

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE DE MAITRISE

présenté à

l'Université du Québec à Trois-Rivières

comme exigence partielle de la

MAITRISE EN SCIENCES DES PATES ET PAPIERS

par

SOPHIE JANKNECHT

MISE EN PATE MECANIQUE ET
CHIMICO-MECANIQUE DES PINS

DECEMBRE 1990

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 tiens à remercier le Docteur Michel Barbe pour sa précieuse collaboration.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur Robert Lanouette (technicien au Centre de recherche), mesdames Carole Gagné (chercheur scientifique chez HYMAC) et Céline Leduc (étudiante) pour leur assistance et à tout le personnel du Centre de recherches en pâtes et papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour leurs conseils et leurs encouragements. Je désire remercier madame Sylvie Dessureault pour l'aide apportée au niveau de la simulation par ordinateur.

Enfin, merci à ceux et celles qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

RESUME

Historiquement, les procédés mécaniques et chimico-mécaniques de mise en pâte ont été développés dans les pays où l'électricité (énergie) est disponible à de faibles coûts et où la matière première (sapin/épinette) est reconnue pour la fabrication des pâtes et des papiers.

Cette recherche a pour but d'évaluer le mérite de certains procédés de mise en pâte à haut rendement afin de développer les fibres de pin, et plus particulièrement de pin loblolly, en vue d'étendre leur utilisation ou d'améliorer leur qualité pour la production de papier journal et d'autres papiers d'impression.

Le pin loblolly est une essence que l'on retrouve au sud des Etats-Unis. Ce dernier compte à lui seul pour la moitié de l'inventaire en pins du sud des Etats-Unis.

La nature particulière des pins, c'est-à-dire une paroi cellulaire épaisse, un densité élevée et un haut taux de matières extractibles, laisse supposer que les interactions entre les propriétés des pâtes et des papiers peuvent s'avérer différentes comparativement à un mélange

sapin/épinette, en fonction des procédés, des coûts de production et des coûts en capital.

Dans un premier temps, les propriétés de pâtes mécaniques de raffineur (PMR), de pâtes thermomécaniques (PTM), de pâtes chimico-thermomécaniques (PCTM) et de pâtes chimico-mécaniques (PCM) ont été obtenues et comparées à des pâtes thermomécaniques et chimico-thermomécaniques de sapin/épinette. Les résultats sont discutés en fonction des caractéristiques des fibres des différentes essences et des mécanismes de raffinage impliqués dans chacun des procédés de mise en pâte.

Dans un deuxième temps, une analyse technico-économique des différents procédés de mise en pâte a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation "General Energy and Material Balance System" (GEMS). Les résultats combinés des simulations, des conditions de mise en pâte et de blanchiment ainsi que les coûts unitaires en bois, électricité etc. ont été traités subséquemment pour évaluer les coûts de production de chacune des pâtes en plus de prédire les caractéristiques de la pâte blanchie produite et l'impact de chacun des procédés sur les effluents de l'usine.

En combinant les résultats de l'analyse technico-économique et les résultats des propriétés de pâtes des différents procédés de mise en pâte, l'on constate que le gain de propriétés augmente avec les coûts de production. La pâte chimico-thermomécanique de pin loblolly se rapproche de la pâte thermomécanique de sapin/épinette au de la résistance (2%) mais, son coût de production est 24% plus élevé. Les coûts de production des pâtes thermomécaniques de pin loblolly et du sapin/épinette pourraient se comparer (4%), cependant la résistance est de 12% inférieure pour les pâtes de pin loblolly. On ne réussit donc pas à produire une pâte de pin loblolly comparable en termes de propriétés et de coûts de production, à un mélange sapin/épinette. Les mélanges de pâtes utilisées pour obtenir une pâte équivalente seront différents pour le sud des Etats-Unis comparativement à l'est du Canada.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xv
1. INTRODUCTION	1
2. REVUE DE LA LITTERATURE	3
2.1 Distribution géographique des pins	3
2.2 Propriétés intrinsèques des pins	4
2.21 Propriétés physiques	4
2.22 Composition chimique	13
2.3 Procédés de mise en pâte	22
2.31 Pâtes mécaniques de raffineur atmosphérique	22
2.32 Pâtes thermomécaniques	24
2.33 Pâtes chimico-thermomécaniques	27
2.34 Pâtes chimico-mécaniques	29
2.4 Procédés de blanchiment	32
2.41 Blanchiment au peroxyde d'hydrogène	32
2.42 Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	39

3. EXPERIMENTATION	45
3.1 Approvisionnement en bois	45
3.2 Classification des copeaux	45
3.3 Lavage des copeaux	46
3.4 Mise en pâte	46
3.4.1 Appareillage	46
3.4.2 Procédé mécanique	49
3.4.3 Procédé thermomécanique	50
3.4.4 Procédé chimico-thermomécanique	50
3.4.5 Procédé chimico-mécanique	51
3.5 Evaluation des propriétés des pâtes et des papiers ..	53
3.6 Blanchiment	56
3.6.1 Blanchiment au peroxyde d'hydrogène	56
3.6.2 Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	57
4. RESULTATS ET DISCUSSION	59
4.1 Résultats de mise en pâte	59
4.1.1 Comparaison des propriétés des pâtes thermomécaniques de pin loblolly, d'épinette noire, de sapin Beaumier et de pin gris	59
4.1.2 Comparaison des propriétés des pâtes mécaniques et thermomécaniques de pin loblolly avec la pâte de meule d'un mélange sapin/épinette	72
4.1.3 Comparaison des propriétés pour les procédés de mise en pâte thermomécanique et chimico-thermomécanique de pin loblolly	84
4.1.4 Comparaison des propriétés de pâtes mécaniques de raffineur, thermomécaniques, chimico-thermomécaniques et chimico-mécaniques de pin loblolly avec une pâte thermomécanique d'un mélange sapin/épinette	96

4. RESULTATS ET DISCUSSION (suite).....	59
4.2 Résultats de blanchiment	106
4.2.1 Blanchiment des pâtes au peroxyde d'hydrogène	106
4.2.2 Comparaison des résultats avec d'autres essences	112
4.2.3 Blanchiment des pâtes à l'hydrosulfite de sodium	114
4.3 Analyse technico-économique des procédés de mise en pâte pour le pin loblolly	116
4.3.1 Description des procédés de mise en pâte	117
4.3.1.1 Description des sous-systèmes et particularités de mise en pâte	118
4.3.1.2 Système de mise en pâte mécanique de raffineur pressurisé (PMRP)	124
4.3.1.3 Système de mise en pâte thermomécanique (PTM)	125
4.3.1.4 Système de mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM)	127
4.3.1.5 Système de mise en pâte chimico-mécanique (PCM)	129
4.3.2 Le logiciel GEMS	130
4.3.3 Conditions de mise en pâte et de blanchiment .	133
4.3.4 Résultats des simulations	135
4.3.4.1 Caractéristiques de la pâte blanchie .	135
4.3.4.2 Impact sur les effluents d'usine	138
4.3.4.3 Coûts de production de la pâte blanchie	140

5. CONCLUSION	146
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	149
ANNEXES	154
A. Energies de raffinage	154
B. Propriétés des pâtes	161
C. Blanchiment des pâtes	168
D. TAPPI PROCEEDINGS, Pulping Conference 1990, October 14-17, Toronto, p.695-715, Comparison of Loblolly Pine Mechanical and Chemi-mechanical Pulping Processes; Pulp Properties, Process Features and Production Costs	176

LISTE DES FIGURES

Figures

2.1 Distribution du pin loblolly	3
2.2 Distribution géographique des résineux au Canada ...	5
2.3 Distribution géographique des pins au Canada	6
2.4 Distribution géographique des pins aux Etats-Unis et au Mexique	7
2.5 Microphotographies d'une coupe transversale de trachéides pour différentes essences	12
2.6 Structures moléculaires: glucose, mannose, xylose .	14
2.7 Chaîne cellulosique	14
2.8 Structures moléculaires: galactose, arabinose, acide uronique	15
2.9 Structure des glucomannanes	16
2.10 Structure de la lignine des résineux	17
2.11 Rupture de la matrice de bois en fonction de la température de raffinage	25
2.12 Réaction de la lignine à la sulfonation	30
2.13 Structure de α - et Γ - carbonyles	33
2.14 Gain de blancheur en fonction du peroxyde consommé lors du blanchiment	34

2.15 Dissociation du peroxyde en fonction du pH	35
2.16 Effet de l'alcalinité sur la blancheur	38
2.17 Décomposition de l'hydrosulfite à 60 °C	39
2.18 Décomposition de l'hydrosulfite à 70 °C	40
2.19 Décomposition de l'hydrosulfite à 80 °C	40
2.20 Influence du pH sur la décomposition de l'hydrosulfite à 20 °C	41
2.21 Réduction de la lignine par l'hydrosulfite de sodium	42
2.22 Effet du pH et de la température sur le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	43
2.23 Effet du STPP sur le blanchiment du Na ₂ S ₂ O ₄	44
3.1 Unité de cuisson et de raffinage Sunds-Defibrator ..	47
3.2 Schéma d'opération	52
4.1 Relation indice d'égouttage-énergie	60
4.2 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	61
4.3 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	63
4.4 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	64
4.5 Représentation des fibres de différentes essences ..	65
4.6 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	67
4.7 Relation entre la longueur de rupture et le coefficient de diffusion de la lumière	68

4.8 Relation indice d'égouttage-énergie	73
4.9 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	74
4.10 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	78
4.11 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	79
4.12 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	80
4.13 Relation indice d'égouttage-énergie	85
4.14 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	85
4.15 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	87
4.16 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	89
4.17 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	92
4.18 Schématisation de la relation existant entre les différentes propriétés optiques	93
4.19 Relation indice d'égouttage-énergie	97
4.20 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	98
4.21 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	100

4.22 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	101
4.23 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage	104
4.24 Blanchiment de pâtes mécaniques	106
4.25 Blanchiment de pâtes chimico-thermomécaniques	108
4.26 Blanchiment de pâtes mécaniques et chimico- mécaniques	109
4.27 Blanchiment au peroxyde de différentes essences ..	113
4.28 Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	115
4.29 Représentation schématique des procédés de mise en pâte mécaniques et chimico-mécaniques	117
4.30 Diagramme d'écoulement du système de lavage des copeaux	118
4.31 Diagramme d'écoulement des pâtes du système de tamisage et d'épuration	120
4.32 Diagramme d'écoulement des pâtes du système de blanchiment au peroxyde en un stade	121
4.33 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte mécanique de raffineur pressurisé (PRMP)	125
4.34 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte thermomécanique (PTM)	126
4.35 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM)	127
4.36 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte chimico-mécanique (PCM)	130

4.37 Schéma bloc pour la simulation du procédé PCTM ..	132
4.38 Coûts de production de chacun des procédés	145

> LISTE DES TABLEAUX

Tableaux

2.1	Caractéristiques des fibres d'espèces papetières ...	9
2.2	Composition chimique du pin loblolly	13
2.3	Composition chimique de différentes espèces papetières	19
2.4	Pâte de meule et pâte mécanique de raffineur de pin loblolly	22
2.5	Propriétés de pâtes mécaniques de pin loblolly	26
2.6	Comparaison de procédés de mise en pâte pour le pin loblolly	28
3.1	Normes standard lors des essais physiques	54
3.2	Produits chimiques et conditions de blanchiment ...	58
4.1	Comparaison de pâtes thermomécaniques	70
4.2	Comparaison de PM, PMR et de PTM à énergie constante et à indice d'égouttage donné	81
4.3	Comparaison de PCTM et de PTM à énergie constante et à indice d'égouttage donné	95
4.4	Comparaison de pâtes mécaniques et chimico- mécaniques	105
4.5	Blanchiment des pâtes PMR, PTM, PCTM et PCM	111

4.6	Blanchiment de différentes essences	113
4.7	Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium et au peroxyde d'hydrogène	115
4.8	Conditions d'opération pour chacun des procédés ..	134
4.9	Caractéristiques de la pâte blanchie	135
4.10	Données environnementales	138
4.11	Coûts de production de la pâte (US\$/Tm)	142
4.12	Coûts unitaires	143

1. INTRODUCTION

La nature particulière des pins, c'est-à-dire une paroi cellulaire épaisse, un denier élevé et un haut taux de matières extractibles, laisse supposer que les interactions entre les propriétés des pâtes et des papiers peuvent s'avérer différentes comparativement à un mélange traditionnel de sapin et d'épinette, en fonction des procédés, des coûts de production et des coûts en capital.

Une quantité appréciable de résultats sont disponibles sur les différents procédés de mise en pâte utilisant des mélanges sapin/épinette. Cependant, l'on peut constater qu'il n'existe que peu d'information technique au niveau des propriétés de pâtes de pins. A cause du nombre limité de publications sur la mise en pâte mécanique et chimicomécanique des pins, il est d'intérêt de produire plus de résultats expérimentaux sur la mise en pâte des pins et plus particulièrement du pin loblolly, considérant l'importance grandissante de ces procédés de mise en pâte.

Le pin loblolly peut être qualifié comme la pierre angulaire de l'industrie du pin au sud des Etats-Unis⁽¹⁾. Sauf dans l'état de la Floride où le pin slash prévaut, le pin loblolly est l'espèce dominante dans chacun des états de l'Atlantique et de la région côtière du Golfe du Mexique et au sud du New Jersey. Il compte à lui seul pour la moitié de l'inventaire en pins du sud des Etats-Unis.

2. REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 Distribution géographique

Le pin loblolly atteint à maturité une hauteur de 27 à 40 m et un diamètre allant de 61 à 76 cm⁽¹⁾. Il fait partie des quatre espèces (pin loblolly, shortleaf, longleaf et slash) majeures de pins du sud aux Etats-Unis. Il s'étend de l'Atlantique jusqu'au plaines côtières du Golfe du Mexique et se retrouve à des altitudes pouvant atteindre 245 m au-dessus du niveau de la mer (figure 2.1).

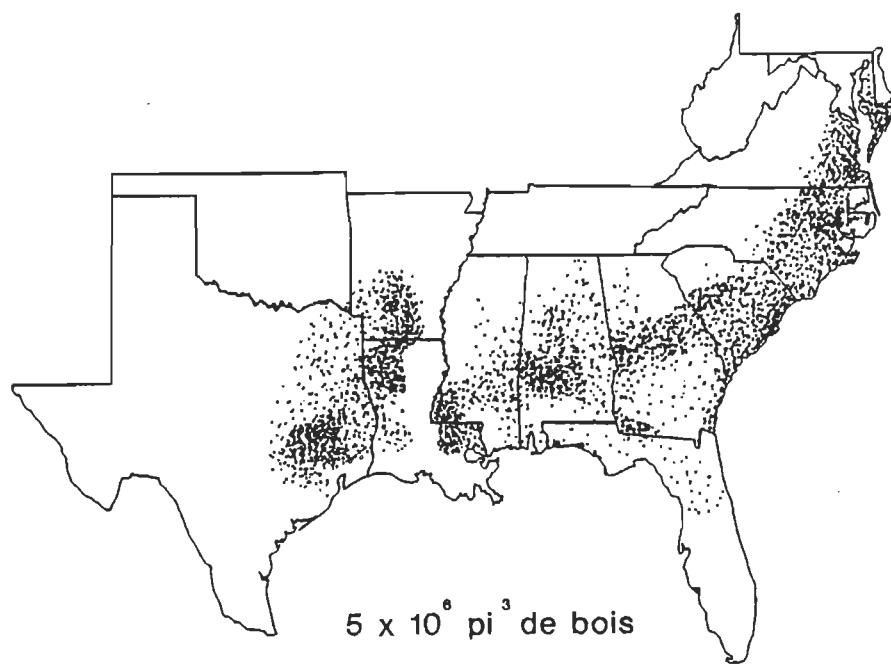


Figure 2.1 Distribution du pin loblolly⁽²⁾

Cette essence peut croître sur une grande variété de sols, des terrains plats et mal drainés de la région des plaines côtières jusqu'aux vieilles terres près des montagnes. Sa croissance est favorisée par un sol ayant un faible drainage en surface, où il y a une couche de terre profonde et un sous-sol ferme. Les figures 2.2, 2.3 et 2.4 permettent de localiser sur le continent nord américain les autres espèces d'épinettes, de sapins et de pins mentionnées dans cette étude pour fin de comparaisons.

2.2 Propriétés intrinsèques des pins

2.2.1 Propriétés physiques

Le poids spécifique du pin loblolly est en moyenne plus élevé dans la région côtière du Golfe et de l'Atlantique qu'à l'intérieur des terres. Le poids spécifique augmente du nord au sud, spécialement dans la partie ouest de l'étendue du pin loblolly (figure 2.1) et le long des côtes de l'Atlantique. Le poids spécifique anhydre du pin loblolly est de 0,54⁽¹⁾ alors que sa densité anhydre est 545 kg/m³⁽¹⁾.

