

Sans traitement des copeaux de pin gris, l'augmentation de la proportion de pin gris de 20% à 40% améliore légèrement l'indice de rupture, alors qu'on

s'attendait à une baisse. En regardant le bouffant des essais sans trempage, on remarque qu'il est proportionnel au pourcentage de pin gris dans la recette alors que l'indice d'éclatement est inversement proportionnel au pourcentage de pin gris. La grossièreté des fibres de pin gris augmente le volume spécifique. On parvient développer les propriétés de la fibre avec la combinaison du traitement chimique de sorte que la cohésion entre les fibres est affectée de façon positive d'où l'amélioration de l'indice de rupture.

Les propriétés optiques des pâtes où le pin gris n'est pas trempé se comparent avantageusement à la PTM d'épinette noire de référence. Pour atteindre les propriétés de force de la pâte d'épinette, une faible concentration de peroxyde alcalin est nécessaire, l'alcalinité de la pâte est moins élevée ce qui se reflète sur le coefficient de diffusion de la lumière où aucune baisse n'est observé.

Le nombre d'essais ne nous permet pas d'évaluer adéquatement l'efficacité du perborate de sodium appliqué sur les mélanges pin gris-épinette noire. Comparativement à un essai similaire avec le peroxyde d'hydrogène, on constate que le perborate permet d'obtenir de meilleurs résultats des propriétés optiques, un taux d'enlèvement des extractibles plus élevé et une plus faible consommation d'énergie de raffinage. Toutefois, les propriétés de force sont moins bien développées, on maintient les propriétés mécaniques le pâte témoin.

La présente étude démontre clairement qu'une faible charge de peroxyde alcalin injectée dans l'œil du raffineur suffit à maintenir les propriétés optiques et mécaniques d'une PTM d'épinette noire. En utilisant une faible charge de peroxyde alcalin, on limite la chute du coefficient de diffusion de la lumière de l'épinette noire tout en observant un gain des propriétés mécaniques ainsi qu'une hausse de la blancheur. Il est possible d'augmenter la teneur maximale de pin gris de 20% à 40% en utilisant une concentration de peroxyde (0,9%) injecté dans l'œil du raffineur. De cette façon, la consommation d'énergie de

raffinage demeure basse aux alentours de 9 MJ/kg et le traitement est suffisant pour l'enlèvement des matières extractibles.

Les études précédentes sur le pin montraient qu'il était difficile d'atteindre un coefficient de diffusion de la lumière satisfaisant avec les pâtes à 100% pin gris. Selon nos résultats obtenus, il est possible d'ajouter 40% de pin gris au mélange tout en conservant les propriétés mécaniques et le coefficient de diffusion comparable à une PTM d'épinette noire.

Des pâtes obtenues, celles qui ont le plus de potentiel commercial, utilisent peu de peroxyde alcalin et une proportion élevée de pin gris ce qui est très encourageant, car de telles pâtes rencontrent les objectifs de l'étude. De plus, ce procédé simple est probablement le plus susceptible de retenir l'attention de l'industrie. Les essais sans pré traitement démontrent beaucoup de potentiel. Cette méthode ne demande aucun ajout d'équipement pour être implantée donc peu ou pas d'investissement.

Les résultats de cette étude sont donc très encourageants. Selon ces derniers, l'utilisation potentielle du pin gris en mélange avec l'épinette se fera en utilisant une charge de produit chimique modérée afin de maintenir le coefficient de diffusion, peu importe le procédé utilisé.

Le perborate de sodium permet d'obtenir un gain notable de coefficient de diffusion de la lumière ainsi qu'une diminution de l'énergie de raffinage. Le perborate s'avère plus agressif que le peroxyde pour éliminer les extractibles. Il est toutefois moins efficace pour développer les propriétés mécaniques que le peroxyde. Dû à son efficacité, cela nous permettrait de réduire la charge de produits chimiques appliquée toutefois une étude plus approfondie permettrait d'affirmer avec plus de certitude cette supposition.

En conclusion, cette étude rencontre les objectifs fixés avec succès

- On arrive à ajouter 40% de pin gris dans la recette tout en maintenant des propriétés optiques et mécaniques comparables à une PTM d'épinette noire avec une consommation d'énergie spécifique de raffinage comparable à une pâte commerciale.
- Le coefficient de diffusion de la lumière n'est plus un obstacle à l'utilisation du pin gris.

Elle ouvre aussi la porte à de nouvelles études

- L'optimisation du pré traitement de la fraction pin gris du mélange pin gris – épinette noire. La présente étude ne permet pas de trancher avec certitude sur l'efficacité d'un tel traitement vu la sévérité de ce dernier.
- L'utilisation d'une proportion plus importante de pin gris dans la recette.
- L'évaluation du perborate de sodium. Une étude entièrement consacrée au perborate nous permettrait de conclure de façon plus franche sur son efficacité.

**Annexe A Données expérimentales : pâtes de référence à 100%  
épinette**

Tableau A-1 Pâte de référence : PTM d'épinette noire à 100%

CODE	E-1X	E-2X	E-1	E-3	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1784 6,42	1823 6,56	1887 6,79	2274 8,19	1835 6,61
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	173	171	145	126	150
Rejets Pulmac (0,004), %	3,89	3,82	2,88	2,56	3,02
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,79	0,78	0,79	0,73	0,79
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,81	1,83	1,85	1,76	1,86
Moyenne pondérée en poids, mm	2,46	2,51	2,52	2,44	2,53
Matières fines pondérée en poids, %	5,80	6,08	5,91	6,91	5,81
Coarseness (mg/m) R 28	0,28	0,28	0,26	0,25	0,26
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,94	0,97	0,96
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,7	60,4	60,6	60,0	60,7
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,30	3,36	3,17	3,03	3,21
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,30	0,32	0,33	0,31
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	30,7	36,6	40,1	39,8	40,0
Longueur de rupture (km)	3,13	3,73	4,09	4,05	4,08
Allongement (%)	1,49	1,91	1,93	1,81	1,96
TEA (g/cm)	18,0	28,6	31,7	28,7	32,1
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,06	2,07	2,23	2,62	2,17
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,2	11,1	9,5	9,9	9,6
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	55,1	55,4	55,7	55,8	55,6
Opacité, %	93,5	93,6	94,0	94,4	93,9
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	48,9	50,0	51,6	53,5	51,3
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,97	2,98	2,97	3,16	2,95
L*	87,3	87,5	87,6	87,5	87,6
a*	0,31	0,28	0,23	0,23	0,23
b*	15,0	15,0	14,9	14,6	14,9