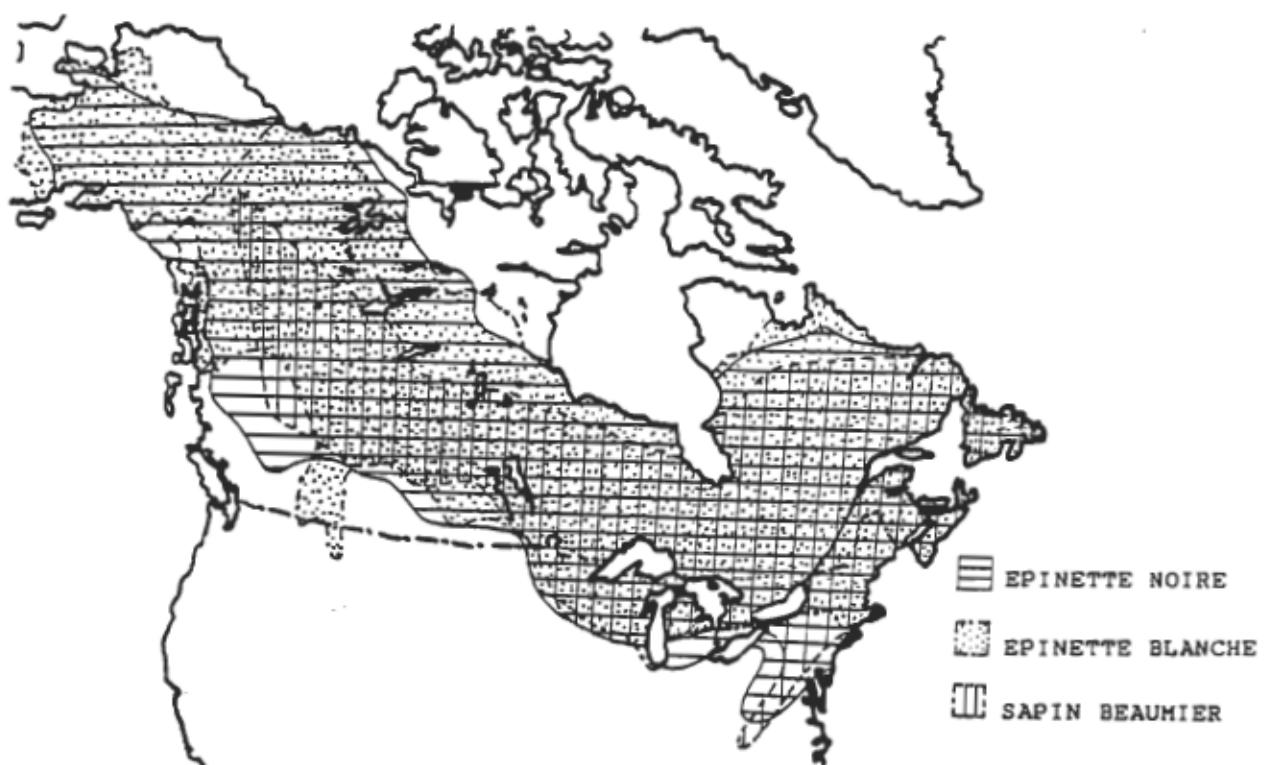


Figure 2.2 Distribution géographique des résineux au Canada⁽¹⁾

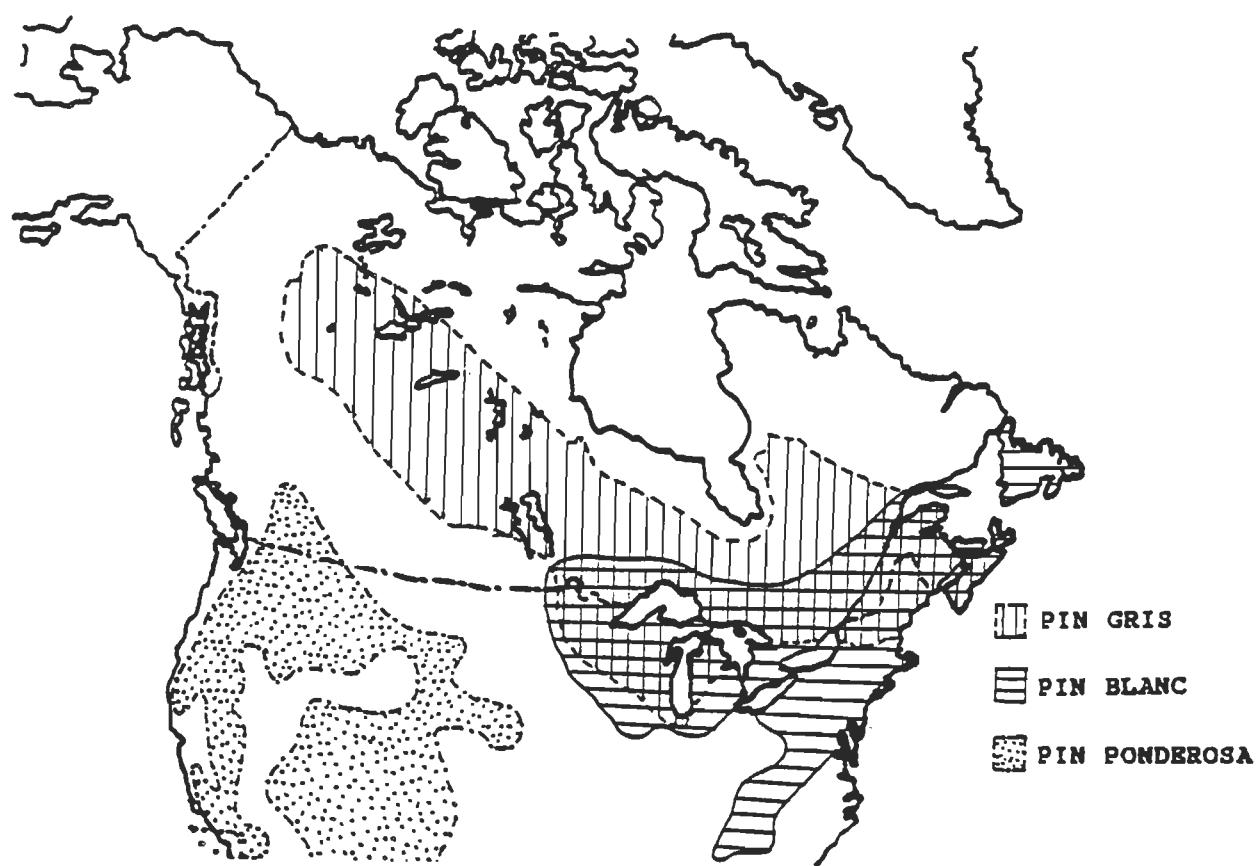


Figure 2.3 Distribution géographique des pins au Canada⁽¹⁾

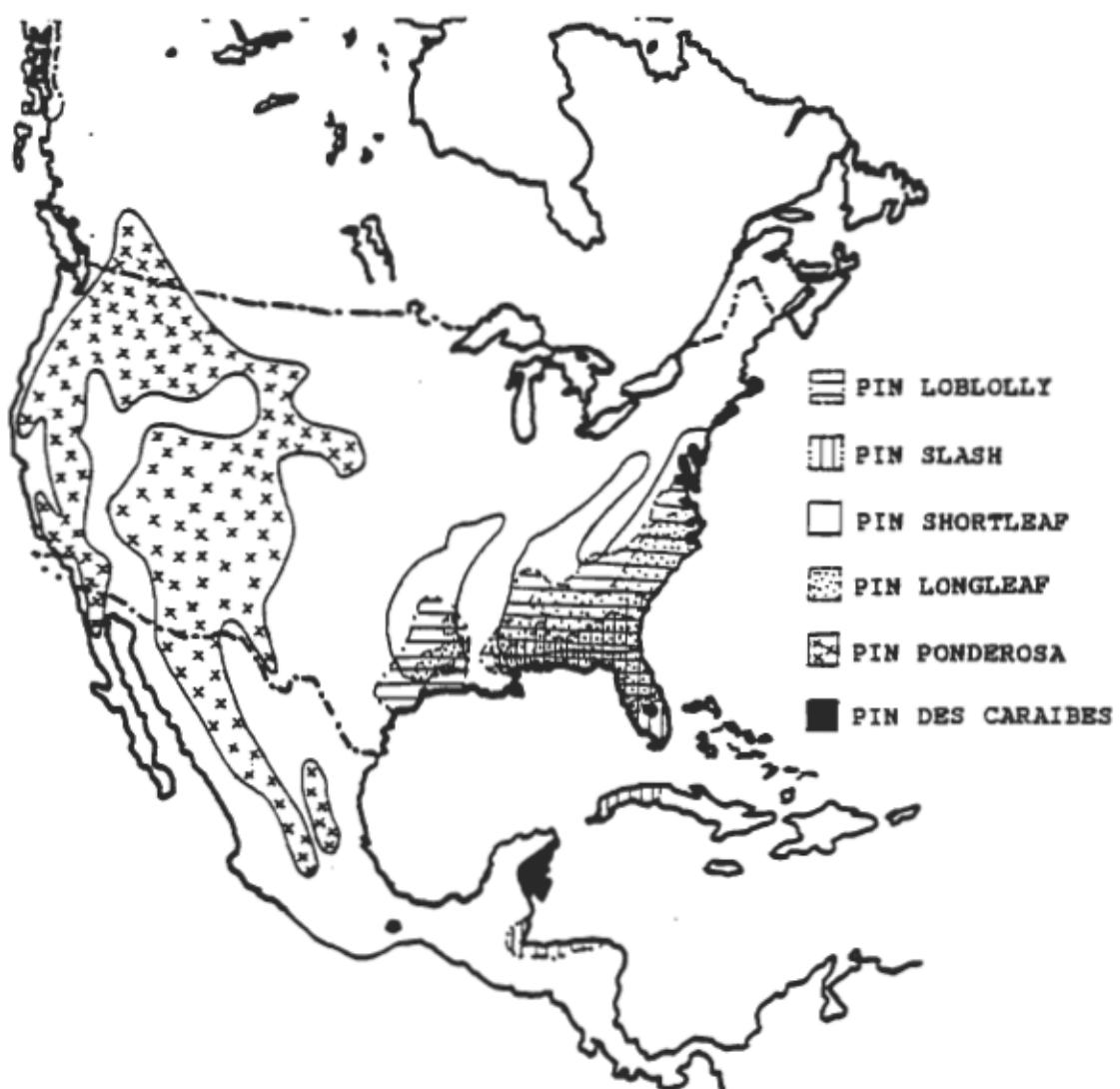


Figure 2.4 Distribution géographique des pins aux Etats-Unis et au Mexique^(1, 3)

Faisant partie du groupe des conifères, le pin loblolly est constitué principalement de trachéides d'une longueur moyenne de 3,6 mm (1,2 à 5,9 mm) et d'un diamètre variant de 35 à 45 μm ⁽¹⁾. La paroi de la fibre est très épaisse, de l'ordre de 3,3 μm ⁽¹⁾.

Le tableau 2.1 présente quelques caractéristiques physiques des fibres de différentes espèces. La particularité du pin loblolly est une paroi de fibre très épaisse ou un denier élevé (poids de fibre par unité de longueur). Le denier varie considérablement avec l'âge du bois et la densité. Cependant, en moyenne le pin loblolly présente toujours un denier supérieur aux autres essences à l'exception du pin slash dont le denier est supérieur^(4, 5) (tableau 2.1). Un denier supérieur confère une plus grande rigidité à la fibre et donc réduit leur habileté à s'affaisser ce qui se traduit par des liaisons interfibres moins nombreuses. Britt⁽⁵⁾ rapporte un denier moyen pour les essences provenant du nord de l'Amérique de 35,4 mg/100m alors que pour les essences au sud du continent un denier moyen de 62,3 mg/100m. En conséquence, les propriétés mécaniques d'un papier fait de fibres de pin loblolly sont inférieures à celles d'un papier fabriqué à partir de fibres d'épinette (pour une même énergie de raffinage).

Tableau 2.1Caractéristiques des fibres d'espèces papetières⁽¹⁾

Essences	Epinette Noire	Sapin Beaumier	Pin Gris	Pin Blanc	Pin Ponderosa
Longueur moyenne des fibres (mm)	3,5	3,5	3,5	2,9	3,6
Diamètre des fibres (μm)	25-30	30-40	28-40	35-45	35-45
Denier (mg/100m)	20,6 16,4 ⁽¹⁾ 29 ⁽²⁾	25	27,8 40 ⁽²⁾	24	26 46 ⁽²⁾
Epaisseur de la paroi (μm)	2,2	-	2,5-2,9	2,2	2,4 ⁽²⁾
Densité anhydre (g/cm^3)	0,45	0,37	0,46	0,42	0,42

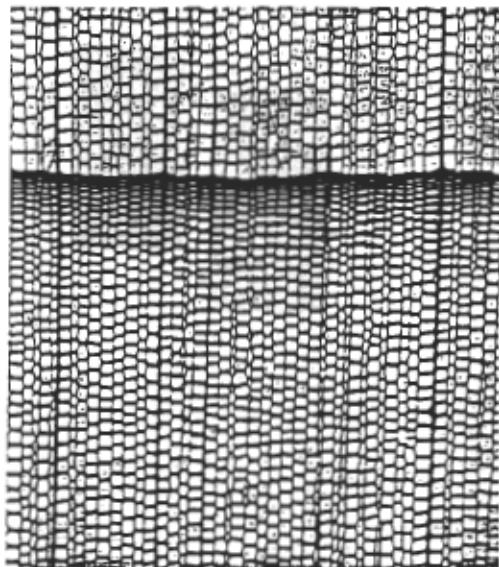
(1) Scallan and Green⁽⁴⁾(2) Britt⁽⁵⁾

Tableau 2.1 (suite)

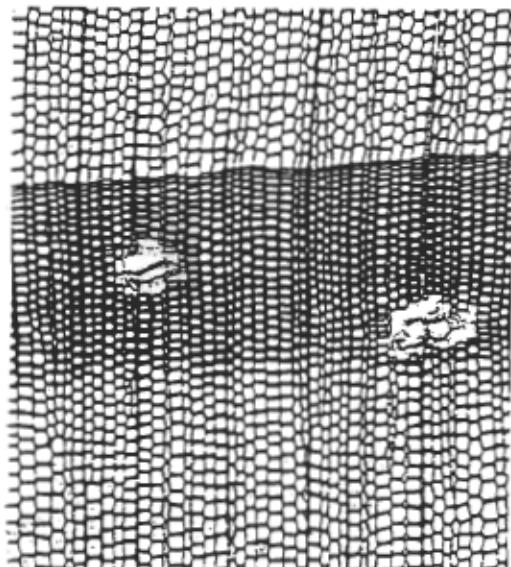
Essences	Pin Loblolly	Pin Slash	Pin Longleaf	Pin Shortleaf	Pin des Caraïbes
Longueur moyenne des fibres (mm)	3,6	4,6	4,9	4,9	2,6-3,9 ⁽³⁾
Diamètre des fibres (µm)	35-45	-	35-45	-	40-50 ⁽³⁾
Denier (mg/100m)	29,5 38,0 ⁽¹⁾ 56,0 ⁽²⁾	28,6 52,0 ⁽¹⁾ 67,0 ⁽²⁾	40,0 ⁽¹⁾	39,1 ⁽¹⁾ 55,0 ⁽¹⁾	-
Epaisseur de la paroi (µm)	3,3	4,2 ⁽²⁾	-	3,4 ⁽²⁾	6,0-7,1 ⁽³⁾
Densité anhydre (g/cm ³)	0,54	0,66	0,62	0,54	0,33-0,68 ⁽³⁾

(1) Scallan and Green⁽⁴⁾(2) Britt⁽⁵⁾(3) Cown⁽⁶⁾ et Worral et al.⁽⁷⁾

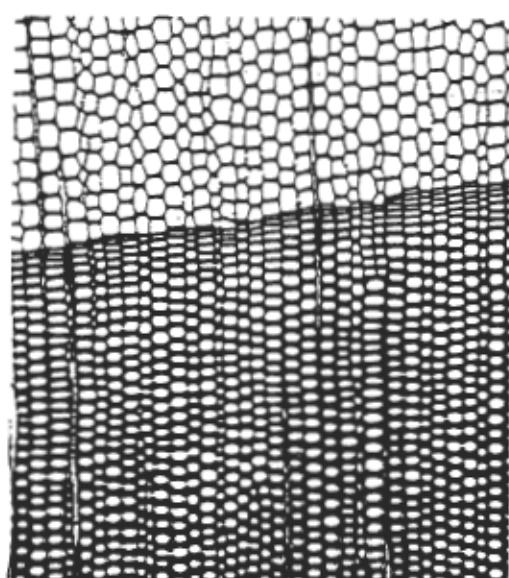
La particularité des pins du sud est le ratio élevé entre la proportion de fibres d'été et de printemps. Les fibres de printemps ont une paroi mince et flexible comme celles de l'épinette. Les fibres d'été, cependant, possèdent une paroi épaisse et rigide. Elles peuvent constituer de 60 à 75% des fibres⁽⁸⁾. A cause de cette proportion importante de fibres d'été, la pâte obtenue à partir de pins du sud sera poreuse, rugueuse et conduira à un papier de faible densité. La densité et le poids spécifique sont de bons indices de la proportion élevée de fibres d'été (tableau 2.1). La figure 2.5 présente des reproductions de microphotographies⁽⁹⁾ d'une coupe transversale de trachéides pour quelques-unes des essences se retrouvant au tableau 2.1. Elles nous permettent de constater de façon visuelle les différences au niveau du denier ou de l'épaisseur de la paroi.



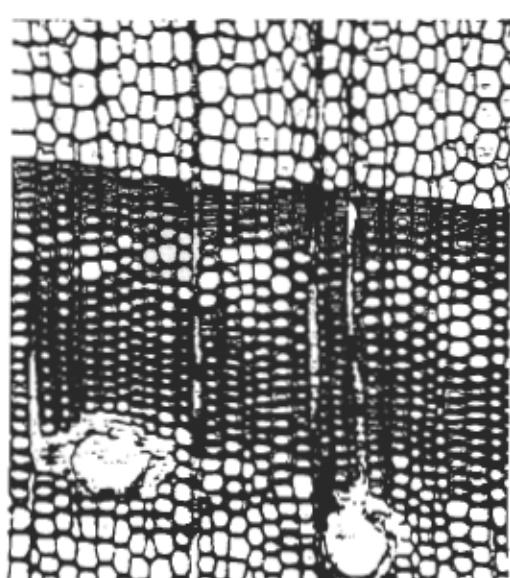
SAPIN BEAUMIER



PIN GRIS



PIN LOBLOLLY



PIN DES CARAÏBES

Figure 2.5 Microphotographies d'une coupe transversale de trachéides pour différentes essences⁽⁹⁾ (65X)

2.2.2 Composition chimique

Les constituants chimiques présents dans le bois sont les polysaccharides (cellulose et hémicelluloses), les lignines et les substances extractibles et inorganiques. Le tableau 2.2 donne la composition chimique du pin loblolly.

Tableau 2.2

Composition chimique du pin loblolly⁽¹⁰⁾

<u>Composé</u>	<u>concentration (%)</u>
Carbohydrates totaux	66-69
Résidus de cellulose	
Glucose	42-46
Résidus d'hémicelluloses	
Glucose	1-5
Mannose	10-11
Xylose	7
Arabinose	1-2
Galactose	1,5-2,5
Lignine	27-30
Acide uronique	1-3
Acetyl	1
Cendres	0,5

Les polysaccharides sont constitués de cellulose et d'hémicelluloses et se retrouvent dans la paroi cellulaire. Leur proportion varie selon l'essence entre 60 et 80% du poids total du bois sec⁽¹¹⁾. Ce sont des hydrates de carbone à haut poids moléculaire dont les unités élémentaires sont des sucres simples i.e. glucose, mannose, xylose (figure 2.6).

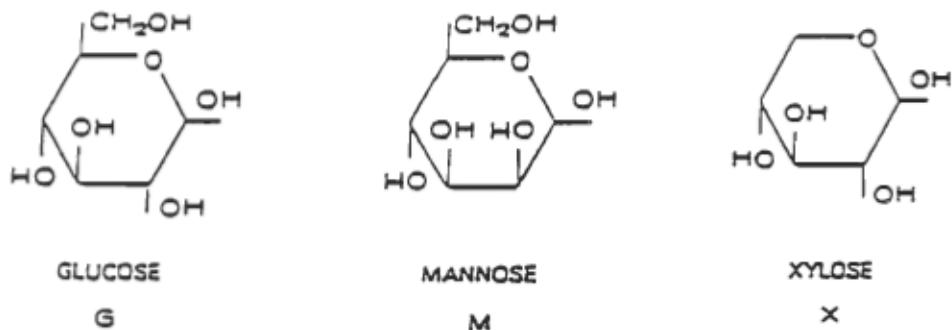


Figure 2.6 Structures moléculaires: glucose, mannose, xylose⁽¹¹⁾

La cellulose est un polymère naturel en longues chaînes linéaires; longueur de 1000 nm, largeur de 0,9 nm et épaisseur de 0,47 nm. Le polymère consiste en une répétition d'un même motif chimique i.e. la cellobiose, qui comprend exclusivement du carbone (44,45%), de l'hydrogène (6,17%) et de l'oxygène (49,38%). Chaque motif glucose est tourné de 180° par rapport aux unités adjacentes⁽¹²⁾. La figure 2.7 représente la chaîne cellulosique.

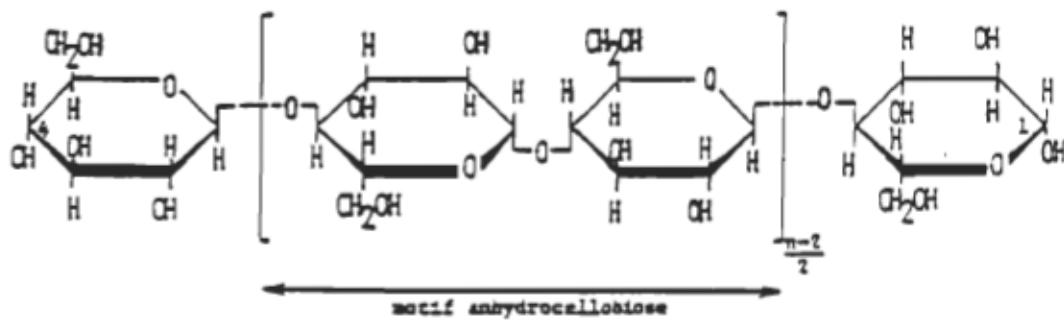


Figure 2.7 Chaîne cellulosique

La chaîne cellulosique contient aussi d'autres sucres, principalement du xylose (figure 2.6) et de l'arabinose (figure 2.8), quoiqu'on les retrouve en très petite quantité (un pour 600 glucoses). Le degré de polymérisation de la cellulose est généralement entre 1000 et 15000 et son poids macromoléculaire est de 1,5 à 2,0 $\times 10^6$.

Les hémicelluloses ont un poids moléculaire plus faible. Les chaînes des hémicelluloses sont plus courtes que celles de la cellulose et sont souvent ramifiées. Les unités répétitives sont constituées d'une combinaison de glucose, de mannose, de xylose, de galactose, d'arabinose et d'acide uronique (figure 2.6 et 2.8).

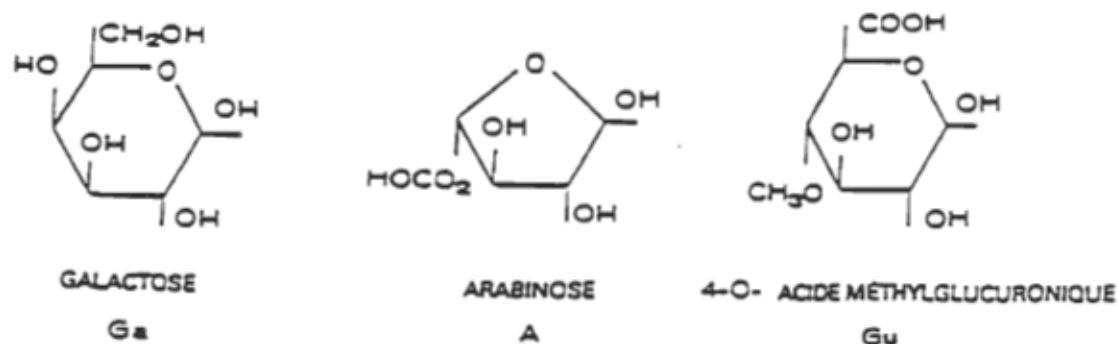


Figure 2.8 Structures moléculaires: galactose, arabinose, acide uronique⁽¹¹⁾

Une variété d'hémicelluloses contenant du xylose est appelée xylanes ou pentosanes. Une autre variété constituée d'unités de mannose liées entre elles et liées au glucose est appelée glucomannanes (figure 2.9).

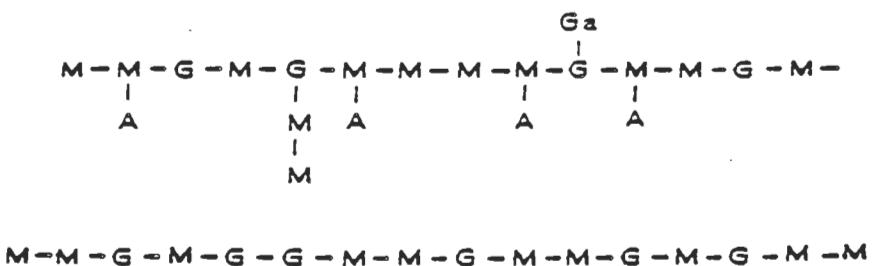


Figure 2.9 Structure des glucomannanes⁽¹¹⁾

La lignine est la deuxième composante chimique majeure du bois (25 à 30% pour les bois résineux). La lignine extraite des pins est très similaire à la structure de la lignine de l'épinette⁽¹¹⁾. Puisque la lignine est hydrophobe, la cellulose et les autres polysaccharides de la paroi cellulaire sont responsables de la flexibilité des fibres à l'état humide. La lignine agit comme agent liant pour les 5 à 15 milliards de trachéides dans chaque pied cube de bois⁽¹⁰⁾.

La lignine ne possède pas de structure chimique répétitive précise, mais elle est composée d'une série de groupes chimiques assez bien définis. La lignine des conifères semble être principalement produite par un type de polymérisation à partir d'un radical libre des dérivés de l'alcool coniférique déshydrogéné. La figure 2.10 montre la structure chimique comprenant les différents groupes chimiques trouvés dans la lignine naturelle de l'épinette. Les données de Sarkkanen et al.⁽¹³⁾ indiquent que la lignine des pins contient des esters d'acétyl en plus des esters phénoliques qui sont aussi formés dans les autres conifères.

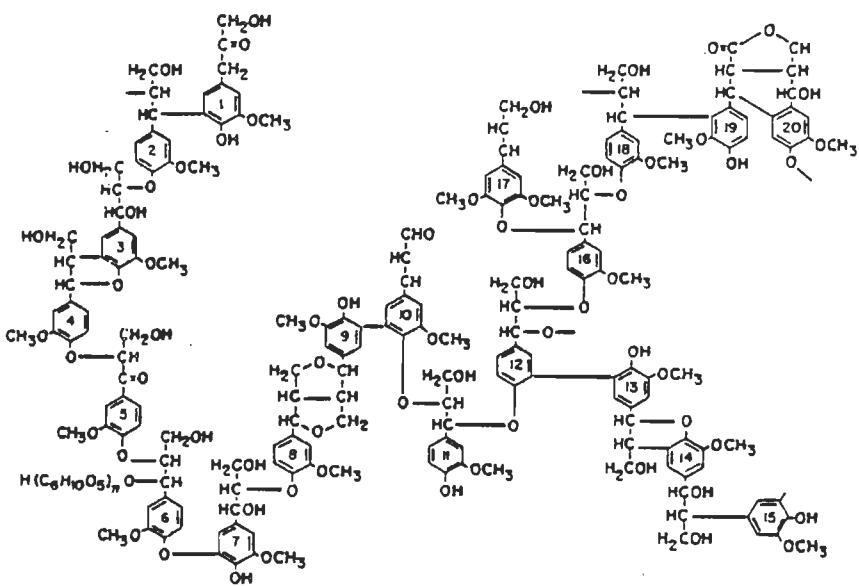


Figure 2.10 Structure de la lignine des résineux⁽¹⁰⁾

La lignine naturelle peut être blanche, ou légèrement colorée. Cependant, sa réactivité et sa tendance à former des chromophores sont responsables de la coloration du bois.

La cellulose, les hémicelluloses et la lignine comptent généralement pour plus de 90% du bois. Le reste est composé de matières extractibles solubles dans les solvants aqueux et organiques et de substances minérales ou inorganiques. L'on compte parmi celles-ci:

- Les huiles volatiles
- Les terpènes et leurs dérivés
- Les acides gras.
- Les acides résiniques
- Les carbohydrates
- Les alcools "polyhydriques"
- Les composés azotés
- Les composés aromatiques
- Les matières inorganiques

Dans le bois, les matières extractibles sont emmagasinées dans les canaux résinifères et les cellules parenchymes principalement. Il a été démontré que pour le pin loblolly, le bois d'été contient un plus faible pourcentage de matières extractibles que le bois de printemps⁽¹⁴⁾. La lignine et les substances solubles dans

les solvants organiques sont responsables de la couleur du bois, car elles peuvent être facilement transformées chimiquement en produits colorés (chromophores).

Le haut taux de matières extractibles (tableau 2.3) constitue un des problèmes majeurs associés à l'utilisation des pins du sud dans la production de pâtes mécaniques. Plusieurs des méthodes permettant de palier aux problèmes rencontrés ont été rapportées⁽⁸⁾.

Tableau 2.3

Composition chimique de différentes espèces papetières⁽¹⁾

Essences	Epinette Noire	Sapin Beaumier	Pin Gris	Pin Blanc	Pin Pon- derosa
Lignine (%)	27,6	29,4	28,3	25,9	35,6
Alpha-cellulose (%)	48,6	49,4	45,2	40,4	37,4
Hémicelluloses (%)	17,4	15,4	16,2	-	-
Pentosanes (%)	10,0	6,4	11,5	8,3	9,4
Solubilité dans					
Alcool-benzène (%)	2,2	3,2	4	4,1	4,4
Ether (%)	0,9-1,2	0,2-1,8	2,5-4,3	2,6-5,9	4,8-5

Tableau 2.3 (suite)

Essences	Pin Loblolly	Pin Slash	Pin Long- leaf	Pin Short- leaf	Pin des Carai- bes(1)
Lignine (%)	28,6	26,8	28,5	26,4	28,7
Alpha-cellulose (%)	44,5	47,3	46,0	47,3	-
Hémicelluloses (%)	-	15,3	-	-	-
Pentosanes (%)	12,5	10	11,8	12,1	11,9
Solubilité dans					
Alcool-benzène (%)	3,2	3,4	4,7	3,6	2,1
Ether (%)	2,4-2,8	1,4-5,1	2,9-6,3	2,3-2,6	-

(1) Cown⁽⁶⁾ et Worral et al.⁽⁷⁾

Une de ces méthodes consiste à opérer lors de la mise en pâte de meule à des températures élevées (65-70°C) afin de favoriser la dissolution de certaines substances organiques dans l'eau. L'utilisation d'agents chimiques a été aussi envisagée: une température de raffinage de 80°C avec addition de Na₂CO₃ ainsi que le contrôle du pH avec de l'alun ou une combinaison d'alun et d'hydroxyde de sodium. Toutefois, le lavage des pâtes à l'aide de presses apparaît comme la solution la plus efficace pour l'élimination de ces substances.

Les matières inorganiques dans le bois comprennent en majeure partie des éléments métalliques et des alcalino-terreux. Ces éléments sont présents dans le sol et se retrouvent inévitablement dans la sève et le bois. Les

matières inorganiques dépassent rarement 0,5% du bois en base anhydre.

Une classification fonctionnelle des éléments, applicables aux pins du sud, a été proposée par Altman et Dittmer⁽¹⁵⁾.

Constituants : C, O, H, N, P, S, Cl

Essentiels :

Majeurs : Ca, K, Mg, Na, Si

Mineurs : B, Mn, Fe, Mg, Cu, Zn

Communément retrouvés : Ag, Al, Ba, Ca, Cr, Ni, Pb,

Rb, Sr, Ti

Une grande variété d'éléments sont représentés, et leur présence dépend de la situation géographique en plus de d'autres facteurs environnementaux locaux.

2.3 Procédés de mise en pâte

2.3.1 Pâte mécanique de raffineur atmosphérique

Les pâtes mécaniques de raffineur sont produites par une répétition de compressions et de décompressions successives des fibres entre les disques du raffineur. Ces raffineurs opèrent à la pression atmosphérique. L'utilisation de deux raffineurs opérant en série produira une pâte de qualité supérieure par rapport à la pâte de meule (tableau 2.4). Cependant, la main ainsi que le taux de bûchettes (tableau 2.5) tendent à être élevés⁽¹⁷⁾.

Tableau 2.4

Pâte de meule et pâte mécanique de raffineur
de pin loblolly⁽¹⁶⁾

	<u>pâte de meule</u>	<u>pâte mécanique de raffineur</u>
CSF (ml)	90	100
Facteur d'éclatement (gf.cm ² .m ² /g)	4	10
Facteur de déchirure (100gf.m ² /g)	38	73
Longueur de rupture (m)	2000	3900
Main (cm ³ /g)	2,45	2,63

Le développement de la technologie associé aux procédés mécaniques de mise en pâte de raffineur a rendu possible

l'utilisation d'une plus grande variété de matière première; copeaux, sciures, planures, fines⁽¹⁸⁾ et feuillus. De plus, ces procédés requièrent une main d'oeuvre moins grande comparativement au procédé de mise en pâte de meule puisqu'il est doté d'un système de contrôle⁽¹⁹⁾.

Les variables principales de contrôle du procédé de mise en pâte de raffineur sont le débit d'alimentation en copeaux (ou en pâte), l'eau de dilution au raffineur et la distance entre les plaques. Il est difficile de mesurer ces trois paramètres de façon précise. Le raffineur est alimenté en volume par une vis d'alimentation ou par un convoyeur, ceci implique que le débit massique de copeaux varie en fonction de la densité et de la teneur en humidité des copeaux. Même en gardant la charge du moteur constante, une alimentation en volume fait en sorte que l'énergie spécifique consommée varie inversement avec la densité du bois. Il en résulte que des copeaux plus denses présenteront des niveaux d'énergie de raffinage plus faibles, des indices d'égouttage plus élevés et une diminution des propriétés de résistance.

2.3.2 Pâte thermomécanique

Le procédé thermomécanique est une modification du procédé mécanique de raffineur atmosphérique (PMR). Il comprend un étuvage à la vapeur des copeaux durant quelques minutes à une pression de 70 à 375 kPa et suivi d'un premier stade de raffinage pressurisé soit à la même pression ou à une pression différente⁽¹⁶⁾.

Dans un système à deux stades de raffinage, le second stage est généralement à la pression atmosphérique. Cependant, plusieurs variations du procédé sont actuellement en opération incluant les systèmes en un stade et en deux stades, où les deux stades sont effectués sous pression (alimentation en tandem)⁽¹⁹⁾.

L'étuvage des copeaux a pour effet de porter le bois à une température supérieure à la température de transition vitreuse de la lignine dans la lamelle mitoyenne, et ainsi faciliter la séparation des fibres en plus de moins endommager leur surface (fibrillation). Même si la température de traitement des copeaux n'est pas très élevée, la séparation des fibres se fait dans des conditions qui favorisent la conservation de la longueur des fibres. Les raffinages subséquents augmentent la flexibilité des fibres et les liens interfibres principalement. A des températures

plus élevées, la séparation des fibres a lieu dans la lamelle mitoyenne, laissant ainsi une couche de lignine sur la surface de la fibre. De telles conditions sont moins favorables à la fibrillation des fibres et à leur flexibilité, et donc au développement des liens interfibres. La température de traitement des copeaux détermine en quelque sorte le lieu de rupture dans la matrice de bois ainsi que la nature de la surface exposée suite à cette rupture⁽²⁰⁾ (figure 2.11). Dans la mise en pâte thermomécanique, la séparation des fibres a lieu principalement aux limites de la couche extérieure de la paroi secondaire i.e. S₁/S₂ (figure 2.11).

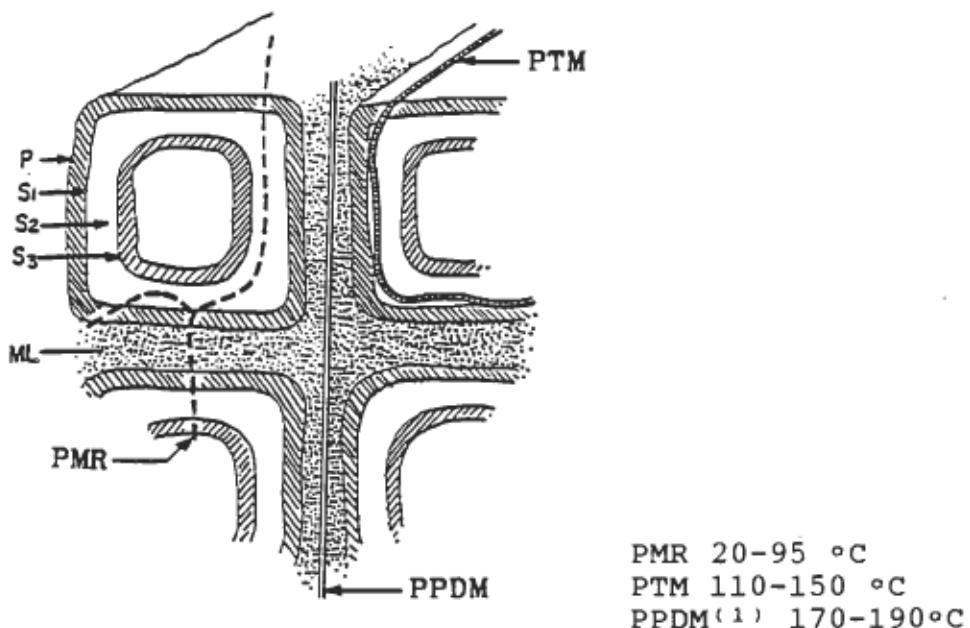


Figure 2.11 Rupture de la matrice de bois en fonction de la température de raffinage⁽²⁰⁾

(1) Panneaux particules à densité moyenne

La consistance de raffinage et la distance de plaques influencent grandement le taux de friction interne dans la zone de raffinage (contacts fibres-fibres et fibres-métal) et les caractéristiques des fibres obtenues i.e. fibrillation ou surface spécifique, longueur de fibre et quantité de fines.

Les fibres de la pâte thermomécanique sont moins fibrillées que celles des pâtes mécaniques de meule ou de raffineur. La teneur en bûchettes est plus faible⁽²¹⁾ suite à une rupture plus ordonnée de la matrice du bois étuvé à des températures élevées. De plus, les fibres plus longues confèrent à la pâte thermomécanique une résistance plus élevée que celle des pâtes mécaniques conventionnelles (tableau 2.5).

Tableau 2.5

Propriétés des pâtes mécaniques de pin loblolly⁽²²⁾

	<u>PM</u>	<u>PMR</u>	<u>PTM</u>
CSF (ml)	95	100	100
Densité (kg/m ³)	270	250	270
Indice d'éclatement (kPa.m ² /g)	0,8	1,1	1,2
Indice de déchirure (mN.m ² /g)	4,4	6,0	6,0
Longueur de rupture (m)	1800	2700	2900
Blancheur (%)	60	58	57
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	60	52	55
Bûchettes (%)	0,5	0,35	0,2

2.3.3 Pâte chimico-thermomécanique

Le procédé de fabrication de pâte chimico-thermomécanique implique l'utilisation d'agent chimique tel le sulfite de sodium sur les copeaux. Le procédé subséquemment est similaire à la mise en pâte thermomécanique. Des charges de sulfite de sodium de l'ordre de 1 à 6 % peuvent être utilisées. Le traitement chimique avant le raffinage dégrade ou modifie chimiquement (sulfonation) la lignine et rend la séparation des fibres plus aisée. Cet effet est pratiquement équivalent à celui observé lors de l'étuvage des copeaux pour un procédé thermomécanique⁽²³⁾. Les propriétés des pâtes peuvent être améliorées par le traitement chimique avant le raffinage. Les effets obtenus résultent de la réduction du module d'élasticité en cisaillement du bois avec l'imprégnation au sulfite. Ceci entraîne une rupture interfibres, principalement dans la lamelle mitoyenne, lors du raffinage. L'on observe une réduction de la fibrillation mécanique des fibres, de la quantité de fines et de bûchettes mais une augmentation de la longueur, de la flexibilité et de la compressibilité des fibres. La sulfonation de la lignine par le sulfite la rend hydrophile et permet une amélioration de l'hydratation et ainsi du gonflement des fibres, qui deviennent flexibles après raffinage. La flexibilité et la compressibilité des fibres permettent de développer

davantage les liens interfibres. Le tableau 2.6 présente une comparaison des pâtes thermomécaniques et chimico-thermomécaniques pour le pin loblolly.

Tableau 2.6

Comparaison de procédés de mise en pâte pour le pin loblolly⁽²⁴⁾

Procédé	PTM	PCTM	PCM
Na ₂ SO ₃ (%)	0	3	16
Température (°C)	125	125	160
Temps (min)	3	3	30
Rendement (%)	96	94	80
Energie consommée (kWh/TMSA)	2950	3200	1500
Indice d'égouttage (ml)	100	100	300
Taux de bûchettes (%)	0,2	0,05	< 0,05
Bauer McNett			
fibres longues (R30) (%)	26	28	65
fines (P200) (%)	32	30	15
Résistance humide (N/m)	43	50	71
Densité (kg/m ³)	270	320	480
Indice à la rupture (Nm/g)	29	33	50
Indice à l'éclatement (kPa.m ² /g)	1,2	1,8	3,5
Indice à la déchirure (mN.m ² /g)	6,0	6,5	10,3
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	57	50	28
Blancheur iso (%)	58	62	50

Les avantages d'une pâte chimico-thermomécanique par rapport à une pâte thermomécanique peuvent se résumer comme suit:

- une séparation plus sélective des fibres
- un pourcentage élevé de longues fibres

- un taux de bûchettes plus faible
- une amélioration de la flexibilité des fibres
- une densité plus élevée de la feuille finale
- une amélioration des propriétés de résistance et de la blancheur des pâtes
- un enlèvement des matières extractibles

Par contre, l'opacité des pâtes chimico-thermomécaniques est plus faible et les coûts d'opération plus élevés (énergie de raffinage et produits chimiques). Les pâtes chimico-thermomécaniques présentent encore des propriétés physiques et des interactions similaires aux propriétés des pâtes mécaniques.

2.3.4 Pâte chimico-mécanique

La mise en pâte chimico-mécanique combine un traitement chimique du bois plus sévère suivie d'une mise en pâte mécanique de raffineur. Ces pâtes peuvent remplacer les pâtes chimiques dont les rendements sont faibles et dont les effluents sont plus polluants. Une pâte chimico-mécanique de résineux a des propriétés physiques intermédiaires entre les pâtes chimiques et mécaniques. Une pâte chimico-mécanique possède les avantages associés aux pâtes mécaniques au niveau des propriétés optiques et du rendement, alors que les

propriétés de résistance, les longueurs des fibres et les indices d'égouttage sont comparables aux pâtes chimiques⁽²⁵⁾. De telles pâtes sont produites par une imprégnation des copeaux avec du sulfite de sodium à des concentrations de 10 à 20%, à des températures allant jusqu'à 130-150°C et des temps de rétention de 15 à 45 minutes⁽²⁶⁾. Sous de telles conditions, la plupart des sites de la lignine sont sulfonés (figure 2.12).