Tableau A-2 Pâte de référence : PTM d'épinette noire à 100% (Reprise)

CODE	RE-3	RE-4	RE-5	RE-6	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1769 6,37	2010 7,24	2130 7,67	2311 8,32	2273 8,18
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	246	200	167	147	
Rejets Pulmac (0,004), %	3,79	3,07	2,67	1,70	1,91
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,78	0,76	0,80	0,76	0,78
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,84	1,83	1,88	1,83	1,84
Moyenne pondérée en poids, mm	2,52	2,53	2,52	2,52	2,52
Matières fines pondérée en poids, %	5,83	6,48	5,87	6,22	6,08
Coarseness (mg/m) R 28	0,29	0,28	0,26	0,26	0,26
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,87	0,86	0,86
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,7	60,4	63,2	60,4	61,3
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,71	3,48	3,37	3,36	3,36
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,27	0,29	0,30	0,30	0,30
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g)	33,2	35,9	40,3	41,5	41,5
Longueur de rupture (km)	3,38	3,66	4,11	4,23	4,23
Allongement (%)	1,71	1,84	2,20	2,27	2,28
TEA (g/cm)	22,6	26,8	38,4	38,9	39,6
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,75	2,04	2,22	2,31	2,30
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	10,2	9,9	10,7	10,3	10,4
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	54,7	55,0	54,8	54,9	54,8
Opacité, %	93,0	93,4	94,6	94,3	94,5
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	47,8	49,5	50,8	52,4	52,0
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,80	2,98	3,00	3,15	3,11
L*	87,5	87,5	87,4	87,4	87,4
a*	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45
b*	15,6	15,4	15,3	15,3	15,3

**Annexe B Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir  
de copeaux de pin gris traités**

**Tableau B-1 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 20% de pin gris et 0,5% de peroxyde alcalin**

CODE	R1-4	R1-6	R1-7	R1-8	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2316 8,34	2498 8,99	2704 9,73	3588 12,92	3036 10,93
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	280	246	205	68	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,79	0,69	0,47	0,25	0,34
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,96	0,93	0,85	0,79	0,81
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,10	2,07	2,05	1,83	1,97
Moyenne pondérée en poids, mm	2,76	2,72	2,65	2,47	2,58
Matières fines pondérée en poids, %	4,26	4,61	5,45	5,74	5,78
Coarseness (mg/m) R 28	0,25	0,26	0,22	0,22	0,22
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16
Matières extractibles(DCM), %			0,47		0,47
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	62,3	62,5	60,7	62,2	61,0
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,42	3,33	3,20	2,60	2,99
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,29	0,30	0,31	0,38	0,34
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	36,4	37,0	40,0	51,2	43,5
Longueur de rupture (km)	3,71	3,77	4,08	5,22	4,43
Allongement (%)	1,79	1,83	1,82	2,00	1,88
TEA (g/cm)	27,7	28,4	29,5	42,4	33,2
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,89	2,08	2,30	3,25	2,65
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,9	11,0	11,9	9,9	11,1
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,7	58,0	58,1	58,1	58,2
Opacité, %	90,8	90,8	91,0	93,5	91,6
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	45,4	46,0	47,8	53,5	49,7
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,93	1,92	1,98	2,41	2,09
L*	89,3	89,5	89,4	89,1	89,4
a*	-0,45	-0,53	-0,48	-0,37	-0,48
b*	15,9	16,0	15,8	15,3	15,7

**Tableau B-2 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 40% de pin gris et 0,5% de peroxyde alcalin**

CODE	2-4	2-6	2-7	2-8	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2231 8,03	2326 8,37	2862 10,30	3315 11,93	2933 10,56
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	312	255	174	87	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,99	0,61	0,58	0,37	0,46
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,48	0,92	0,85	0,80	0,93
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,08	2,06	1,95	1,89	2,14
Moyenne pondérée en poids, mm	1,41	2,70	2,62	2,57	2,87
Matières fines pondérée en poids, %	2,22	4,77	5,30	5,79	5,85
Coarseness (mg/m) R 28	0,24	0,27	0,25	0,25	0,26
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,47	0,59	0,53
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,7	61,3	61,5	60,3	61,1
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,53	3,70	3,15	2,79	3,16
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,28	0,27	0,32	0,36	0,32
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	34,0	32,7	40,0	48,9	41,2
Longueur de rupture (km)	3,47	3,33	4,08	4,99	4,20
Allongement (%)	1,69	1,75	1,94	1,99	1,94
TEA (g/cm)	23,4	23,7	32,7	39,3	33,4
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,86	1,88	2,35	2,95	2,45
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	13,4	14,1	12,0	10,5	12,0
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	56,4	56,9	58,0	58,2	58,0
Opacité, %	90,6	91,1	91,9	92,6	92,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,6	46,8	49,7	53,2	50,7
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,11	2,12	2,11	2,16	2,13
L*	88,9	89,2	89,4	89,4	89,4
a*	-0,12	-0,44	-0,43	-0,43	-0,49
b*	16,4	16,5	15,8	15,6	15,8