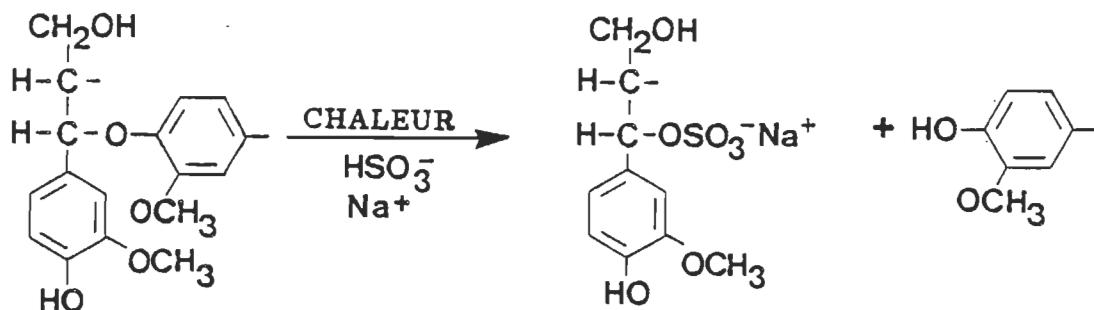


Figure 2.12 Réaction de la lignine à la sulfonation⁽²⁷⁾

Suite à la cuisson, les copeaux sont raffinés en deux stades jusqu'à des indices d'égouttage qui sont typiquement pour un mélange de sapin et d'épinette, de l'ordre de 300 à 400 ml. Les liqueurs de cuisson résiduelles des procédés chimico-mécaniques peuvent être réutilisées, car elles contiennent encore une assez forte concentration en produit chimique. Des réductions de coûts de production peuvent donc être réalisées en plus de minimiser l'impact environnemental. Ce procédé de mise en pâte améliore considérablement la flexibilité des fibres. De plus, les fibres sont moins endommagées par rapport à une pâte mécanique parce qu'elles sont produites avec moins d'énergie spécifique à des indices d'égouttage de 300 à 400 ml, au lieu de 100 à 150 ml. Le tableau 2.6 compare quelques propriétés physiques et optiques de papiers obtenus avec une pâte chimico-mécanique, une pâte thermomécanique et une pâte chimico-thermomécanique.

2.4 Procédés de blanchiment

Le blanchiment des pâtes mécaniques a pour but de modifier les chromophores de la lignine pour améliorer leur blancheur sans perte de rendement. Les réactions de blanchiment des pâtes sont soit oxydantes ou réductrices selon le type d'agents chimiques utilisés.

2.4.1 Blanchiment au peroxyde d'hydrogène

Le blanchiment au peroxyde d'hydrogène implique une modification des chromophores de la lignine par des réactions d'oxydation. Plusieurs aspects des réactions impliquées entre les structures du bois et le peroxyde d'hydrogène ont été discutés dans la littérature. Selon Gupta⁽²⁸⁾, les groupements carbonyles, et principalement ceux conjugués avec un cycle benzénique, sont responsables de la majorité de la coloration de la lignine. Les γ -carbonyles seraient détruits par le peroxyde, à l'opposé des α - et β -carbonyles, qui eux ne seraient pas touchés (figure 2.13).

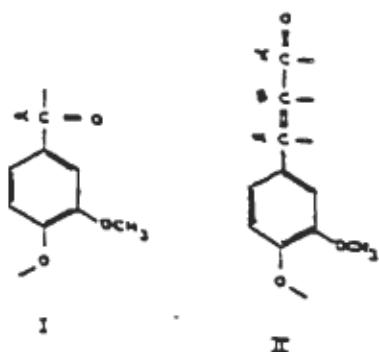


Figure 2.13 Structure de α - et γ - carbonyles⁽²⁸⁾

Il fut déterminé que le peroxyde ajouté à la pâte est impliqué dans diverses réactions secondaires. La présence de métaux provoque une réaction de décomposition du peroxyde.



La figure 2.14 montre l'effet des matières organiques extractibles et des métaux sur l'efficacité du blanchiment au peroxyde. L'élimination de ces éléments aide à consommer moins de peroxyde, donc à blanchir plus efficacement.

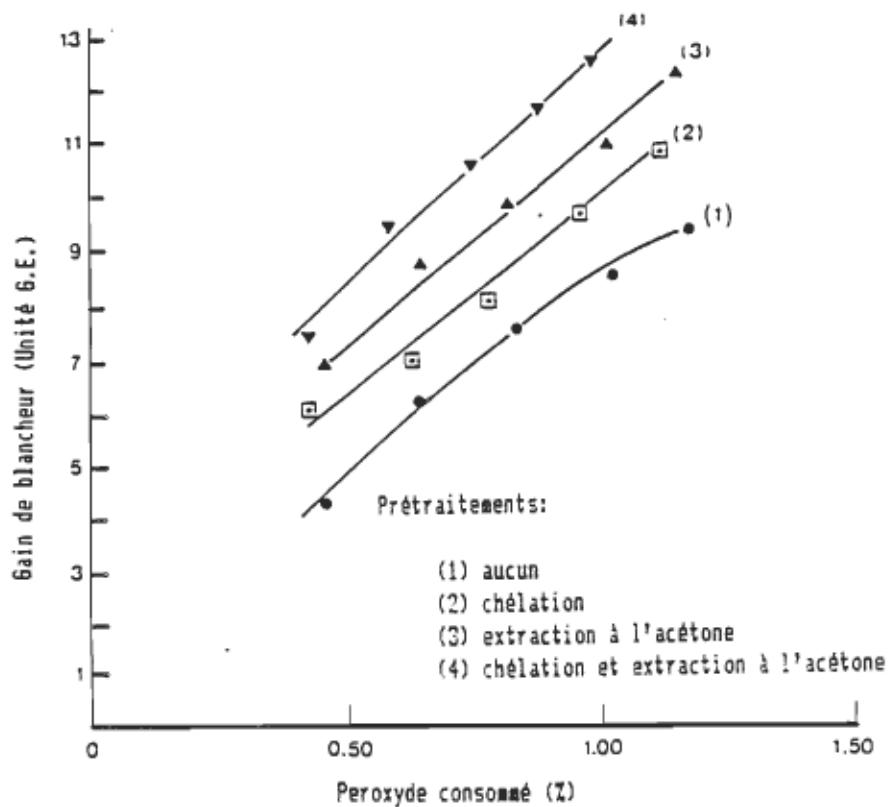
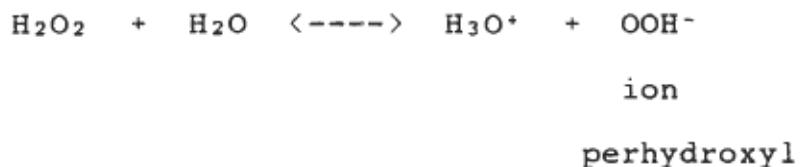


Figure 2.14 Gain de blancheur en fonction du peroxyde consommé lors du blanchiment⁽²⁹⁾

Le peroxyde d'hydrogène, en solution aqueuse, se dissocie pour former l'ion perhydroxyl, l'agent actif de la réaction de blanchiment:



La dissociation du peroxyde est favorisée en milieu alcalin (figure 2.15).

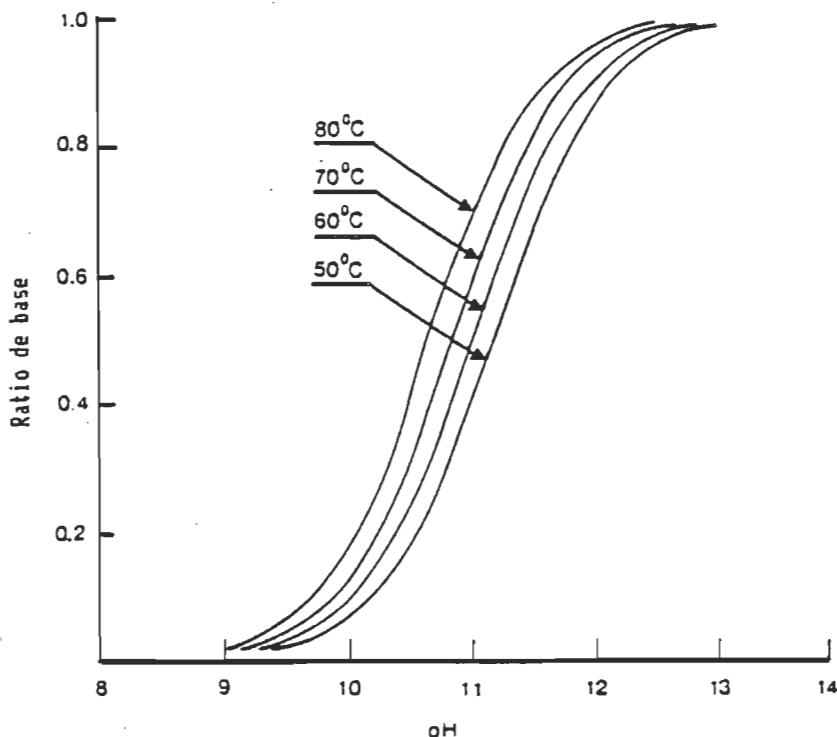


Figure 2.15 Dissociation du peroxyde en fonction du pH⁽²⁹⁾

Cependant, un pH trop alcalin provoque la décomposition du peroxyde⁽²⁹⁾:

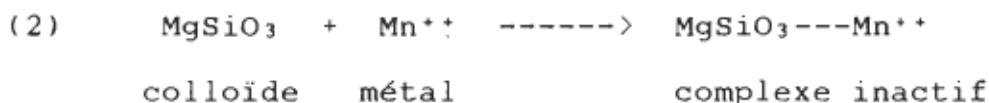
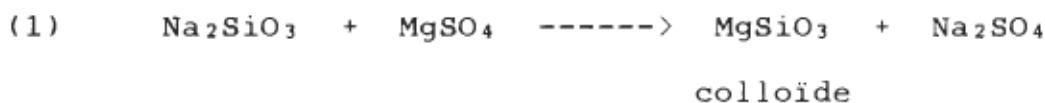


La réaction de décomposition est habituellement catalysée par la présence d'ions métalliques comme le manganèse par exemple, et l'effet de ces ions est plus grand quand l'alcalinité augmente. L'oxygène produit par la réaction de décomposition de l'agent de blanchiment diminue la blancheur de la pâte puisque l'oxygène au contact de la lignine forme de nouveaux chromophores.

Le sulfite de sodium résiduel d'un procédé de mise en pâte chimicothermomécanique peut en arrivant dans la section de blanchiment décomposer une partie du peroxyde;



Les ions métalliques présents dans la pâte et/ou dans l'eau doivent être inhibés par l'addition de sulfate de magnésium et de silicate de sodium. Les deux produits chimiques forment un colloïde de silicate de magnésium qui stabilise le peroxyde⁽²⁹⁾:



Avant le blanchiment, les pâtes sont traitées à l'aide d'un agent chélatant. L'agent chélatant le plus couramment utilisé est le DTPA (acide diéthylène triamine pentaacétique). Le complexe organo-métallique formé par le DTPA et les métaux est soluble, et peut être éliminé par pressage et/ou lavage de la pâte. La blancheur de la pâte est souvent affectée par ce pré-traitement; elle peut être haussée de plus d'un point.

Le contrôle du pH ou de l'alcalinité nécessaire pour le blanchiment au peroxyde est fourni par le silicate de sodium (le silicate couramment employé est une solution basique à 41° Bé.) et l'hydroxyde de sodium. Le taux d'alcalinité influence grandement les gains de blancheur (figure 2.16).

Le peroxyde d'hydrogène peut être utilisé pour un blanchiment des pâtes en un ou deux stades. Un système de blanchiment en deux stades est optimisé en recirculant les liqueurs résiduelles adéquatement.

De même, des considérations environnementales ont incité les usines à fonctionner en circuit de plus en plus fermé, ce qui résulte en une eau blanche de plus en plus contaminée par des matières organiques du bois, des métaux et des produits chimiques. Ces réactions secondaires peuvent donc prendre

plus d'importance de telle sorte qu'une recirculation judicieuse des eaux doit être faite pour optimiser le blanchiment des pâtes.

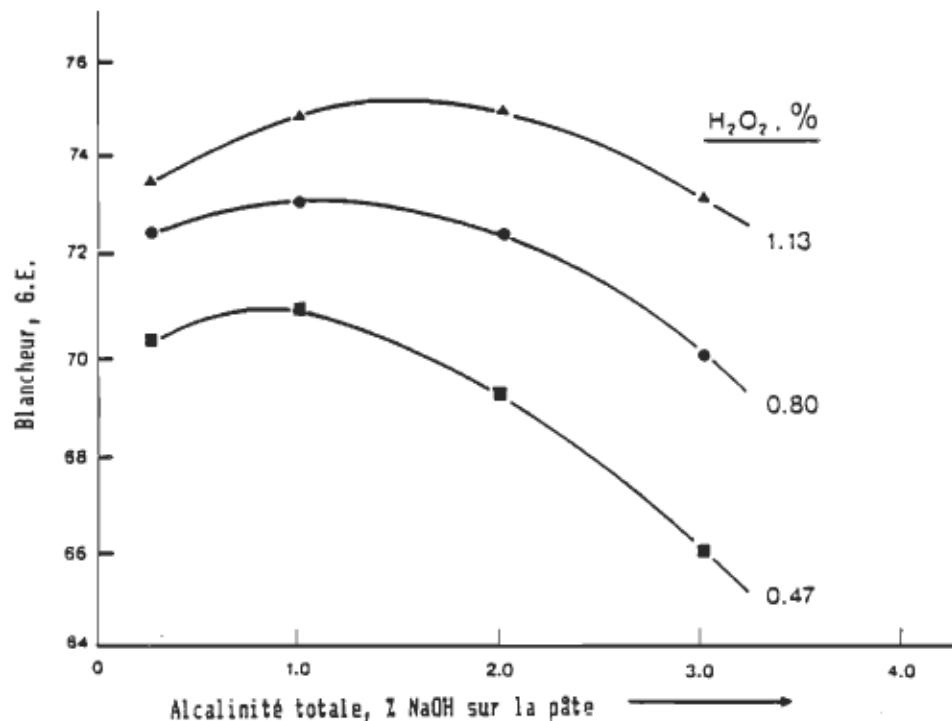


Figure 2.16 Effet de l'alcalinité sur la blancheur⁽²⁹⁾

Puisque lors du blanchiment au peroxyde l'on se doit de garder à tout moment lors de la réaction un excédent de peroxyde actif, il est possible de réduire les coûts de blanchiment avec le peroxyde d'hydrogène en réutilisant le peroxyde résiduel à la sortie de la tour de blanchiment.

2.4.2 Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium

Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium est le plus vieux procédé de blanchiment des pâtes et implique une modification de la lignine par des réactions chimiques de réduction. L'hydrosulfite de sodium, ou dithionite de sodium, est reconnu comme étant un produit chimique instable. En milieu anhydre ou en absence d'air, il se décompose alors qu'en présence d'air il s'oxyde rapidement.

Les études de plusieurs chercheurs ont montré que le taux de décomposition de l'hydrosulfite augmente en abaissant le pH et/ou en haussant la température. Les trois figures qui suivent montrent l'effet de la température sur la décomposition de l'hydrosulfite, tel qu'étudié par Rinker et al.⁽³⁰⁾.

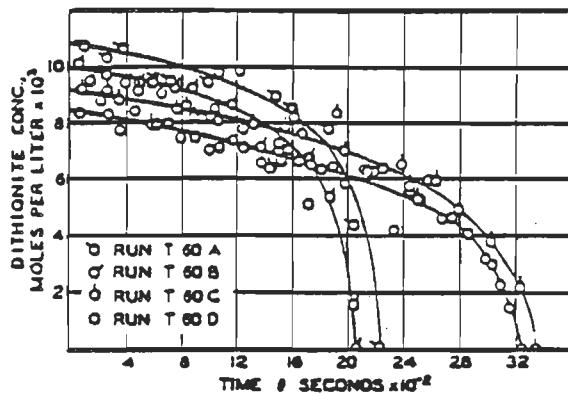


Figure 2.17 Décomposition de l'hydrosulfite à 60°C⁽³⁰⁾

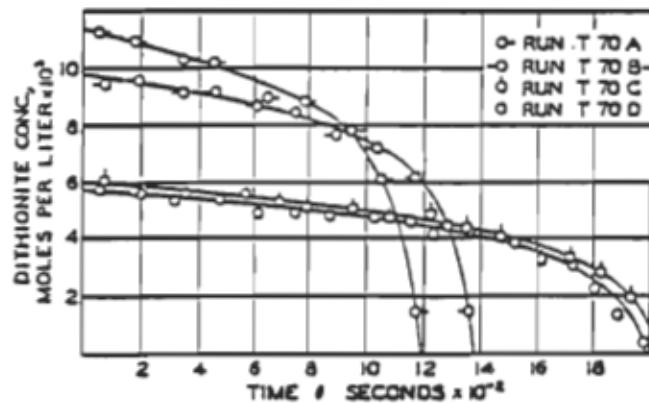


Figure 2.18 Décomposition de l'hydrosulfite à 70°C⁽³⁰⁾

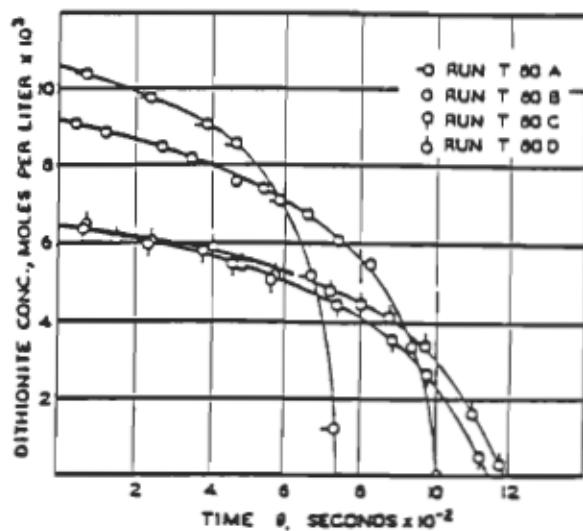


Figure 2.19 Décomposition de l'hydrosulfite à 80°C⁽³⁰⁾

En plus d'une hausse de température, Dahehy et Zubritsky⁽³¹⁾ ont montré qu'une baisse de pH a aussi pour effet d'accélérer le taux de décomposition d'une solution d'hydrosulfite (figure 2.20).

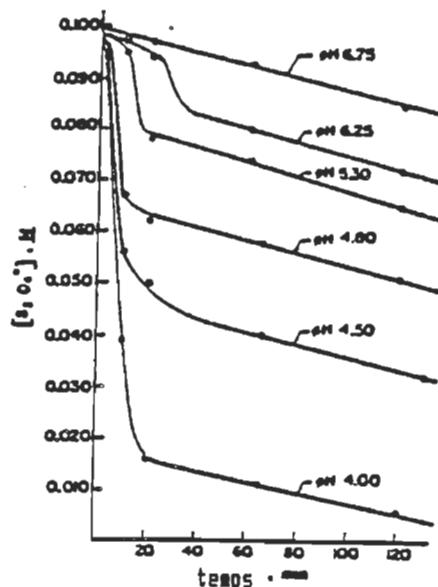


Figure 2.20 Influence du pH sur la décomposition de l'hydrosulfite à 20°C⁽³¹⁾

La décomposition anaérobique de l'hydrosulfite de sodium implique des réactions chimiques qui donnent du bisulfite et du thiosulfate de sodium;



Les produits des réactions impliquées dans la décomposition aérobie de l'hydrosulfite de sodium sont le bisulfite et le sulfate de sodium. L'oxydation est très rapide, et l'oxygène dissout peut détruire plus de 10 fois son propre poids en hydrosulfite.



Lors du blanchiment à l'hydrosulfite, les ions actifs sont $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ et HS_2O_4^- . Les groupements réduits dans la lignine sont les quinones et les carbonyles (figure 2.21).