**Tableau B-3 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 20% de pin gris et 2,5% de peroxyde alcalin**

CODE	3-4	3-5	3-6	3-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA	2254	2381	2547	3120	2969
(MJ/kg)	8,11	8,57	9,17	11,23	10,69
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	300	300	228	128	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,71	0,32	0,26	0,11	0,13
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	1,03	1,01	0,97	0,90	0,92
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,19	2,17	2,14	2,03	2,06
Moyenne pondérée en poids, mm	2,80	2,79	2,77	2,69	2,71
Matières fines pondérée en poids, %	3,96	3,99	4,23	4,65	4,55
Coarseness (mg/m) R 28	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,47	0,58	0,52
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,8	61,5	61,0	60,8	60,8
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,09	2,76	2,85	2,62	2,68
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,32	0,36	0,35	0,38	0,37
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	38,7	39,5	42,9	48,8	47,4
Longueur de rupture (km)	3,95	4,03	4,37	4,97	4,84
Allongement (%)	1,80	1,76	2,25	2,21	2,29
TEA (g/cm)	28,4	28,9	40,4	44,5	44,8
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,31	2,64	2,69	3,08	2,98
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	13,2	13,9	12,1	11,1	11,2
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	55,8	55,5	55,0	56,2	55,7
Opacité, %	88,6	88,7	89,5	90,8	90,5
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	42,6	42,0	43,7	47,7	46,7
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,64	1,63	1,80	1,98	1,94
L*	89,7	89,6	89,4	89,6	89,5
a*	-0,93	-0,94	-0,89	-1,03	-0,98
b*	18,3	18,5	18,5	17,7	18,0

**Tableau B-4 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 40% de pin gris et 2,5% de peroxyde alcalin**

CODE	4-3	4-5	4-6	4-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA	2416	2483	2618	3359	3303
(MJ/kg)	8,70	8,94	9,42	12,09	11,89
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	331	283	252	144	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,45	0,33	0,21	0,16	0,15
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,98	0,98	0,94	0,89	0,89
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,14	2,14	2,10	1,99	2,00
Moyenne pondérée en poids, mm	2,75	2,75	2,72	2,64	2,65
Matières fines pondérée en poids, %	4,25	4,23	4,55	4,85	4,83
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,25	0,25	0,23	0,23
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,46	0,42	0,44
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	59,7	60,2	60,8	60,8	60,8
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,13	3,06	2,89	2,63	2,65
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,32	0,33	0,35	0,38	0,38
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	33,7	37,9	40,4	46,4	46,2
Longueur de rupture (km)	3,44	3,87	4,12	4,74	4,71
Allongement (%)	1,72	2,05	2,19	2,08	2,11
TEA (g/cm)	23,6	32,5	37,6	39,8	40,2
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,09	2,34	2,51	3,16	3,13
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	13,6	12,6	12,3	10,7	10,8
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	58,9	59,1	59,4	59,6	59,6
Opacité, %	87,0	88,0	87,8	89,9	89,7
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	42,2	44,2	43,7	48,5	48,2
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,34	1,50	1,32	1,65	1,62
L*	90,5	90,6	90,7	90,6	90,6
a*	-1,56	-1,54	-1,60	-1,44	-1,45
b*	16,9	16,9	16,9	16,4	16,5

**Tableau B-5 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin**

CODE	5-4	5-5	5-6	5-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA	2227	2255	2645	3299	3154
(MJ/kg)	8,02	8,12	9,52	11,88	11,36
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	318	294	239	127	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,55	0,47	0,31	0,15	0,17
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	1,01	0,97	0,94	0,87	0,88
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,19	2,15	2,09	1,97	1,99
Moyenne pondérée en poids, mm	2,83	2,80	2,69	2,63	2,63
Matières fines pondérée en poids, %	4,10	4,74	4,56	5,01	4,96
Coarseness (mg/m ) R 28	0,25	0,25	0,25	0,24	0,25
Coarseness (mg/m ) R 100	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,49	0,50	0,50
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,8	61,3	61,2	61,3	61,4
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,39	3,36	3,23	2,79	2,90
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,30	0,31	0,36	0,35
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	34,5	36,2	38,4	49,6	46,8
Longueur de rupture (km)	3,52	3,69	3,92	5,06	4,77
Allongement (%)	1,68	1,87	1,86	2,37	2,25
TEA (g/cm)	23,6	28,3	29,5	49,9	44,7
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,92	2,05	2,19	2,92	2,74
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	10,9	13,0	12,0	11,6	11,9
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,5	58,1	58,2	58,6	58,6
Opacité, %	89,4	89,4	90,3	91,4	91,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,1	44,8	46,9	50,1	49,5
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,81	1,63	1,80	1,96	1,90
L*	89,6	90,0	89,9	89,9	90,0
a*	-0,70	-0,72	-0,68	-0,66	-0,66
b*	16,5	16,6	16,4	16,0	16,1

**Tableau B-6 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition)**

CODE	6-5	6-6	6-7	6-8	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2177 7,84	2369 8,53	2880 10,37	3200 11,52	2981 10,73
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	371	273	167	118	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,63	0,41	0,38	0,29	0,32
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,93	0,91	0,82	0,83	0,83
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,07	2,09	1,92	1,94	1,95
Moyenne pondérée en poids, mm	2,70	2,76	2,60	2,63	2,64
Matières fines pondérée en poids, %	4,73	4,89	5,43	5,54	5,42
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
Coarseness (mg/m) R 100	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
Matières extractibles(DCM), %			0,47	0,50	0,49
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,0	61,0	60,4	60,5	60,6
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,37	3,08	2,93	2,69	2,82
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,32	0,34	0,37	0,36
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g)	35,4	39,4	43,2	49,3	45,9
Longueur de rupture (km)	3,61	4,02	4,40	5,02	4,68
Allongement (%)	1,76	1,93	2,10	2,25	2,16
TEA (g/cm)	25,1	31,4	36,3	45,8	40,6
Ind. éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,04	2,29	2,97	3,14	2,99
Ind. déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	13,4	11,2	11,5	11,5	11,3
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,9	58,6	59,2	59,4	59,2
Opacité, %	88,8	89,5	90,5	91,4	90,8
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,0	45,8	49,3	51,9	50,2
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,67	1,64	1,66	1,82	1,73
L*	89,8	90,1	90,3	90,3	90,3
a*	-0,76	-0,78	-0,82	-0,80	-0,81
b*	16,4	16,4	16,1	15,9	16,0