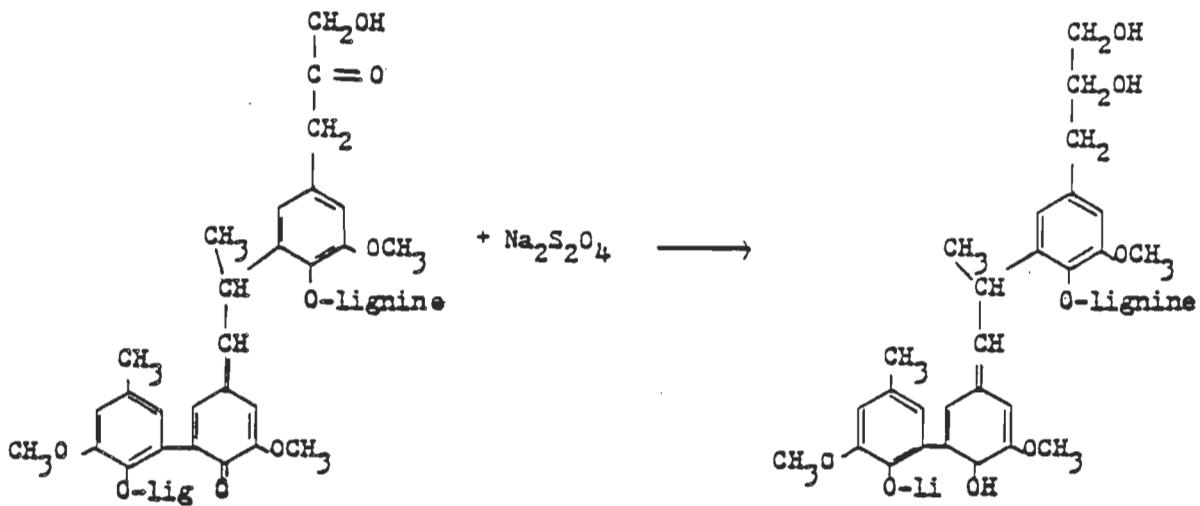


Figure 2.21 Réduction de la lignine par l'hydrosulfite de sodium⁽³²⁾

Le pH de la pâte a une grande influence sur l'efficacité du blanchiment (figure 2.22). On utilise habituellement l'acide sulfurique pour contrôler le pH.

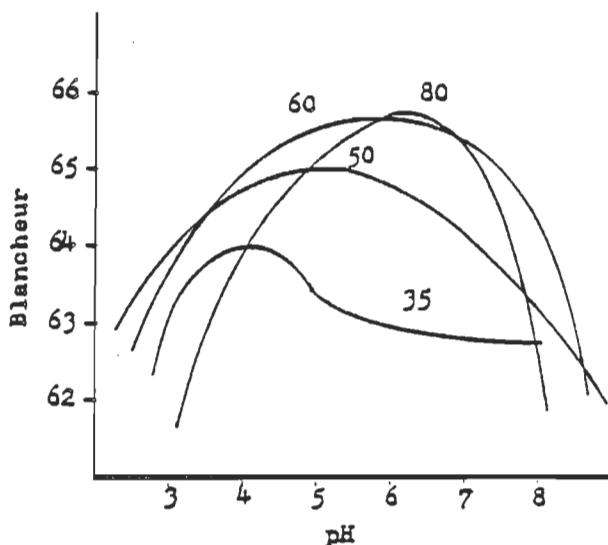


Figure 2.22 Effet du pH et de la température sur le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium⁽³³⁾

Un agent séquestrant doit être préférablement ajouté pour contrer l'interférence des métaux présents dans la pâte. Il peut être ajouté avant ou pendant le blanchiment (on ajoute couramment du tripolyphosphate de sodium, STPP, pendant le blanchiment). L'effet de l'addition de STPP est illustré à la figure 2.23.

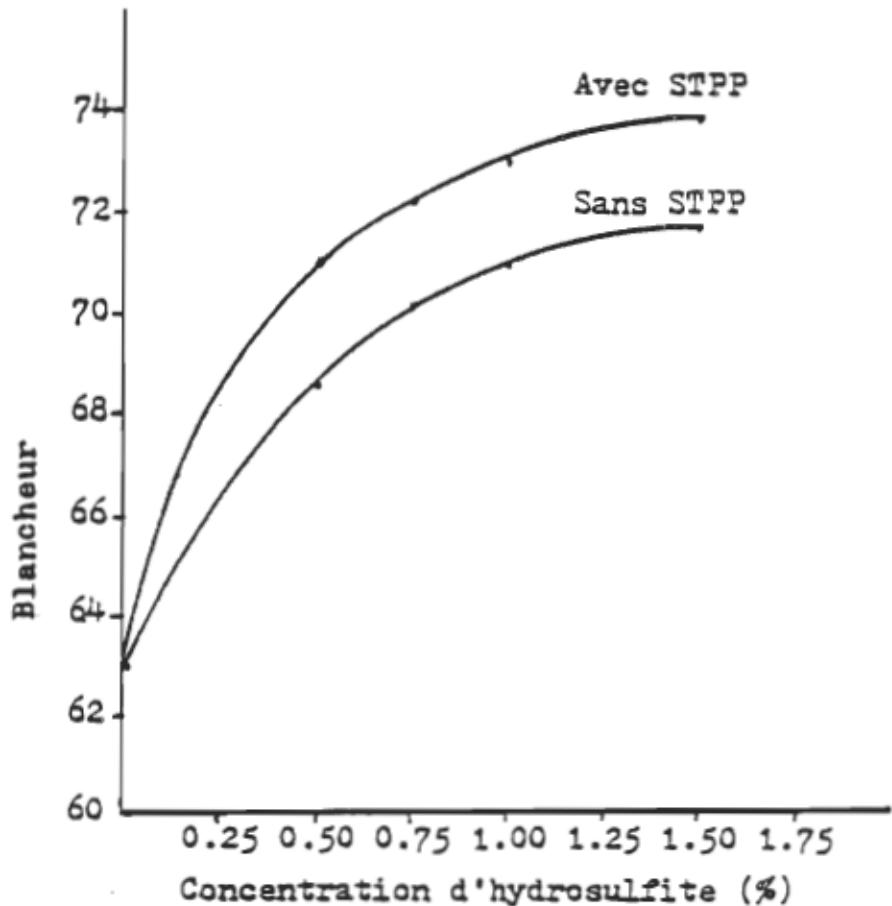


Figure 2.27 Effet du STPP sur le blanchiment du $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ⁽³⁵⁾

3. EXPERIMENTATION

3.1 Approvisionnement en bois

Les copeaux de pin loblolly âgés de 15 ans ont été fournis par la compagnie EVCO de Hot Springs, Arkansas, E.U. La teneur en humidité de ces derniers s'élevait à 47,0%. Les copeaux d'épinette noire et de sapin Beaumier ont été fournis par la compagnie Rexfor Inc. et le pin gris agé de 40 ans provenait de la région de la Mauricie.

3.2 Classification des copeaux

Afin d'uniformiser la distribution des copeaux et de minimiser les problèmes lors du raffinage, les copeaux ont été classifiés à l'aide du classificateur à disques rotatifs de RADER, modèle M-2215. Ce dernier classe les copeaux selon leur épaisseur, il permet de ne conserver que les copeaux de dimension acceptable, soit ceux de moins de 6 mm d'épaisseur tout en éliminant les sciures qui sont plus petites que 0.5 mm. Les copeaux plus petits donneraient des fibres trop courtes alors que les copeaux plus épais causeraient des problèmes au niveau de l'alimentation

du raffineur.

3.3 Lavage des copeaux

Le lavage des copeaux est nécessaire afin d'éliminer les particules hétérogènes (sable, pierre, bout de métal, etc...). Ces dernières peuvent causer des bris d'équipement. Ce lavage se fait à l'aide d'un bassin qui permet la déposition des particules plus denses que le bois.

3.4 Mise en pâte

3.4.1 Appareillage

Toutes les pâtes mécaniques, thermomécaniques, chimico-thermomécaniques ainsi que chimicomécaniques ont été produites à l'aide de l'unité pilote Sunds-Defibrator (figure 3.1) du Centre de Recherche en Pâtes et Papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Cet appareillage comprend quatre parties principales: le système d'alimentation, l'imprégnateur, le lessiveur et le raffineur.

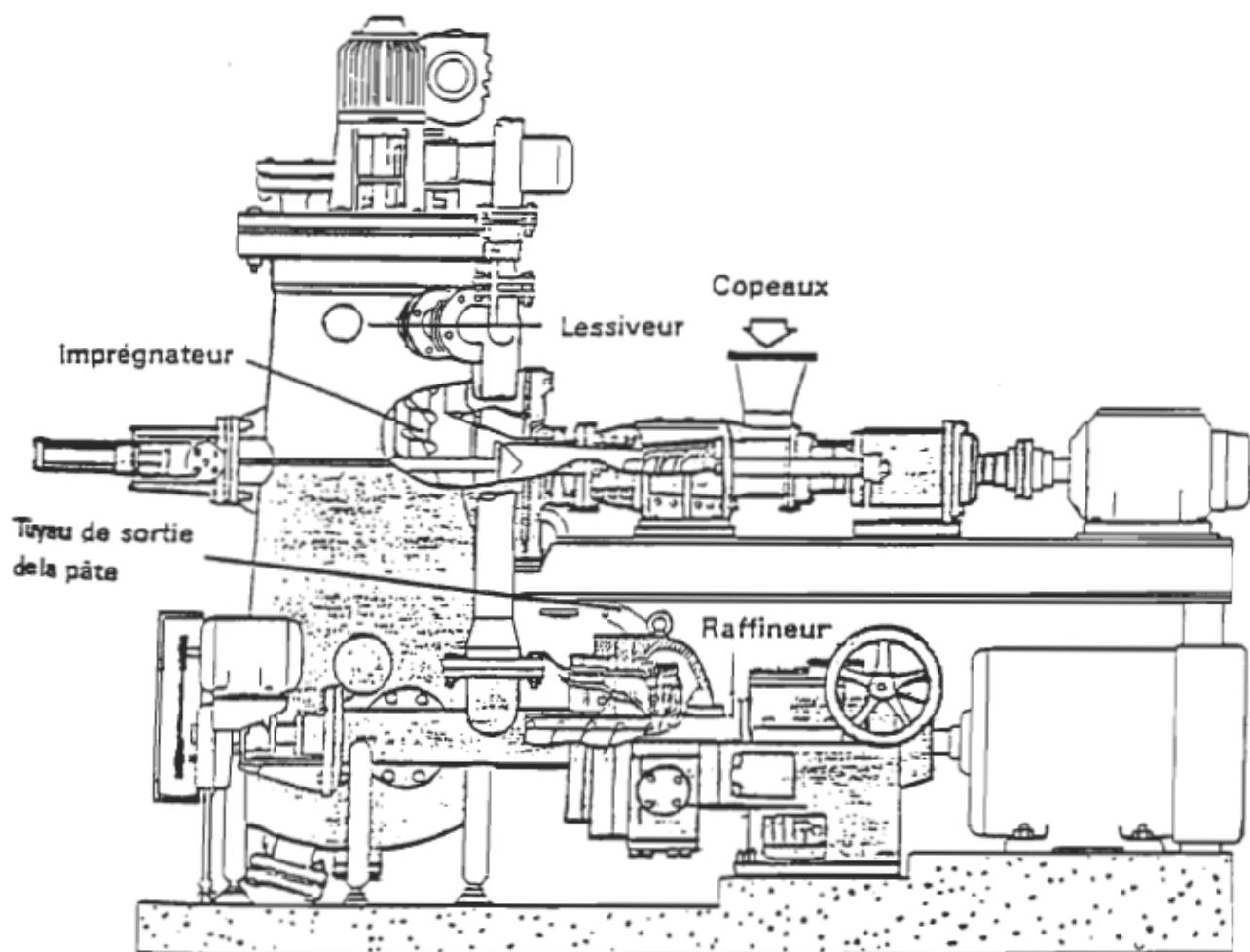


Figure 3.1 Unité de cuisson et de raffinage Sunds-Defibrator

A) Le système d'alimentation

Les copeaux sont préchauffés à la vapeur dans un cuvier qui alimente, par une vis sans fin, un alimentateur à bouchon avant l'imprégnateur.

B) L'imprégnateur

L'imprégnateur est situé à l'intérieur du lessiveur. Lors de la production de la pâte chimico-thermomécanique et chimico-mécanique, la liqueur de sulfite de sodium est ajoutée.

C) Le lessiveur

Les copeaux sont transférés de l'imprégnateur au lessiveur à l'aide de deux vis verticales. Les copeaux subissent par la suite une cuisson à la vapeur dans le lessiveur. La durée de rétention peut varier de 5 à 30 minutes en réglant la vitesse de la vis de décharge du lessiveur.

D) Le raffineur

Après traitement dans le lessiveur, les copeaux sont alimentés au raffineur par un système de vis sans fin. Le

raffineur de type CD300 est constitué de 2 disques plats de 300 mm de diamètre dont l'un est fixe (stator) et l'autre est mobile (rotor). A la périphérie des disques plats se retrouvent 2 séries de disques coniques de 50 mm de largeur. L'un est fixé au stator et l'autre au rotor. La distance entre les disques plats et coniques peut être réglée par le contrôle indépendant de chacune des sections.

L'ajustement de la consistance de la pâte lors du raffinage s'effectue par l'ajout d'eau de dilution dans les zones des disques plats et des disques coniques.

3.4.2 Procédé mécanique

Les pâtes mécaniques de raffineur (PMR) furent produites en deux stades de raffinage. Les copeaux ont été introduits dans le système d'alimentation et préchauffés à la vapeur durant 10 minutes. A l'aide d'un alimentateur à bouchon, ces derniers ont ensuite été introduits dans le lessiveur où ils ont séjournés 6 minutes à une température de 97°C. Par la suite, les copeaux furent raffinés à la pression atmosphérique. La pâte fut récupérée, lavée, déchiquetée et raffinée à nouveau. Ce deuxième raffinage s'est fait à la pression atmosphérique. Les pâtes furent lavées à l'aide d'une lessiveuse commerciale dont le cylindre rotatif est

double d'une toile avec perforations de 200 mesh.

3.4.3 Procédé thermomécanique

La production de pâte thermomécanique (PTM) s'est faite en deux stades de raffinage. Les copeaux, après avoir subi un prétraitement atmosphérique de 10 minutes à la vapeur, furent alimentés au lessiveur où ils ont passé 6 minutes à une température de 128°C et une pression de 253 kPa. Par la suite, le raffinage a été effectué à une pression de 260 kPa. Le second stade de raffinage s'est fait dans les mêmes conditions que celui de la pâte mécanique. La pâte fut lavée et déchiquetée entre les deux stades de raffinage.

3.4.4 Procédé chimico-thermomécanique

Pour la mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM), une liqueur au sulfite (Na_2SO_3), obtenue en dissolvant du sulfite de sodium commercial dans l'eau du robinet, fut ajoutée à l'imprégnateur. Des concentrations en sulfite de sodium (Na_2SO_3) de 3% et 6% ont été utilisées. Ce pourcentage exprime le rapport en poids de produits chimiques sur le bois sec. Ces concentrations ont donné des taux de sulfonation de la pâte respectifs de 38 et 61 exprimé

en millimole de HSO_3^- par kilogramme de pâte. Une fois les copeaux imprégnés, un traitement dans l'étuveur pour une période de 6 minutes à une température de 128°C et une pression de 253 kPa a précédé le raffinage à une pression de 260 kPa. La pâte ainsi obtenue fut lavée, avant de subir un second raffinage à la pression atmosphérique. Le lavage interstade a pour but d'extraire les produits chimiques et les matières extractibles mises en solution lors de l'étuvage.

3.4.5 Procédé chimico-mécanique

Le procédé chimico-mécanique est similaire au PCTM mais les conditions de traitement sont plus sévères. Suite au prétraitement à la vapeur des copeaux, l'imprégnation se fait à partir d'une liqueur de sulfite de sodium dont la concentration est de 18%, permettant d'obtenir un taux de sulfonation de 93 mmol HSO_3^-/kg . De plus, les conditions du lessiveur sont fixées à un temps de rétention de 30 minutes, une température de 140°C et une pression de 390 kPa. Les copeaux sont ensuite raffinés à une pression de 356 kPa. Une fois la pâte récupérée et lavée, elle est de nouveau raffinée à la pression atmosphérique. Ces conditions entraînent une diminution du rendement et nous avons obtenu une valeur de 79%.

La figure 3.2 présente le schéma d'opération suivi pour chacun des procédés de mise en pâte.

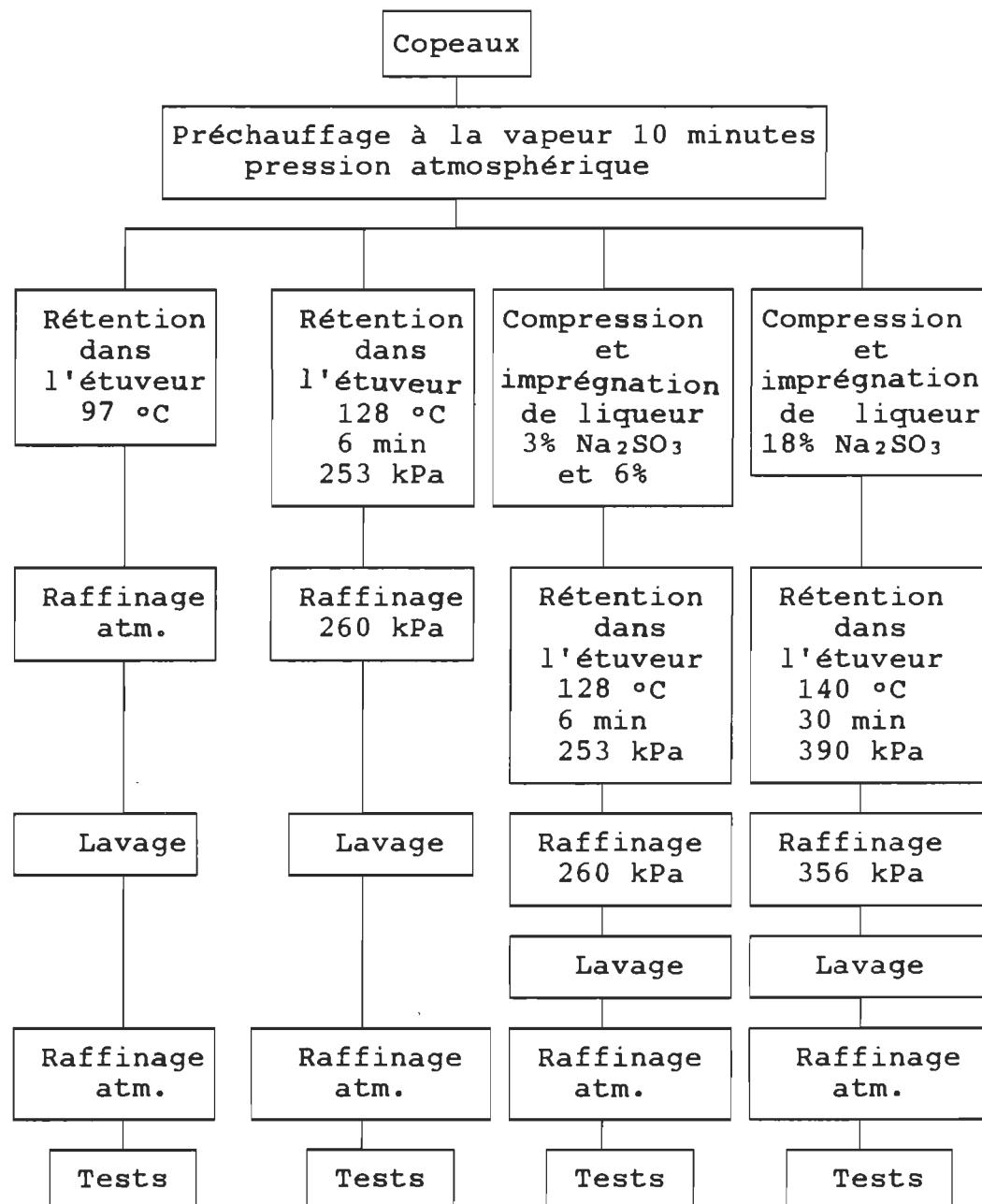


Figure 3.2 Schéma d'opération

3.5 Evaluation des propriétés des pâtes et des papiers

Un échantillon de chaque pâte produite selon des conditions de mise en pâte et des niveaux d'énergie différents a été prélevé pendant une durée de 60 secondes. De cette façon, une quantité suffisante de pâte est récupérée, permettant l'évaluation des propriétés des pâtes et des papiers (de plus, à partir de cet échantillon, le taux de production nécessaire au calcul de l'énergie spécifique est déterminé). Une désintégration à l'eau chaude de la pâte dans un désintégrateur Domtar afin d'éliminer la latence des fibres, précède les étapes de formation de la feuille.