**Tableau B-7 Pâte faite de copeaux de pin gris traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition)**

CODE	R7-4	R7-5	R7-6	R7-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2216 7,98	2323 8,36	2683 9,66	3283 11,82	3173 11,42
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	360	320	234	134	
Rejets Pulmac (0,004), %	0,59	0,34	0,21	0,19	0,17
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,97	0,97	0,99	0,86	0,89
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,14	2,15	2,15	1,94	1,99
Moyenne pondérée en poids, mm	2,78	2,79	2,81	2,55	2,61
Matières fines pondérée en poids, %	4,26	4,33	4,08	5,22	4,96
Coarseness (mg/m) R 28	0,25	0,24	0,22	0,23	0,23
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18
Matières extractibles(DCM), %			0,44	0,54	0,49
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,5	61,8	59,9	60,5	60,4
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,34	3,21	2,97	2,59	2,66
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,31	0,34	0,39	0,38
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	34,1	34,9	41,2	47,8	46,7
Longueur de rupture (km)	3,47	3,56	4,20	4,87	4,76
Allongement (%)	1,73	1,90	2,00	2,24	2,20
TEA (g/cm)	23,9	27,8	33,5	44,5	42,5
Ind. éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,91	2,12	2,48	2,98	2,90
Ind. déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	12,0	13,6	11,6	11,6	11,6
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	58,2	58,2	58,3	59,2	59,0
Opacité, %	88,2	89,0	88,9	90,0	89,8
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	43,1	43,9	45,1	48,4	47,8
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,49	1,62	1,67	1,65	1,66
L*	90,2	90,1	90,1	90,4	90,3
a*	-0,84	-0,86	-0,80	-0,84	-0,83
b*	16,8	16,7	16,5	16,2	16,2

**Annexe C Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir  
de copeaux de pin gris non traités**

**Tableau C-1 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 15,9% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin**

CODE	8-2	8-3	8-6	8-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1858 6,69	2105 7,58	2228 8,02	2809 10,11	2471 8,90
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	270	232	187	96	
Rejets Pulmac (0,004), %	2,15	1,51	0,78	0,51	0,55
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,92	0,85	0,86	0,80	0,82
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,07	1,93	1,97	1,86	1,90
Moyenne pondérée en poids, mm	2,74	2,57	2,62	2,49	2,53
Matières fines pondérée en poids, %	4,59	5,16	5,08	5,87	5,48
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,24	0,24	0,23	0,23
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,51	0,67	0,59
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,4	60,9	60,7	60,8	60,6
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,45	3,43	3,13	2,58	2,96
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,29	0,29	0,32	0,39	0,34
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	32,9	31,5	39,4	43,9	40,2
Longueur de rupture (km)	3,35	3,21	4,02	4,47	4,09
Allongement (%)	1,67	1,38	1,89	1,81	1,77
TEA (g/cm)	22,5	16,8	30,4	31,7	28,8
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,89	2,08	2,31	2,82	2,51
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,1	11,4	11,6	11,0	11,5
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	58,7	59,1	59,9	60,1	60,0
Opacité, %	90,2	90,3	90,7	91,8	91,0
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	46,2	47,3	49,8	52,8	50,9
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,79	1,81	1,65	1,81	1,71
L*	89,8	89,9	90,3	90,2	90,3
a*	-0,71	-0,84	-0,87	-0,83	-0,89
b*	15,9	15,8	15,6	15,3	15,5

**Tableau C-2 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 44,1% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin**

CODE	9-2	9-3	9-6	9-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1876 6,75	2076 7,47	2343 8,43	2636 9,49	2514 9,05
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	286	247	183	126	
Rejets Pulmac (0,004), %	2,29	1,95	1,01	0,85	0,91
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,85	0,88	0,84	0,83	0,84
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,02	2,01	1,99	1,98	1,98
Moyenne pondérée en poids, mm	2,74	2,66	2,67	2,68	2,67
Matières fines pondérée en poids, %	5,42	4,96	5,44	5,52	5,41
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,27	0,23	0,26	0,25
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,18	0,17	0,19	0,18
Matières extractibles(DCM), %			0,56	0,73	0,65
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,1	60,7	61,3	60,7	61,0
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,05	3,44	3,28	3,00	3,18
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,33	0,29	0,31	0,33	0,32
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	34,0	34,4	41,1	45,2	43,1
Longueur de rupture (km)	3,46	3,51	4,19	4,60	4,39
Allongement (%)	1,91	1,82	2,06	2,14	2,09
TEA (g/cm)	26,6	25,7	35,3	40,1	37,4
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,77	1,90	2,38	2,56	2,48
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,4	11,4	11,7	10,8	11,2
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	58,3	58,9	59,7	59,9	59,9
Opacité, %	89,2	89,7	90,5	91,1	90,9
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,5	46,4	49,1	51,4	50,5
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,67	1,65	1,63	1,81	1,73
L*	89,7	90,1	90,4	90,4	90,4
a*	-0,57	-0,58	-0,70	-0,61	-0,65
b*	16,1	16,0	15,8	15,6	15,7

Tableau C-3 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 0% de peroxyde alcalin

CODE	10-1	10-2	10-3	10-6	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA	1619	1733	1961	2416	2286
(MJ/kg)	5,83	6,24	7,06	8,70	8,23
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	214	235	207	138	
Rejets Pulmac (0,004), %	3,44	3,17	2,73	1,88	2,13
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,76	0,78	0,78	0,75	0,75
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,86	1,89	1,89	1,83	1,84
Moyenne pondérée en poids, mm	2,59	2,59	2,58	2,53	2,54
Matières fines pondérée en poids, %	6,45	6,32	6,16	6,63	6,52
Coarseness (mg/m) R 28	0,27	0,28	0,27	0,26	0,26
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			1,14	1,12	1,13
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,3	60,1	59,9	59,8	59,9
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,63	3,81	3,67	3,21	3,29
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,28	0,26	0,27	0,31	0,30
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g)	27,4	27,2	30,4	39,4	37,3
Longueur de rupture (km)	2,79	2,78	3,10	4,02	3,80
Allongement (%)	1,50	1,60	1,59	1,89	1,78
TEA (g/cm)	16,0	17,1	19,1	29,7	26,7
Ind. éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,65	1,68	1,81	2,24	2,13
Ind. déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,0	11,3	10,1	12,5	11,7
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	54,8	55,4	55,5	56,3	55,9
Opacité, %	92,5	92,7	92,9	93,7	93,4
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	47,3	49,0	49,6	53,5	52,1
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,65	2,66	2,67	2,84	2,79
L*	87,7	88,0	88,0	88,2	88,1
a*	0,53	0,42	0,48	0,45	0,49
b*	15,9	15,8	15,7	15,3	15,4