Nous avons ensuite procédé aux essais physiques de la pâte et des papiers secs. Les essais ont été effectués selon les normes standard de l'A.C.P.P.P. ou de TAPPI (voir tableau 3.1). Les mesures pour les essais physiques des papiers secs ont été réalisées dans une chambre à atmosphère contrôlé où la température était maintenue à 23°C et l'humidité relative à 50%.

La mesure des contenus en groupement HSO_3^- a été effectuée en utilisant la méthode de Katz et al⁽³⁵⁾. La longueur moyenne des fibres a été déterminée à partir de la classification Bauer McNett des pâtes⁽³⁶⁾.

Tableau 3.1

Normes standard lors des essais physiques

Essais physiques	Normes A.C.P.P.P.	Normes TAPPI
Enlèvement de la latence par désintégration à chaud (Domtar)	C.8p	-
Concentration de la pâte	D.16	-
Indice d'égouttage	C.1	-
Taux de rejets Pulmac	-	-
Classification Bauer McNett	-	T233 os- 75
Conditions standard et atmosphère contrôlé	A.4	-
Fabrication des feuilles	C.4	-
Grammage du papier	D.3	-

Tableau 3.1 (suite)

Essais physiques	Normes A.C.P.P.P.	Normes TAPPI
Essais physiques des formettes de pâte	D.12	-
Epaisseur	D.4	-
Porosité	-	T460 os- 75
Longueur de rupture	-	T494 os- 70
Indice d'éclatement	-	T403 os- 76
Indice de déchirure	-	T414 os- 65
Blancheur Elrepho	-	T452 os- 77
Opacité d'impression	-	T425 os- 77
Coefficient de diffusion - de la lumière		T425 os- 75
Coefficient d'absorption - de la lumière		-

3.6 Blanchiment

Pour chaque blanchiment, la pâte a d'abord été traitée avec un agent chélatant (DTPA) afin d'éliminer les métaux de la pâte. Du DTPA à une concentration de 0,4% pour un temps de rétention de 15 minutes, une consistance de 3% et une température de 60°C est utilisé pour ce prétraitement. Par la suite, les pâtes sont centrifugées pour atteindre une consistance de 25%, puis blanchies.

Le prétraitement de la pâte, les solutions de neutralisation ainsi que la fabrication des feuilles en laboratoire sont faits avec de l'eau déminéralisée.

3.6.1 Blanchiment au peroxyde en un stade

A l'intérieur d'un sac de plastique transparent, les produits chimiques requis pour blanchir un échantillon de 20g sec de pâte prétraitée furent ajoutés et la consistance ajustée à la valeur désirée avec la quantité nécessaire d'eau déminéralisée. Les sacs sont ensuite scellés et immersés pendant le temps requis dans un bain d'eau thermostaté à la température pré-déterminée. Suite au blanchiment, les pâtes sont "neutralisées". Cette étape vise à détruire l'agent de blanchiment résiduel et à ajuster le pH de la pâte pour

assurer la stabilité de blancheur. Dans le cas du peroxyde d'hydrogène, la neutralisation est faite avec du métabisulfite de sodium, permettant à la fois de décomposer le peroxyde résiduel et d'ajuster le pH à 5,5. La méthode de neutralisation suivie consiste à diluer à environ 3% la pâte avec l'agent de neutralisation, en faire un bon mélange pendant 5 minutes et de presser cette pâte par la suite jusqu'à 18% de consistance environ.

Suite à la neutralisation, deux échantillons de 3,5g sont prélevés et désintégrés pendant 2 minutes à une consistance d'environ 0,3%. Les feuilles sont fabriquées sur formette standard en acier inoxydable selon les normes ACPPP en utilisant de l'eau déminéralisée pour toutes les pâtes. Les feuilles sont par la suite pressées (3,4 atm) pendant 2 minutes, puis conservées 24 heures à température (23°C) et humidité (50%) relative constante. La mesure de réflectance a effectuée à l'aide d'un photomètre Carl-Zeiss Elrepho avec le filtre #8 pour évaluer la blancheur.

3.6.2 Blanchiment à l'hydrosulfite

Le blanchiment à l'hydrosulfite s'est fait en suivant les mêmes étapes que lors du blanchiment au peroxyde en un stade. Le pH est préalablement ajusté à 5,5 avec de l'acide

sulfurique. Par contre, avant d'introduire la solution d'hydrosulfite, de l'azote a été ajouté dans les sacs de plastique contenant la pâte à blanchir afin d'éviter le contact de la solution avec l'air. Tel que discuté à la section 2.4.2, l'oxygène de l'air en plus de la lumière oxyde l'hydrosulfite. Les pâtes ont seulement été lavées. Le lavage constitue une neutralisation, car l'hydrosulfite résiduel est décomposé par l'eau de dilution ajoutée lors du lavage.

Le tableau 3.2 résume les conditions et les produits chimiques utilisés lors des essais de blanchiment.

Tableau 3.2

Produits chimiques et conditions de blanchiment

	Peroxyde P	Hydrosulfite Y
Produits chimiques		
Na ₂ SiO ₃ (%)	3,0	-
MgSO ₄ (%)	0,05	-
DTPA (%)	0,4	0,4
NaOH (%)	0,9-1,8	-
H ₂ O ₂ (%)	0,3-1,7	-
Na ₂ S ₂ O ₄ (%)	-	0,3-1,5
Conditions		
consistance (%)	10-15	5
température (°C)	70	60
temps de rétention (hres)	1,5	0,5

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Résultats de mise en pâte

4.1 Comparaison des propriétés de pâtes thermomécaniques de pin loblolly, de pin gris, de sapin Beaumier et d'épinette noire

Les propriétés d'une pâte thermomécanique de pin loblolly sont comparées avec celles d'une pâte thermomécanique de pin gris, de sapin Beaumier et d'épinette noire aux figures 4.1 jusqu'à 4.7. La relation entre l'énergie de raffinage et l'indice d'égouttage est différente pour chaque essence. Le pin loblolly ainsi que le pin gris demandent plus d'énergie de raffinage que l'épinette noire et le sapin Beaumier pour un même indice d'égouttage (figure 4.1). En général, les bois plus denses et qui ont donc un densier élevé comme les pins (voir tableau 2.2) requièrent plus d'énergie de raffinage. A un indice d'égouttage de 300 ml, le pin loblolly nécessite 23% plus d'énergie de raffinage que l'épinette noire. Cependant, à des indices d'égouttage inférieurs à 150 ml, l'énergie est comparable pour le pin loblolly et l'épinette noire. Certains auteurs^(37, 38) ont obtenu des énergies de raffinage pour le pin loblolly, inférieures à celles d'un mélange sapin/épinette alors que d'autres⁽³⁹⁻⁴¹⁾ confirment le fait que les pins du sud ainsi que le pin gris demandent plus d'énergie de raffinage que

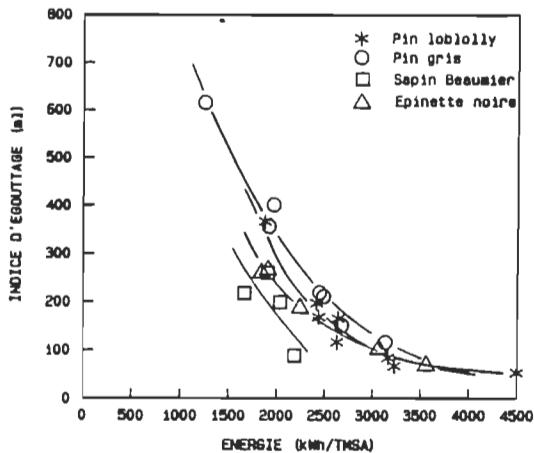


Figure 4.1 Relation indice d'égouttage-énergie

l'épinette noire et le sapin Beaumier.

Avec l'augmentation de l'énergie de raffinage le volume spécifique décroît dû à une augmentation progressive de la flexibilité des fibres. L'on observe toutefois à la figure 4.2 que même en appliquant plus d'énergie de raffinage, les caractéristiques physiques des fibres de pin (épaisseur de la paroi ou denier) font en sorte que ces dernières s'affaissent moins qu'une fibre d'épinette noire. Le volume spécifique du papier fait avec le pin loblolly est près de 30% plus élevé par rapport à celui de l'épinette noire à énergie de raffinage ou à indice d'égouttage constant (figure 4.2). May et al.⁽³⁷⁾ rapportent des volumes spécifiques de 15% supérieurs par rapport à un mélange sapin/épinette à une énergie constante de 7 MJ/kg (1945 kWh/TMSA). Le pin gris

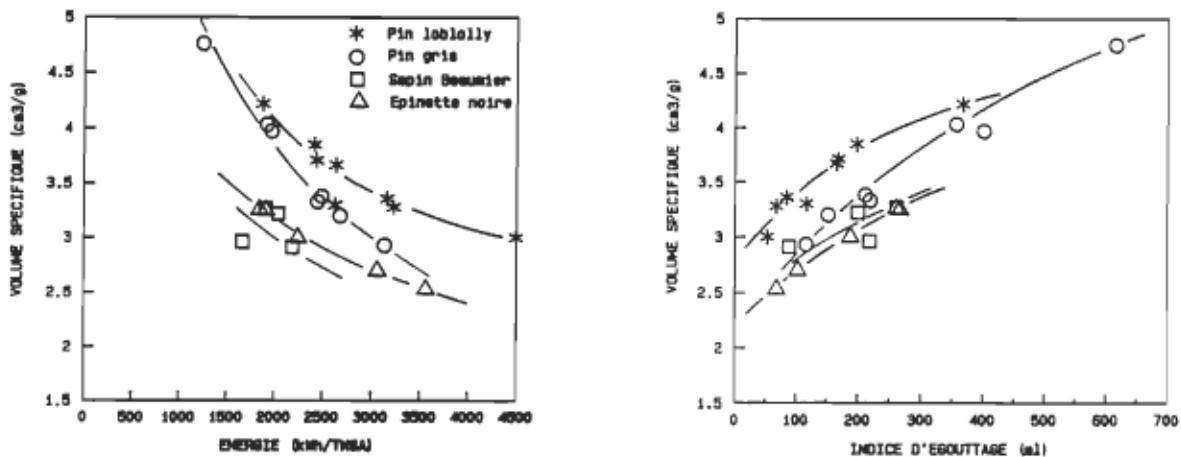


Figure 4.2 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

présente aussi un volume spécifique supérieur au sapin Beaumier et à l'épinette noire.

Le taux de rejets pour l'épinette noire et le sapin Beaumier est plus faible que celui du pin loblolly (figure 4.3). La fraction de fibres longues (R14) est plus élevée pour le pin loblolly que pour les autres essences. Le pin gris possède moins de fibres longues que l'épinette noire. Un pourcentage de fibres longues plus élevé et un pourcentage de fines (P200) comparable aux autres essences mènent à des longueurs de fibres un peu plus élevées (2 à 3% supérieures) pour le pin loblolly.

Les caractéristiques physiques des fibres influencent grandement les propriétés des papiers (figure 4.4). Les pins ont des fibres plus rigides qui conduisent à une surface de liaison ("bond area") plus faible. Il est probable de plus que le haut taux de matières organiques des pins réduisent la force des liens interfibres ("bond strength"). Les graphiques de la longueur de rupture et de l'indice d'éclatement en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage démontrent bien les différences entre les pins et les deux autres résineux. A partir des propriétés intrinsèques des fibres (voir tableau 2.2), nous avons dessiner une coupe transversale de la fibre pour chacune des essences (figure 4.5), les fibres de pins ont une épaisseur de paroi et un diamètre de fibre plus élevés ce qui résultent en des propriétés mécaniques inférieures.

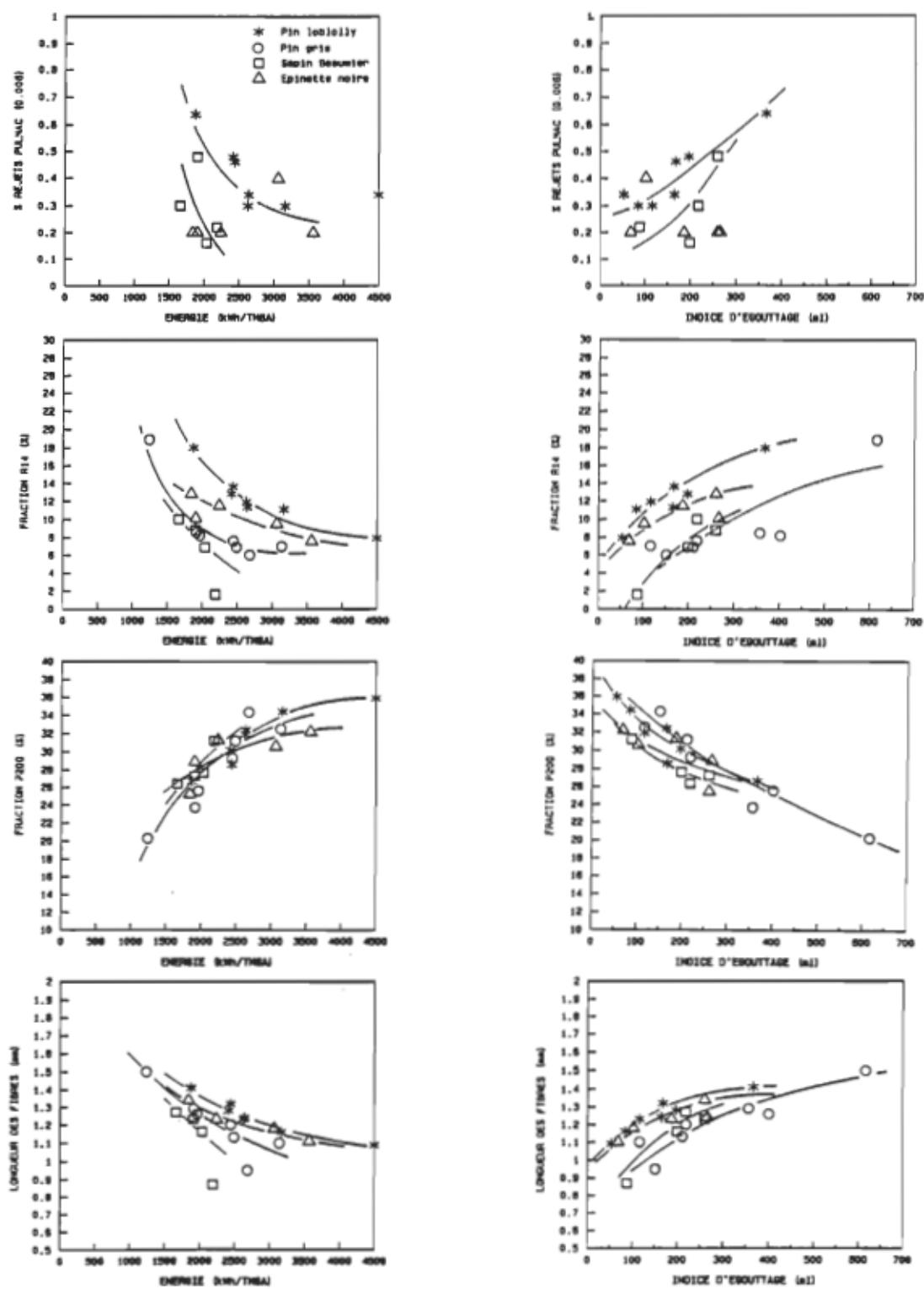


Figure 4.3 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

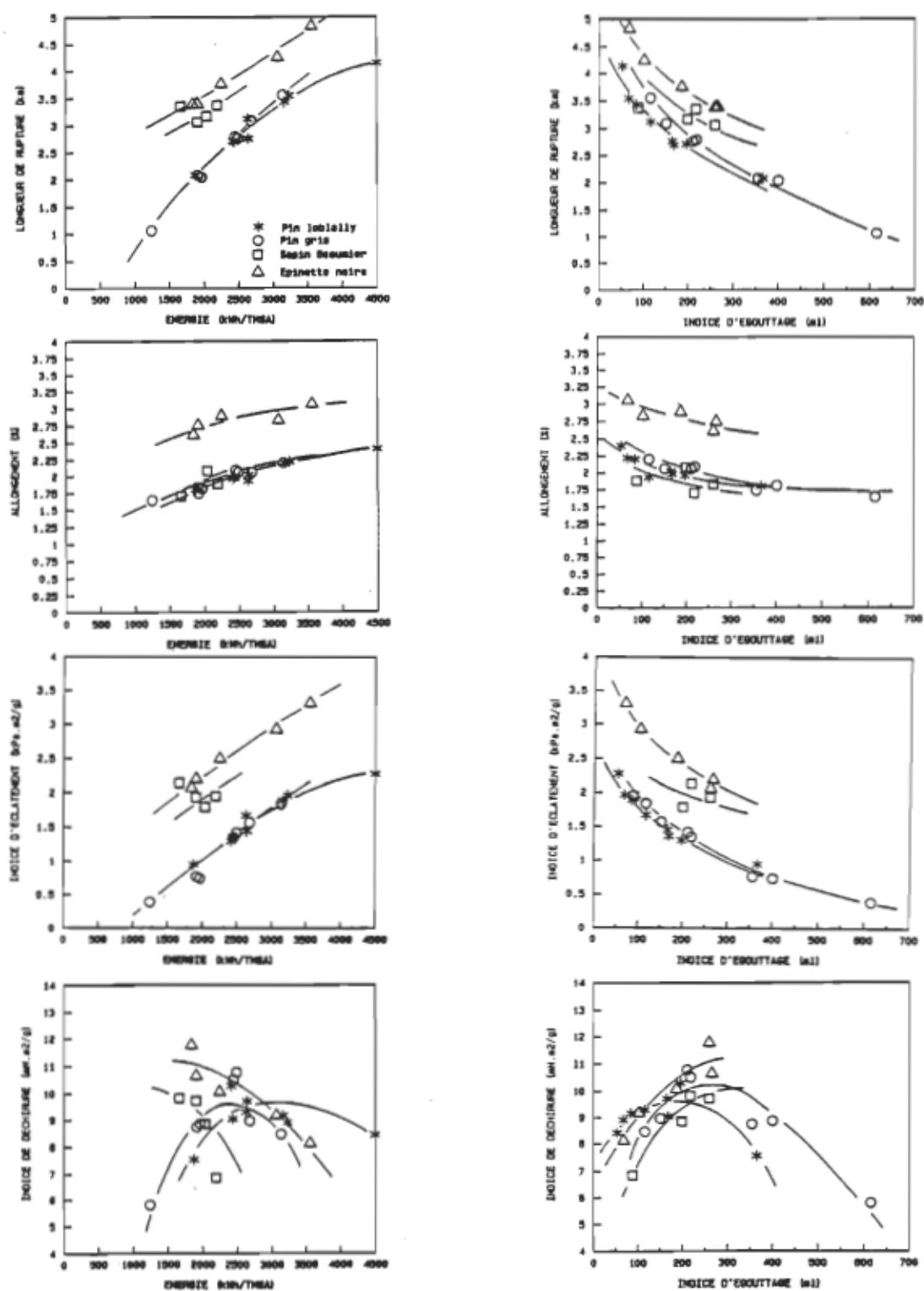


Figure 4.4 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de rafffinage et de l'indice d'égouttage

On peut remarquer qu'allant des fibres les plus rigides (pins) aux fibres les plus souples (épinette noire), les propriétés de résistance comme la longueur de rupture et l'indice d'éclatement croissent. Cette observation peut aussi être déduite à partir des résultats des auteurs précédents⁽³⁷⁻⁴⁰⁾. L'allongement pour les papiers faits d'épinette noire est supérieur à celui des pins et du sapin Beaumier.

Les pins conservent une bonne longueur de fibres et c'est pourquoi, l'indice de déchirure (figure 4.4) est comparable à celui du sapin Beaumier et de l'épinette noire.

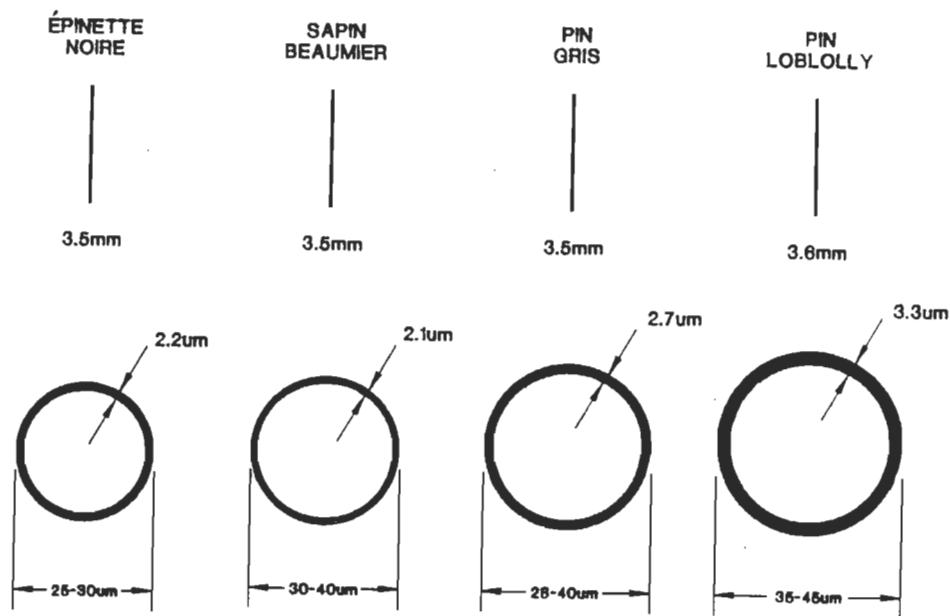


Figure 4.5 Représentation des fibres de différentes essences

Le coefficient de diffusion de la lumière est fonction du nombre de particules fines, de la fibrillation des fibres et des liens interfibres. Puisque la quantité de fines dans les pâtes thermomécaniques des quatre essences est semblable, le coefficient de diffusion inférieur pour les pins, s'explique par la faible fibrillation des fibres de pins dû à un module d'élasticité inférieur. Ces résultats sont confirmés par d'autres auteurs^(37,38). Plus le coefficient d'absorption de la lumière est élevé, plus la pâte est colorée. La fraîcheur des copeaux a une influence sur le coefficient d'absorption de la lumière. Les copeaux de pin gris étaient âgés, ceci explique le coefficient d'absorption élevé de la pâte produite. Lorsque les copeaux sont frais le coefficient d'absorption des pins (pin loblolly) est inférieur à celui du sapin Beaumier et de l'épinette noire. L'épinette noire donne des blancheurs supérieures au pin loblolly. Les papiers faits de pin gris possèdent des blancheurs initiales de 5 à 10 points inférieurs (âge de bois). L'opacité des papiers faits de pin loblolly est inférieure (2 à 5%) à celle du sapin Beaumier et de l'épinette noire, alors que l'opacité du pin gris se situe entre ces deux mêmes essences. Scallan⁽⁴²⁾ a trouvé pour les pâtes chimiques que la relation entre la longueur de rupture et coefficient de diffusion de la lumière était fonction de l'épaisseur de la paroi de la fibre. Les présents résultats (figure 4.7) suggèrent que cette relation ne s'applique pas

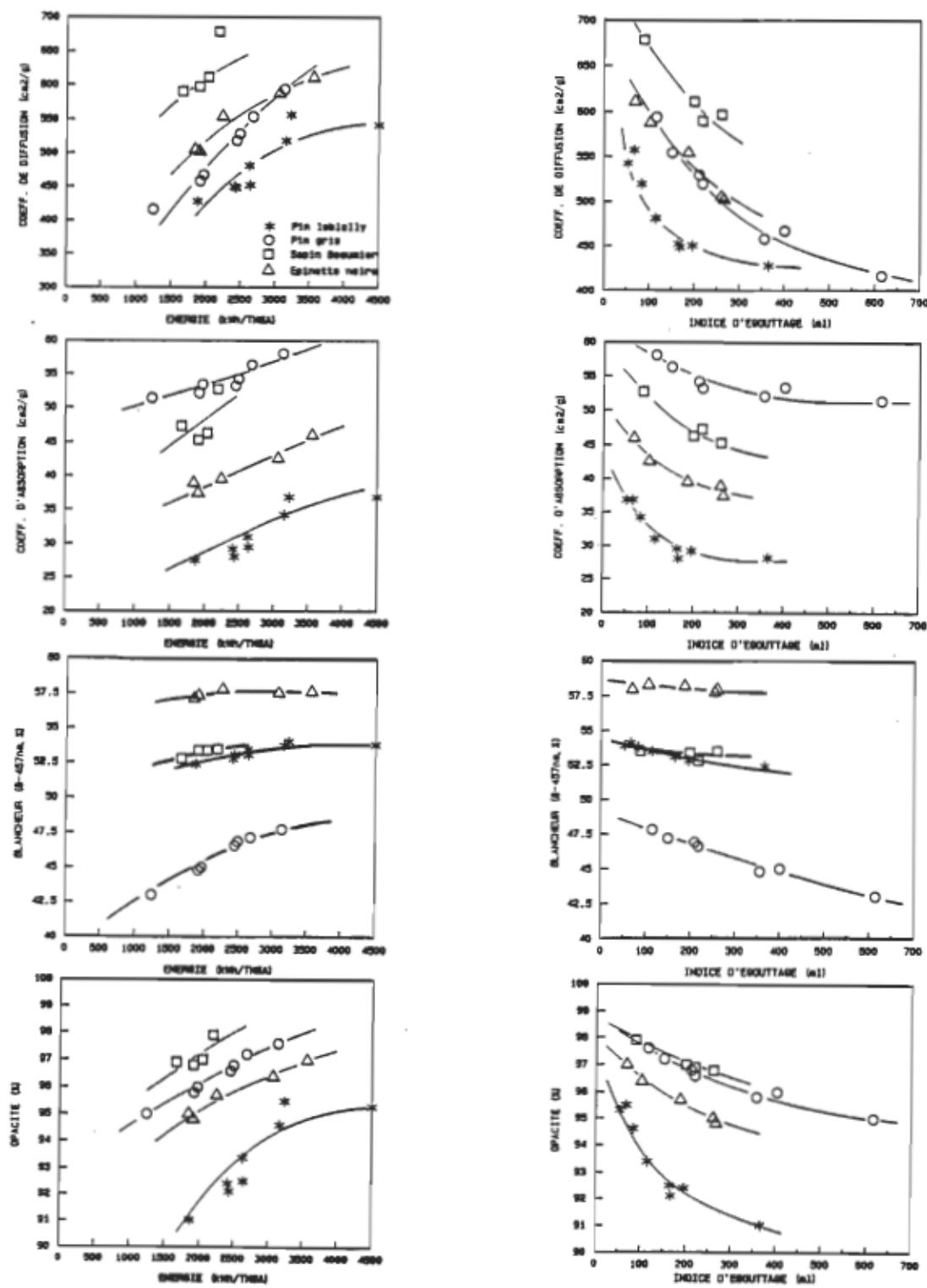


Figure 4.6 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

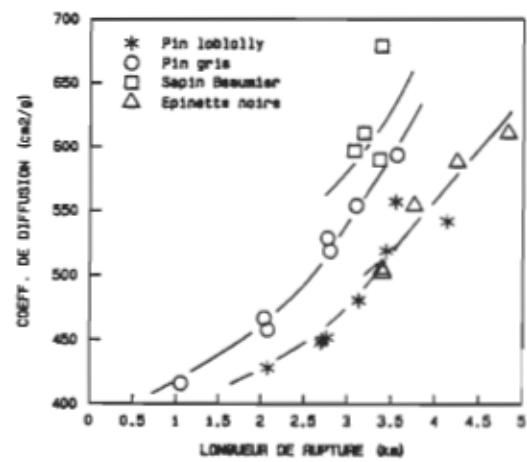


Figure 4.7 Relation entre la longueur de rupture
et le coefficient de diffusion de la lumière

aux pâtes mécaniques.

Le tableau 4.1 résume les résultats. Les pins et plus particulièrement le pin loblolly par rapport à l'épinette noire et au Sapin Beaumier demandent plus d'énergie de raffinage, donnent un volume spécifique supérieur tout en maintenant une bonne longueur de fibres, alors que les propriétés mécaniques et optiques sont inférieures. Une épaisseur de paroi et un denier supérieur en plus d'un module d'élasticité inférieur pour le pin loblolly et les pins en général, sont les principales raisons pour lesquelles l'on obtient ces résultats. Les papiers faits d'épinette noire possèdent donc davantage de liaisons interfibres que les papiers faits de pin loblolly. Cette différence s'explique par les différences au niveau de la morphologie des fibres. En assumant, pour simplifier, que les fibres sont de forme carrée, la surface transversale d'une section de fibre d'épinette est de l'ordre de:

$$(27,5 \text{ } \mu\text{m})^2 - (27,5 \text{ } \mu\text{m} - 4,4 \text{ } \mu\text{m})^2 = 223 \text{ } \mu\text{m}^2$$

et celle du pin loblolly de l'ordre de:

$$(40 \text{ } \mu\text{m})^2 - (40 \text{ } \mu\text{m} - 6,6 \text{ } \mu\text{m})^2 = 484 \text{ } \mu\text{m}^2$$

Tableau 4.1

Comparaison de pâtes thermomécaniques

Espèces	Pin Loblolly	Pin Gris	Sapin Beaumier	Epinette Noire
Energie spécifique (kWh/TMSA)	2610	2900	2120	2500
Indice d'égouttage (ml)	150	150	150	150
Longueur de fibres (mm)	1,27	1,05	1,10	1,23
Rejets pulmac (%)	0,37	-	0,20	0,20
Volumes spécifiques (cm ³ /g)	3,59	3,11	2,96	2,89
Longueur de rupture (km)	3,00	3,31	3,66	4,00
Allongement (%)	2,06	2,17	1,94	2,92
Indice d'éclatement (kPa.m ² /g)	1,50	1,66	2,12	2,70
Indice de déchirure (mN.m ² /g)	9,68	9,32	8,60	9,88
Indice de productivité (J/g)*	3,81	3,93	4,27	5,16
Coefficient de diffusion (cm ² /g)	466	562	635	565
Coefficient d'absorption (cm ² /g)	30,5	56,4	48,5	41,1
Blancheur iso (8-457nm, %)	53,3	47,2	54,0	57,5
Opacité (%)	93,0	97,3	97,5	96,0

* ✓ (indice d'éclatement * indice de déchirure)

La surface d'une section transversale d'une fibre de pin loblolly est approximativement deux fois celle de l'épinette noire. Puisque l'épinette noire et le pin loblolly ont environ la même longueur de fibre et la même densité de paroi cellulaire⁽⁴⁰⁾, le poids des fibres de pin loblolly est, en moyenne, environ deux fois celui de l'épinette noire. Pour une feuille ayant un poids de base donné, la feuille faite d'épinette noire contiendra deux fois plus de fibres qu'une feuille faite de pin loblolly, pour des pâtes ayant une distribution de fibres semblable. Pour cette raison, et parce que les fibres de l'épinette noire sont plus flexibles que les fibres de pin loblolly, l'épinette noire donne une feuille qui possède un plus grand nombre de liaisons interfibres permettant ainsi de mieux distribuer les "stress" imposés et de donner lieu à de meilleures propriétés mécaniques.

4.2 Comparaison des propriétés pour les procédés de mise en pâte mécanique (PMR vs PTM)

Puisque les propriétés papetières du pin loblolly sont inférieures à celles de l'épinette noire, une première alternative est de produire une pâte mécanique de raffineur (PMR ou PTM). Cette pâte peut remplacer les pâtes de meules dans un mélange avec une pâte chimique dans la fabrication du papier journal, par exemple. De façon générale, les pâtes mécaniques de raffineur ont une résistance légèrement inférieure aux pâtes thermomécaniques à énergie ou à indice d'égouttage similaire mais un coefficient de diffusion et une opacité supérieurs qui les rendent comparables aux pâtes de meules au niveau des propriétés optiques. Les propriétés des pâtes PMR et PTM pour le pin loblolly sont donc d'intérêt compte tenu des coûts d'opération, des variables d'opération (CSF) et des propriétés des pâtes produites. Les figures 4.8 à 4.12 comparent les propriétés des pâtes mécaniques (PMR et PTM) de pin loblolly avec les propriétés typiques d'une pâte de meule d'un mélange sapin/épinette de l'est du Canada (Les industries James McLaren inc, Masson, Québec). Une pâte de meule nécessite près de 60% moins d'énergie qu'une pâte mécanique de raffineur.

Le raffinage sous pression (PTM) augmente l'énergie nécessaire pour atteindre un même indice d'égouttage par

rapport à un raffinage à la pression atmosphérique (PMR) (figure 4.8). Pour chacun des procédés de mise en pâte, l'on observe une augmentation de l'énergie de raffinage avec la diminution de l'indice d'égouttage. Ces résultats s'expliquent par une augmentation du pourcentage de fines avec l'augmentation de l'énergie de raffinage (figure 4.10).

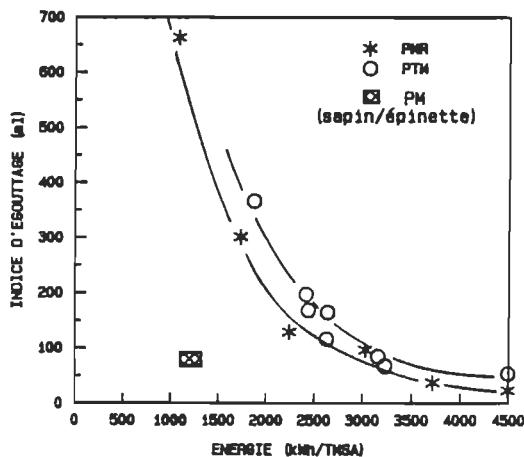


Figure 4.8 Relation indice d'égouttage-énergie

Le volume spécifique diminue avec l'augmentation de l'énergie de raffinage et l'indice d'égouttage pour les deux procédés. Le volume spécifique (figure 4.9) de la pâte mécanique de raffineur produite est plus élevé que celui de la pâte thermomécanique parce que la quantité de bûchettes est supérieure (figure 4.10). Le volume spécifique d'une pâte de meule est inférieur à celui des pâtes mécaniques (PMR et PTM) de pin loblolly.

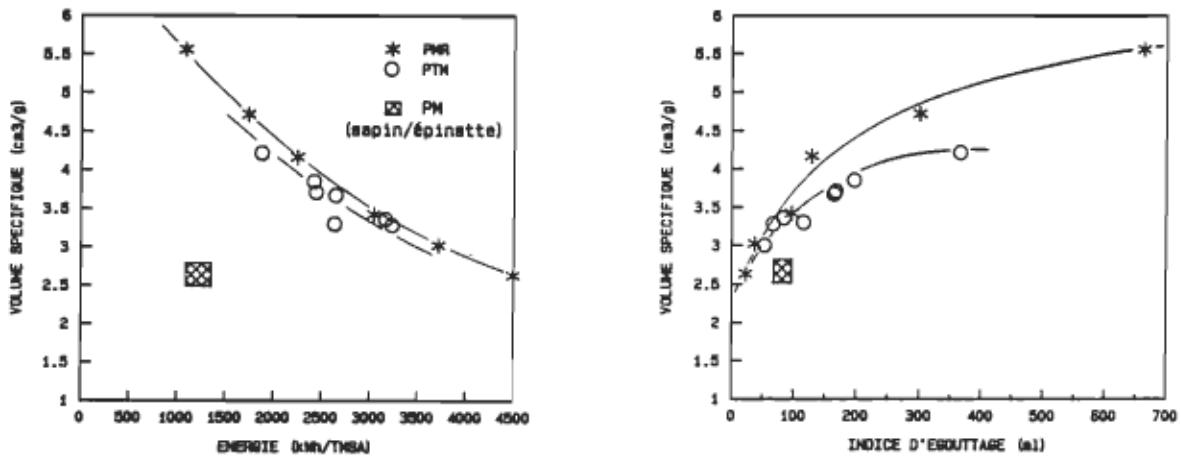


Figure 4.9 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

Le procédé thermomécanique, à cause de l'étuvage des copeaux et du raffinage à plus haute température, permet d'assouplir davantage les fibres en plus de faciliter leur séparation et de préserver leur longueur. C'est pourquoi, la PTM présente un taux de rejets plus faible et une longueur de fibres 8% plus élevée à un indice d'égouttage de 100 ml (figure 4.10). De plus, la fraction de longues fibres est plus importante pour une pâte thermomécanique. De ces premières observations, on peut s'attendre à un papier plus résistant avec la pâte thermomécanique. La pâte de meule d'un mélange sapin/épinette et la pâte mécanique de raffineur

(PMR) de pin loblolly ont un contenu en fibres longues (R14) semblable, alors que le contenu en fines (P200) est supérieur pour la pâte de meule, à indice d'égouttage donné. Les pâtes mécaniques (PMR et PTM) de pin ont une longueur de fibre supérieure à la pâte de meule d'un mélange sapin/épinette.

Bien qu'elle soit dépendante de la longueur des fibres, la longueur de rupture est surtout améliorée par la qualité des liaisons fibre à fibre. Ceci vaut également pour la résistance à l'éclatement. La longueur de rupture et l'indice d'éclatement sont améliorés avec la diminution de l'indice d'égouttage ou l'augmentation de l'énergie de raffinage (figure 4.11). Le procédé thermomécanique produit une pâte dont les fibres seront plus flexibles et dont la longueur est améliorée par rapport au procédé mécanique de raffineur. La résistance à la déchirure possède un comportement plus complexe (figure 4.11), elle dépend de la longueur des fibres, du nombre de liens ("bond area") fibre à fibre et de la résistance ("bond strength") de ces derniers. L'indice de déchirure en fonction de l'indice d'égouttage ou de l'énergie de raffinage passe par un maximum pour toutes les pâtes. Il est connu que la déchirure augmente avec le degré de raffinage et ce, jusqu'à un certain point, après quoi il diminue à cause du raccourcissement des fibres par le coupage.

Une feuille constituée de fibres longues aura une déchirure supérieure. Lorsque les fibres sont longues, on parle d'énergie requise pour retirer la fibre du réseau alors que pour une fibre courte la force est appliquée sur une région étroite et on parle d'énergie requise pour la rupture de la fibre. L'énergie requise pour retirer une fibre est supérieure à celle nécessaire pour rompre une fibre. La figure 4.11 et le tableau 4.2 montrent qu'à énergie spécifique ou à indice d'égouttage constant le papier obtenu d'une pâte thermomécanique possède une résistance mécanique nettement plus élevée. Par exemple, nous observons que pour obtenir une même longueur de rupture, le procédé mécanique de raffineur demande environ 25% d'énergie de raffinage de plus que le procédé thermomécanique. A un indice d'égouttage de 100 ml, l'indice d'éclatement d'une PTM de pin loblolly est 23% supérieur à celui d'une PMR, Kurdin⁽²²⁾ a quant à lui, obtenu une amélioration de 8% pour une PTM (voir tableau 2.5). La longueur de rupture et l'indice d'éclatement d'une pâte de meule de sapin/épinette se trouve à des valeurs intermédiaire entre la pâte mécanique de raffineur (PMR) et la pâte thermomécanique (PTM). Une fois de plus, l'on constate la flexibilité et la capacité de liaisons interfibres accrues des pâtes de sapin/épinette comparativement aux pâtes de pins. L'allongement et la résistance à la déchirure des pâtes mécaniques sont supérieurs à la pâte de meule; la

longueur de fibre des pâtes PTM et PMR de pins est plus élevée.

Les résultats de la figure 4.12 illustrent les propriétés optiques obtenues sur des feuilles standard avec les pâtes mécaniques et les pâtes thermomécaniques. Le coefficient d'absorption de la lumière augmente lorsque l'indice d'égouttage diminue ou lorsque l'énergie de raffinage augmente. La diminution de l'indice d'égouttage se produit à cause de la réduction de la distance entre les plaques du raffineur ce qui entraîne une augmentation de la température et de la vapeur produite entre les plaques du raffineur en plus d'une augmentation du contenu en ions dans la pâte. La pâte devient alors plus colorée et le coefficient d'absorption augmente.