**Tableau C-4 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 2,9% de peroxyde alcalin**

CODE	11-4	11-5	11-6	11-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2266 8,16	2327 8,38	2389 8,60	2733 9,84	2467 8,88
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	190	174	165	111	150
Rejets Pulmac (0,004), %	1,04	0,65	0,64	0,55	0,46
<b>Longueur de fibre FQA OPTEST</b>					
Moyenne arithmétique, mm	0,92	0,89	0,86	0,86	0,84
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,06	2,02	2,01	1,95	1,98
Moyenne pondérée en poids, mm	2,75	2,67	2,69	2,58	2,64
Matières fines pondérée en poids, %	4,56	4,92	5,37	5,16	5,47
Coarseness (mg/m) R 28	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
Coarseness (mg/m) R 100	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18
Matières extractibles(DCM), %			0,48	0,53	0,51
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,6	61,9	61,7	60,4	61,6
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,01	2,96	3,00	2,81	2,95
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,33	0,34	0,33	0,36	0,34
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g)	42,2	44,6	42,3	47,0	44,2
Longueur de rupture (km)	4,31	4,55	4,32	4,79	4,51
Allongement (%)	2,02	2,12	1,90	2,33	2,02
TEA (g/cm)	35,72	40,18	33,37	45,24	37,42
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,44	2,56	2,56	2,88	2,66
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	12,3	10,9	11,9	10,8	11,1
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	55,0	54,4	54,8	55,5	54,6
Opacité, %	91,7	92,9	92,3	92,8	92,9
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	46,8	49,1	48,6	52,1	50,2
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,27	2,59	2,27	2,32	2,42
L*	88,7	88,3	88,8	88,9	88,6
a*	-0,79	-0,67	-0,70	-0,73	-0,65
b*	17,6	17,4	17,9	17,5	17,7

**Tableau C-5 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin**

CODE	12-4	12-5	12-6	12-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	2039 7,34	2129 7,66	2231 8,03	2578 9,28	2459 8,85
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	257	209	191	134	150
Rejets Pulmac (0,004), %	2,16	0,87	0,66	0,58	0,48
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,85	0,85	0,83	0,81	0,82
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,02	2,01	1,93	1,93	1,94
Moyenne pondérée en poids, mm	2,70	2,68	2,59	2,59	2,59
Matières fines pondérée en poids, %	5,58	5,57	5,71	5,91	5,83
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,66	0,74	0,70
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,5	60,6	58,6	59,2	59,0
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,29	3,07	3,19	3,02	3,05
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,33	0,31	0,33	0,33
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	35,7	38,2	36,7	43,0	41,2
Longueur de rupture (km)	3,64	3,90	3,75	4,38	4,20
Allongement (%)	1,95	2,05	1,92	2,36	2,23
TEA (g/cm)	28,82	31,74	27,61	41,06	36,91
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	2,13	2,22	2,34	2,59	2,50
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	12,7	12,3	11,7	11,0	11,2
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,2	57,5	58,4	58,6	58,5
Opacité, %	90,8	90,5	90,5	91,5	91,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	45,9	46,5	48,8	51,3	50,4
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,95	1,98	1,88	2,03	1,98
L*	89,1	89,4	89,7	89,6	89,7
A*	-0,36	-0,42	-0,49	-0,50	-0,50
B*	15,9	16,1	15,7	15,5	15,6

**Tableau C-6 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition)**

CODE	13-3	13-4	13-6	13-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1911 6,88	2212 7,96	2356 8,48	2656 9,56	2617 9,42
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	255	237	200	135	150
Rejets Pulmac (0,004), %	1,63	1,11	0,75	0,43	0,43
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,87	0,84	0,83	0,81	0,81
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,02	1,94	1,93	1,91	1,90
Moyenne pondérée en poids, mm	2,68	2,57	2,60	2,57	2,57
Matières fines pondérée en poids, %	4,98	5,47	5,48	5,66	5,67
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16
Matières extractibles(DCM), %			0,57	0,60	0,58
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,5	60,9	60,7	59,9	60,1
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,19	3,23	3,10	2,92	2,97
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,31	0,31	0,32	0,34	0,34
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g)	35,9	36,4	39,2	44,1	42,8
Longueur de rupture (km)	3,66	3,71	4,00	4,50	4,37
Allongement (%)	1,97	2,01	2,17	2,32	2,29
TEA (g/cm)	29,86	30,51	35,93	41,98	40,60
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,98	2,04	2,36	2,60	2,56
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	10,9	11,5	12,5	11,8	12,2
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,5	58,5	59,2	59,3	59,4
Opacité, %	90,0	90,4	90,8	91,7	91,5
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,4	46,8	49,4	52,4	52,0
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,79	1,81	1,81	2,00	1,94
L*	89,4	89,7	90,1	90,0	90,1
a*	-0,43	-0,53	-0,55	-0,47	-0,51
b*	16,1	15,7	15,7	15,4	15,4

**Tableau C-7 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 1,5% de peroxyde alcalin (répétition)**

CODE	14-3	14-5	14-7	14-8	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1937 6,97	2231 8,03	2584 9,30	2938 10,58	2676 9,63
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	313	231	159	117	150
Rejets Pulmac (0,004), %	1,80	1,03	0,41	0,23	0,40
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,89	0,85	0,80	0,80	0,81
Moyenne pondérée en longueur, mm	2,06	1,98	1,91	1,89	1,91
Moyenne pondérée en poids, mm	2,73	2,67	2,59	2,56	2,59
Matières fines pondérée en poids, %	4,94	5,35	5,74	5,87	5,74
Coarseness (mg/m) R 28	0,25	0,25	0,25	0,23	0,24
Coarseness (mg/m) R 100	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,67	0,70	0,69
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	61,7	60,2	59,8	60,6	60,1
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,52	3,40	3,19	2,94	3,13
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,28	0,29	0,31	0,34	0,32
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	30,9	37,4	41,6	43,3	42,0
Longueur de rupture (km)	3,15	3,81	4,24	4,42	4,28
Allongement (%)	1,63	1,93	2,16	1,89	2,04
TEA (g/cm)	20,96	29,45	37,11	32,26	34,44
Ind. éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,57	2,04	2,29	2,67	2,43
Ind. déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	12,0	11,5	10,7	10,3	10,7
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,7	58,6	59,2	59,2	59,1
Opacité, %	90,5	90,8	91,5	92,3	91,7
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	45,5	48,6	51,8	53,0	51,9
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,94	1,83	1,84	2,14	1,94
L*	89,4	89,8	90,0	89,7	89,9
a*	-0,53	-0,55	-0,61	-0,74	-0,65
b*	16,1	15,9	15,7	15,2	15,6

**Annexe D Données expérimentales : pâtes fabriquées à partir  
de copeaux de pin gris non traités avec substitution du  
peroxyde par le perborate de sodium**

**Tableau D-1 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 4,4% de perborate de sodium (équivalent 1,5% peroxyde)**

CODE	P-2	P-3	P-5	P-7	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA	1881	2139	2409	2435	2379
(MJ/kg)	6,77	7,70	8,67	8,77	8,56
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	266	242	188	185	150
Rejets Pulmac (0,004), %	2,29	1,91	1,33	1,08	0,78
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,85	0,81	0,79	0,81	0,85
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,99	1,90	1,86	1,86	1,97
Moyenne pondérée en poids, mm	2,68	2,58	2,54	2,51	2,60
Matières fines pondérée en poids, %	5,38	5,61	5,84	5,54	5,27
Coarseness (mg/m) R 28	0,26	0,27	0,26	0,26	0,24
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16
Matières extractibles(DCM), %			0,31	0,46	0,38
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	60,2	59,2	59,2	60,2	62,5
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,31	3,21	2,99	2,97	2,83
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	32,4	35,1	39,7	38,4	39,2
Longueur de rupture (km)	3,30	3,58	4,05	3,91	4,00
Allongement (%)	1,76	1,82	2,05	1,99	2,15
TEA (g/cm)	23,28	25,48	32,39	31,76	37,13
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,76	1,95	2,28	2,15	2,23
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	11,8	10,9	12,7	12,3	16,4
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	56,7	57,2	57,1	57,5	56,7
Opacité, %	90,8	90,2	91,5	91,9	95,0
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	45,8	45,9	49,3	50,3	55,4
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	2,16	2,03	2,19	2,16	2,60
L*	88,8	89,1	89,0	89,2	88,7
a*	-0,42	-0,52	-0,52	-0,59	-0,46
b*	16,1	16,1	16,0	16,0	15,8

**Tableau D-2 Pâte faite de copeaux de pin gris non traités : 30% de pin gris et 4,4% de perborate de sodium (équivalent 1,5% peroxyde)**

CODE	RP-2	RP-3	RP-4	RP-6	Extrapolation à 150 mL de CSF
Énergie spécifique, KwH/TMSA (MJ/kg)	1758 6,33	1888 6,80	2149 7,74	2318 8,34	2384 8,58
<b>PROPRIÉTÉS DE LA PATE</b>					
Indice d'égouttage, mL	309	268	209	164	150
Rejets Pulmac (0,004), %	2,68	2,03	1,63	1,05	0,97
Longueur de fibre FQA OPTEST					
Moyenne arithmétique, mm	0,84	0,76	0,81	0,80	0,82
Moyenne pondérée en longueur, mm	1,96	1,84	1,89	1,86	1,89
Moyenne pondérée en poids, mm	2,64	2,56	2,57	2,52	2,53
Matières fines pondérée en poids, %	5,53	6,40	5,75	6,03	5,77
Coarseness (mg/m) R 28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,25
Coarseness (mg/m) R 100	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17
Matières extractibles(DCM), %			0,35	0,36	0,35
<b>PROPRIÉTÉS DU PAPIER SEC</b>					
<b>STRUCTURALES</b>					
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	62,1	59,7	59,8	61,1	62,1
Volume spécifique (cm <sup>3</sup> /g)	3,25	3,23	3,11	2,99	2,94
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34
<b>RESISTANCE</b>					
Indice de Rupture (N,m/g )	31,8	35,2	32,3	40,6	41,5
Longueur de rupture (km)	3,24	3,59	3,29	4,14	4,23
Allongement (%)	1,71	1,88	1,42	1,98	2,00
TEA (g/cm)	23,16	27,04	17,8	33,52	35,06
Ind, éclatement (kPa*m <sup>2</sup> /g)	1,72	1,90	2,16	2,34	2,40
Ind, déchirure (mN*m <sup>2</sup> /g)	10,4	11,3	9,4	10,9	10,8
<b>PROPRIETES OPTIQUES</b>					
Feuilles 1,2 grammes					
Blancheur (8-457nm), % ISO	57,7	57,8	58,2	58,2	58,2
Opacité, %	90,5	90,4	90,8	91,8	92,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	44,9	46,6	48,0	49,7	50,1
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	1,93	2,01	2,01	2,13	2,14
L*	89,3	89,3	89,4	89,4	89,4
a*	-0,63	-0,63	-0,60	-0,67	-0,68
b*	15,9	15,8	15,6	15,7	15,7

## Bibliographie

---

- 1 Tyrväinen, J., Law, K.-N., Valade, J. L., 1997, « *Alkaline-peroxide interstage treated mechanical pulp from jack pine, Part 1 : Introduction and pulp physical properties* », Pulp Pap. Can. 98(6) : T191-T196.
- 2 Tyrväinen, J., Law, K.-N., Valade, J. L., 1997, « *Alkaline-peroxide interstage treated mechanical pulp from jack pine, Part 2 : Pulp optical properties, color reversion, extractive content, and process implication* », Pulp Pap. Can. 98(7) : T223-T227.
- 3 Lanouette, R., Valade, J. L, Thibault, J., 1997, « *Optimisation of an alkaline peroxyde interstage treatment of jack pine (*Pinus banksiana Lamb.*) using a D-Optimal design*», Can. J. Chem. Eng. 75(2) :70-78.
- 4 Lanouette, R., Valade, J. L., Thibault, J., 1997, « *High yield pulping of jack pine*», Tappi proceedings: 329-333.
- 5 Lanouette, R., Valade, J. L., Law, K.-L., 1999, « *Pâte thermomécanique de pin gris : réduction du contenu en matières extractibles à l'aide de prétraitement sur les copeaux*», CTE (Québec) : p59-64.
- 6 Lanouette, R., Valade, J. L., Law, K.-N., 2000, « *Influence of chip pre-treatments on the reduction of extractives content in high yield pulping of jack pine*», Pulp and Paper Can. 101(5) : T143-T146.
- 7 Law, K. N., Valade, J. L., Yang, K.C., 1998, « *Fiber Development in Thermomechanical pulping: comparison between black bpruce and jack pine*», J. Pulp Paper Sci. 24(2) : 73-76.
- 8 Laliberté, D., Shallhorn, P. M., Karnis, A., 1987, « *Comparison of TMP and CTMP properties from spruce and pin swmill chips*», Pulp & Paper Canada 88(3) : T71-T77

- 
- 9 Law, K.-N., Valade, J.L., 1994, «*Status of the utilisation of jack pine (*Pinus banksiana*) in the pulp and paper industry*», Can. J. For. Res. 24 : 2078-2084.
  - 10 Munster, H. F., 1990, «*Alkaline peroxyde mechanical pulping – a revolution in high yield pulping*», Revue A.T.I.P. 44(1) : 11-18.
  - 11 Jossart, D., Barbe, M.C., Lapointe, M., Law, K-N., 1988, «*Properties of mechanical and chemi-mechanical jack pine pulps: Part I – Thermomechanical pulps*», Pulp & Paper Canada 89(4) : 115-122.
  - 12 Barbe, M. C., Janknecht, S., Rémillard, B., Lapointe, M., 1989, «*Properties of mechanical and chemi-mechanical jack pine pulps: Part III – Interstage treated pulps*», 1989 TAPPI Pulping conference (Seattle), Book1:117-128.
  - 13 Gagné, C., Barbe, M.C., Rémillard, B., Lapointe, M., 1990, «*Properties of mechanical et chemimechanical jack pine pulps.(4) Bleaching studies*», Pulp & Paper Canada. 91(6) : 117-122, 124-125, 127-128.
  - 14 Redmond, W. A., Coffey, B. B., Shastri, S., Manchester, D. F., 1971, «*Non-structural chromophoric substances in jack pine wood and pulps*», Pulp Pap. Mag. Can. 72 : 85-92.
  - 15 Pearl, I. A., 1948, «*Nature of chemical components of wood*», Tappi Monogram No 6
  - 16 Hillis, W. E., 1962, «*Wood extractives*», Academic press, New York, N. Y.
  - 17 Wenzl, H. F. J., 1970, «*The chemical technology of wood*», Academic press, New York, N. Y.

- 
- 18 Gentile, V. M., Tschirner, U., Wilder, H. D., 1991, «*The Scott Paper Alkaline Peroxyde High Yield Pulping Process*», International Mechanical Pulping Conference, TAPPI Proc. 199-209.
  - 19 Isenberg, I. H., 1980, «*Pulpwoods of the United States and Canada, Vol.1 – Conifers*», The institute of paper chemistry, Appleton, Wisconsin.
  - 20 Tay, C. H., Manchester, D. F., 1982, «*Jack pine for pulpwood for newsprint manufacture. Part 1. The signifcance of fibre morphology and extractives*», Can. Wood Chem. Symp. (Niagara Falls) Proceedings : 109-114.
  - 21 Panshin, A. J., DeZeeuw, C., 1980, «*Textbook of wood technology*», 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York.
  - 22 Anonyme, 1951, «*Canadian woods, their properties and uses*», Forestry branch, Ministry of ressources and developpement, Canada.
  - 23 Sinclair, G. D., Dymond, D. K., 1973, «*The distribution and composition of extractives in jack pine trees*», Can. J. For. Res. 3(4) : 516-521
  - 24 Corson, S. R., 1983, «*Thermomechanical and refiner mechanical pulps of New Zealand grown radiata pine*», International Mechanical Pulping Conference, Washington, juin.
  - 25 Hatton, J. V., 1995, «*Pulping and papermaking properties of managed second-growth softwoods*», Tappi Pulping conference proceedings, Tappi press (Atlanta) : p. 673.
  - 26 Lee, J., Balatinecz, J. J., Whiting, P., 1988, «*The optical properties of eight eastern canadian wood species part I. The inherent optical properties of the wood*», J. Pulp Pap. Sci. 14(6) : J145-J150.

- 
- 27 Berzins, V. 1966 « *Chemical composition of woods.* » Pulp and Paper Institute of Canada, Pointe-Claire, Que. Res. Note 61.
- 28 Leask, R. A., Kocurek, M. J., 1987, «*Pulp and paper manufacture, vol. 2 3e édition, Mechanical pulping*», Joint textbook committee of the paper industry, Tappi, ACPP.
- 29 Hatton, J. V., Hunt, K., 1990, «*Chemical properties of juvenile and mature wood from second-growth jack pine*», Tappi pulping conference (Toronto) Proc. (Book 2) : 861-871.
- 30 Garceau, J. J., 1989, «Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques», Section technique association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, p.107.
- 31 Garceau, J. J., 1989, «Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques», Section technique association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, p.126.
- 32 Kure, K. A., 1997, «*The alteration of the wood fibers in refining*», International Mechanical Pulping Conference Proc. SPCI (Stockholm), p.137.
- 33 Kärenlampi, P., 1992, «Spruce wood fiber properties and mechanical pulps», *Paperi jaa Puu* 74(8) : 650-664.
- 34 Mohlin, U. B., 1995, «*Fiber developpment in mechanical pulp refining*», International Mechanical Pulping Conference Proc. (Ottawa) CPPA, Montréal, p.71.
- 35 Law, K.-N., Lanouette, R., 2000, «*Effect of mechanical conditioning of chips on the quality of softwood TMP*», *Pulp Pap. Can.* 101(7) : T189-T193.

- 
- 36 Garceau, J. J., 1989, «Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques», Section technique association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, p.96.
- 37 Heitner, C., Hattula, T., 1988, «*Ultra high-yield pulping, Part VI, The effect of sulfonation on the development of fiber properties*», J. Pulp Paper Sci. 14(1) : 6.
- 38 Fennel, F. L., 1962, U.S. Patent 3, 023, 140.
- 39 Ahrel, B., 1980, U.S. Patent 4, 187, 141.
- 40 Heimburger, S., Quick, T., Sabourin, M., Tremblay, S., Shaw, G., 1993, «*One and two stage AP-TMP – A route to high brightness pulp*», Pulping Conf. Tappi Proc. : 205-213.
- 41 Valade, J. L., Lanouette, R., Law, K.-N., Fabry, B., 1995, «*Rapport au ministère des ressources naturelles du Québec*», Trois-Rivières : CRPP/UQTR, 31 pp.
- 42 Sabourin, M. J., Presley, J. R., 1992, «*Low chemical alkaline peroxyde TMP – A mean of upgrading newsprint mill*», Pulping conf., preprints : 1135-1141.
- 43 Garceau, J., J., 1989, «Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques» Section technique association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, p. 208.
- 44 Xu, E. C., 1997, «*Brightness and bleachability of thermomechanical pulp*», 83<sup>rd</sup> annual meeting, technical section CPPA : B61-B69.
- 45 Lee, J., Balatinecz, J. J., Whiting, P., 1989, «*The optical properties of eight eastern canadian wood species IV. Brightness stability*»

- 
- 46 Heitner, C., Hattula, T., 1988, «*Ultra high yield pulping part VI, the effect of sulphonation on the developpement of fiber properties*», J. Pulp Paper Sci. 14(1) : 6.
- 47 Xu, E. C., 1998, «*Chemical treatment in mechanical pulping – Part 3. Pulp yield and chemical pretreatment*», Tappi Pulping conference proceedings : 391-401.
- 48 Lai, Y. – Z., Iwamida, T., 1993, «*Effect of chemical treatments in ultra high yield pulping (1), fiber separation*», Wood Sci. Technol. 27(3) : 195-203.
- 49 Ostberg, G., Salmen, L., 1988, «*Effects of sulfonation on properties of different cell wall layers*», Nordic Pulp and Paper Research Journal (1) : 8-12.
- 50 Xu, E. C., 1997, «*Chemical treatment in mechanical pulping – Part 1. South american eucalyptus (process and properties)*», Tappi Pulping conference proceedings : 985.
- 51 Xu, E. C., 1998, «*Chemical treatment in mechanical pulping – Part 2. North american aspen (process and properties)*», CPPA technical section annual meeting proceedings. : B51.
- 52 Iwamida, T., Sumi, Y., Nakano, J., 1980, «*Factors influence the sheet strength of high yield sulfite pulps*», Cellulose Chem. Technol. 14(4) : 497-506.
- 53 Cisneros, H. A., Williams, G. J., Hatton, J. V., 1992, «*Fiber surface characteristics of hardwood refiner pulps*», Tappi pulping conference proc. 1151.

- 
- 54 Devenyns, J., Deaprez, F., Troughton, N., Plumett, L., 1994, «*Metals control in TCF bleaching*», 1994 TAPPI Pulping conference, San Diego : 381
- 55 Polcin, J., Rapson, H., 1971, «*Sapwood and heartwood groundwood of western hemlock and jack pine. Part III. Influence of solvent extraction on the bleaching of pulps*», Pulp paper mag. Can. 72(10) : T324-T330.
- 56 Read, D. W., Eade, B. D., Slingsby, N. R., 1968, «*The origin and some effets of contaminating metal ions in the groundwood bleaching environment*», Pulp Paper Can. 69(13) : T296-T303.
- 57 Dick, R. H., Andrews, D. H., 1965, «*The bleaching of groundwood pulp with peroxide*», Pulp Paper Can. 66(3) : T201-T208.
- 58 Colodette, J. L., Rothenberg, S., Dence, C. W., 1988, «Factors affecting hydrogen peroxide stability in the brightening of mechanical and chemical pulp. Part I, Hydrogen peroxide stability in the absence of stabilizing system», J. Pulp Paper Sci., 14 (6); J126.
- 59 Whiting, P., Pitcher, J. M., Manchester, D. F., 1984, «Factors affecting the use of chelating agents to aid the brightening of mechanical pulps», J. Pulp Paper Sci. 10 (5); J120.
- 60 Andrews, D. H., Des Rosiers, P., 1966, «*The influence of wood components on the bleach response of jack pine groundwood to peroxide*», Pulp Paper Mag. Can. 67(C) : T119-TT128.
- 61 Polcin, J., Wayman, M., Anderson C. B., Rapson, W. H., 1969, «*Sapwood and Heartwood of western hemlock and jack pine Part 1. Influence of extractives on optical properties*», Pulp Paper Mag. Can. 70(21) : 86-92.

- 
- 62 Leduc, C, Sain, M. M., Daneault, C., 2000, «*Use of new oxidizing agents (peroxide – activated peroxide – perborate) for the bleaching of mechanical pulp*», 86<sup>th</sup> annual meeting, PAPTAC (Montréal), preprint book C : C83-C88
- 63 Akerlund, G., Danielsson, O., Falk, B., Ryrberg, G., 1979, «*Defibrator bleaching – A new concept in TMP*», International Mechanical Pulping Conference (Toronto) Proc. : 237-243.
- 64 Kурдин, J. A., 1979, «*Can energy costs for TMP and RMP be reduced?*», Paper Trade Journal 163(11) : 23-27.
- 65 Sabourin, M. J., Presley, J. R. 1992. «*Low chemical alkaline peroxyde TMP – a mean of upgrading newsprint mills* » Tappi Pulping Conference 1992 Book 3: 1135-1141.