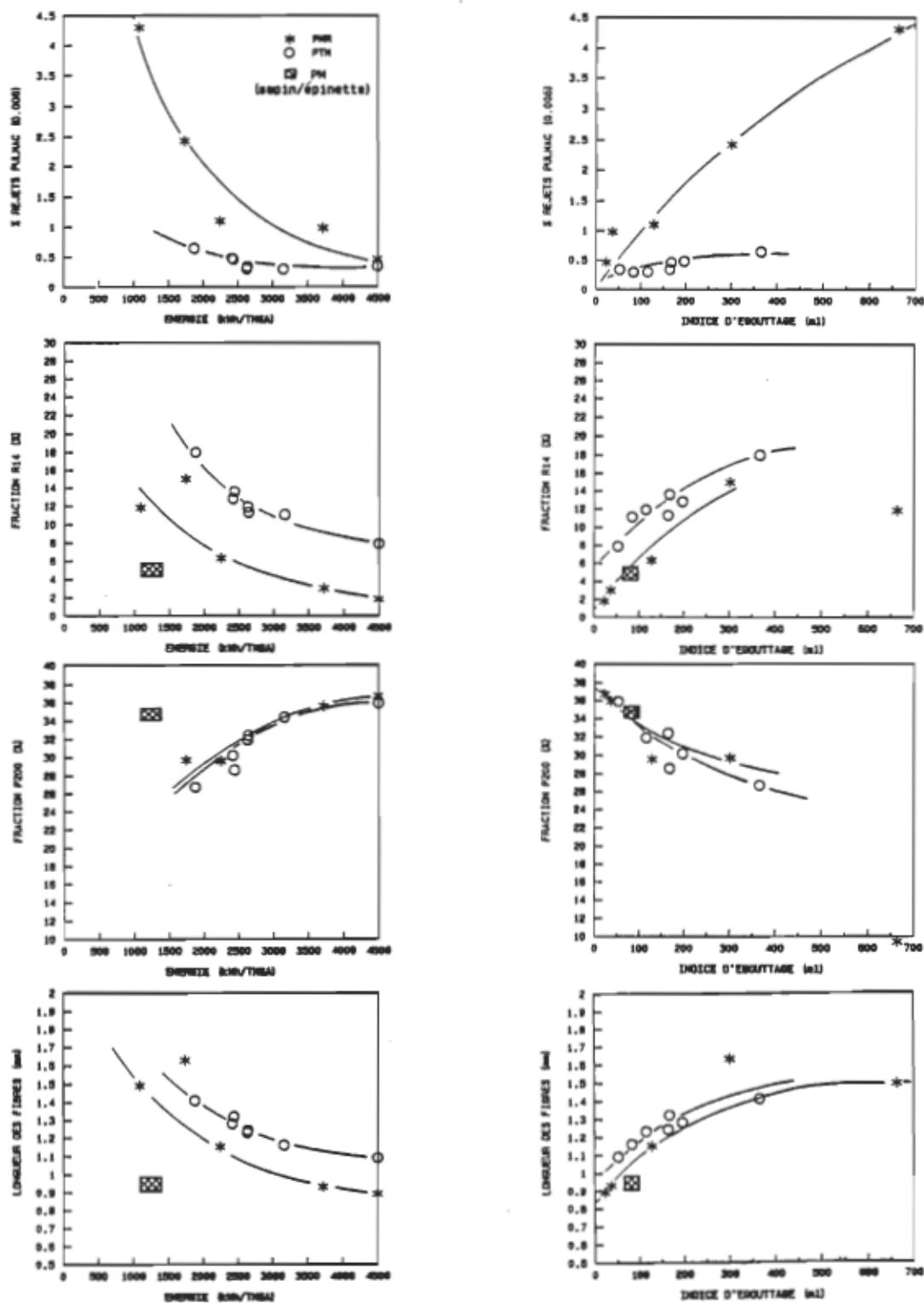


Figure 4.10 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

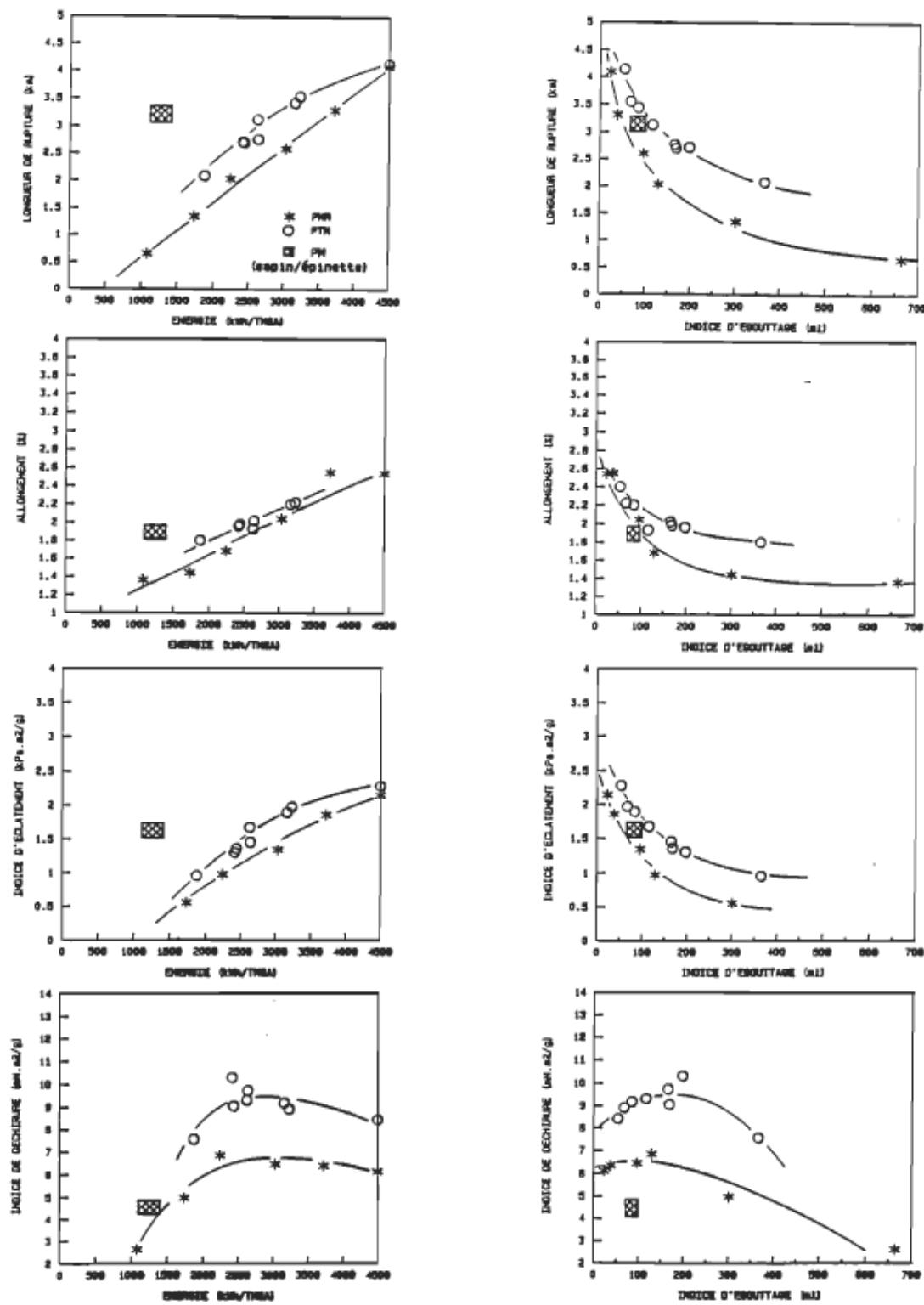


Figure 4.11 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

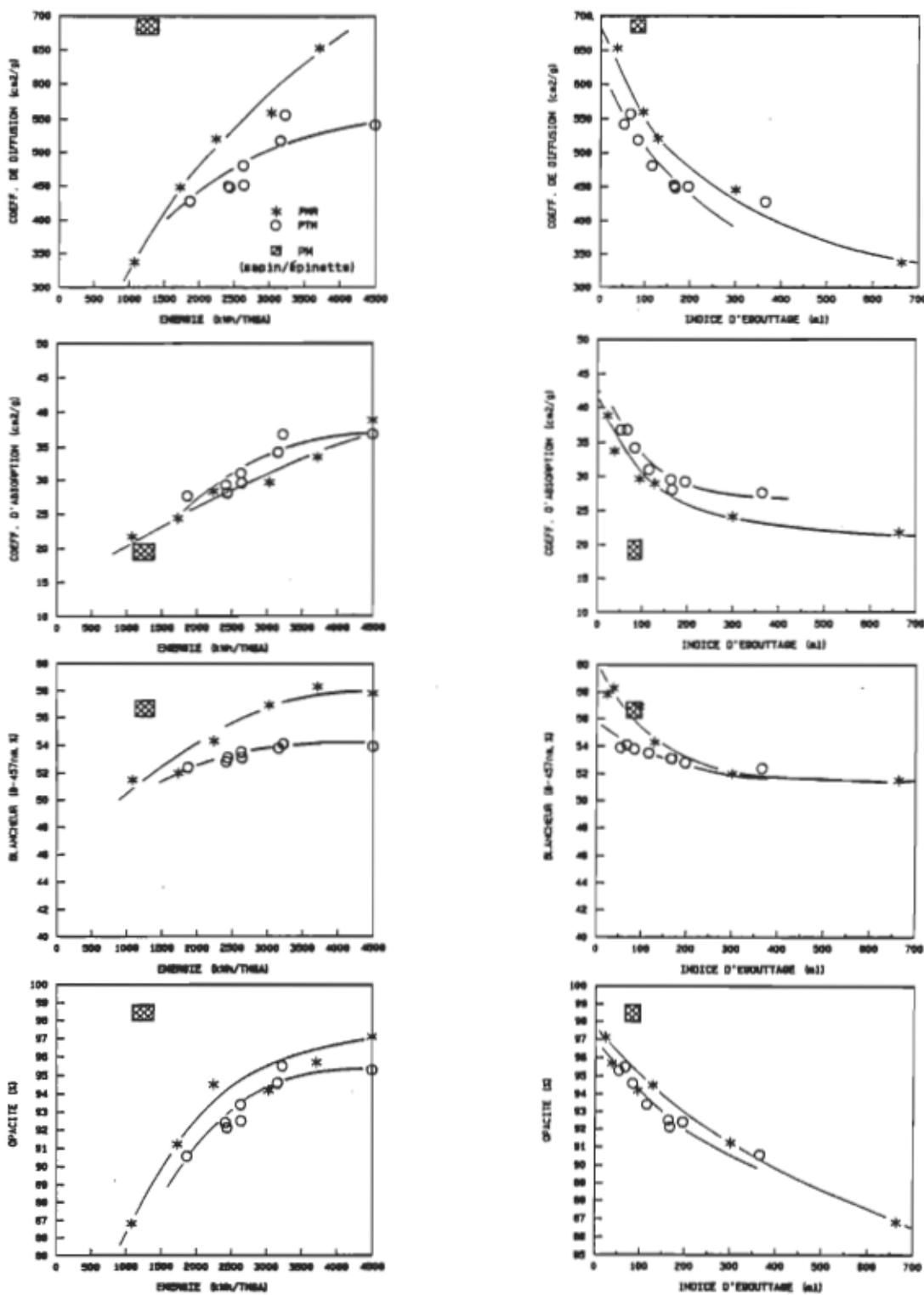


Figure 4.12 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

Tableau 4.2

**Comparaison de PM, PMR et de PTM à énergie constante
et à indice d'égouttage donné**

Procédé	PM	PMR		PTM	
Espèce	sapin/épinette	pin loblolly			
Durée de l'étuvage atm. des copeaux (min)	-	10		10	
Température du pré-traitement (°C)	-	97		128	
Durée du prétraitement (min)	-	6		6	
Na ₂ SO ₃ (%)	-	0		0	
Energie de raffinage (kWh/TMSA)	1240	2630	3000	2850	3000
Indice d'égouttage (ml)	84	100	73	100	82
Longueur des fibres (mm)	0,95	1,06	1,00	1,19	1,20
Taux de rejets (%)	-	1,05	1,05	0,29	0,20
Fraction R14 (%)	4,90	7,00	3,67	9,67	11,0
Fraction P200(%)	34,6	33,1	33,4	33,2	33,2
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,67	3,83	3,44	3,30	3,41
Longueur de rupture (km)	3,26	2,56	2,72	3,25	3,32
Allongement (%)	1,88	1,95	2,00	2,08	2,13
Indice d'éclatement (kPa.m ² /g)	1,69	1,36	1,41	1,74	1,82
Indice de déchirure (mN.m ² /g)	4,78	6,57	6,86	9,15	9,21
Indice de productivité (J/g)	2,84	2,99	3,11	3,99	4,09
Coeff. de diffusion (cm ² /g)	689	545	574	495	509
Coeff. d'absorption (cm ² /g)	19,2	26,3	36,7	33,6	33,6
Blancheur-iso (%)	56,3	56,7	57,2	53,3	53,3
Opacité (%)	98,5	94,7	95,1	94,2	94,0

La pâte mécanique de raffineur a un coefficient d'absorption de la lumière inférieur à celui de la pâte thermomécanique. L'élévation de la température noircit la pâte, ceci est particulièrement critique pour les pins qui contiennent un haut taux de résine. Le coefficient de diffusion de la lumière augmente avec la diminution de l'indice d'égouttage. Ces résultats sont en accord avec l'augmentation du pourcentage de fines et de la fibrillation des fibres lorsque l'indice d'égouttage diminue. Les pâtes mécaniques de raffineur contiennent un pourcentage de fines plus élevé et conduisent à un coefficient de diffusion de la lumière supérieur à celui d'une pâte thermomécanique. Le coefficient de diffusion de la lumière est aussi relié aux liens interfibres.

La blancheur des papiers augmente lorsque l'indice d'égouttage diminue en raison de l'augmentation du coefficient de diffusion de la lumière. Une température de procédé plus élevée entraîne une baisse de la blancheur. La pâte mécanique de raffineur conserve une blancheur supérieure (1,8 points à un indice d'égouttage de 100 ml) par rapport à une pâte thermomécanique. L'opacité des pâtes augmente avec la diminution de l'indice d'égouttage ou l'augmentation de l'énergie de raffinage due à une augmentation du pourcentage de particules fines. La pâte mécanique de raffineur possède un coefficient de diffusion de la lumière et une opacité

supérieurs à la pâte thermomécanique, ceci implique que la pâte mécanique de raffineur a de meilleures propriétés d'impression. Cependant, l'opacité des pâtes mécaniques de pin loblolly est inférieure à celle de la pâte de meule, car elles contiennent moins de fines (P200). Le coefficient de diffusion de la lumière des pâtes de pin loblolly est également inférieur. La blancheur de la pâte mécanique de raffineur (PMR) se compare à la pâte de meule. Le coefficient d'absorption de la lumière des pâtes mécaniques (PMR et PTM) est supérieur à la pâte de meule, à cause de la température d'opération supérieure.

En conclusion, des pâtes mécaniques de raffineur de pin loblolly de faible résistance mais ayant un coefficient de diffusion de la lumière, une blancheur et une opacité élevés peuvent être produites afin de remplacer la pâte de meule dans la fabrication du papier journal.

4.3 Comparaison des propriétés pour les procédés de mise en pâte chimico-thermomécanique et thermomécanique (PTM vs PCTM)

Dans le but d'améliorer les propriétés des pâtes thermomécaniques de pin loblolly présentées à la section 4.1, nous avons produit des pâtes chimico-thermomécaniques. Les propriétés des pâtes peuvent être améliorées par la sulfonation. Les propriétés papetières dépendent des conditions de traitement chimique comme par exemple, la charge en sulfite, le pH, la température d'étuvage et le temps de traitement. L'effet de ces variables sur la sulfonation des pâtes a été discuté précédemment⁽⁴³⁾.

En imprégnant les copeaux d'une liqueur à base de sulfite de sodium, une partie de la lignine est sulfonée. Suite à ce traitement, comme l'indique la figure 4.13, il est nécessaire d'appliquer de 10 à 20 % (selon la concentration en Na_2SO_3) plus d'énergie pour atteindre le même indice d'égouttage qu'une pâte thermomécanique. Ceci est en accord avec les changements au niveau du pourcentage de fines, de la fibrillation et de la flexibilité des fibres. En effet, l'introduction d'acide sulfonique brise le réseau ramifié de la lignine et le rend hydrophile augmentant ainsi la flexibilité des fibres⁽⁴⁴⁾.

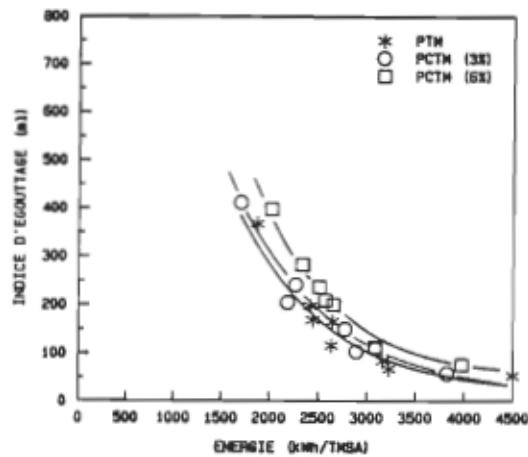


Figure 4.13 Relation indice d'égouttage-énergie

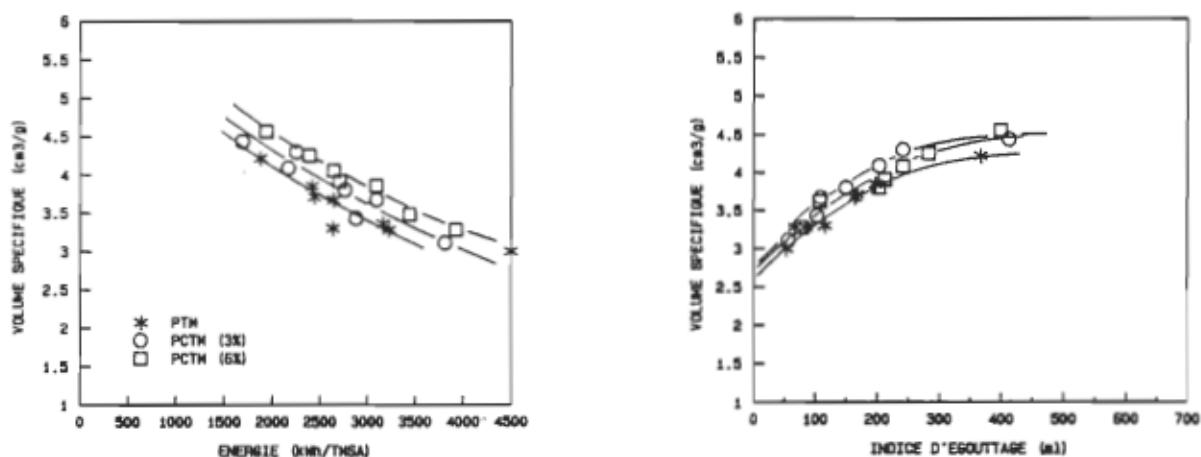


Figure 4.14 Volume spécifique en fonction de l'énergie
de raffinage et de l'indice d'égouttage

L'application du traitement chimique avant le raffinage a facilité la séparation des fibres, ceci se reflète par un taux de rejets pour les pâtes chimico-thermomécaniques (3% Na_2SO_3), d'un tiers à une demie fois inférieur à une pâte thermomécanique et jusqu'à des valeurs à toutes fins pratiques nulles dans le cas d'une pâte contenant 6 % de sulfite de sodium (figure 4.15). En comparant le pourcentage de fibres longues et le pourcentage de fines pour ces deux procédés (PTM et PCTM), nous constatons que les fibres sont moins endommagées (brisées, rompues) pour une PCTM comparativement aux fibres de PTM. En effet, on y retrouve (PCTM) un pourcentage de fibres longues (R14) plus élevé et un pourcentage de fines plus faible (figure 4.15). A un indice d'égouttage de 100 ml, la PCTM (3% Na_2SO_3) présente 11% de plus de fibres longues et 9% moins de fines qu'une PTM. Ces résultats conduisent donc à une longueur de fibres supérieure pour les PCTM. Ceci est attribué à une rupture plus nette dans la lamelle mitoyenne du copeau à cause de l'élévation de la température et de l'addition de sulfite ainsi qu'à une augmentation de la flexibilité des fibres et leur plus grande résistance lorsque soumises aux forces de cisaillement dans la zone de raffinage. De façon générale, la longueur de fibre ainsi que la fraction R14 diminue avec l'augmentation de l'énergie de raffinage ou la diminution de l'indice d'égouttage. Le traitement chimique permet également une amélioration de l'hydratation et du gonflement

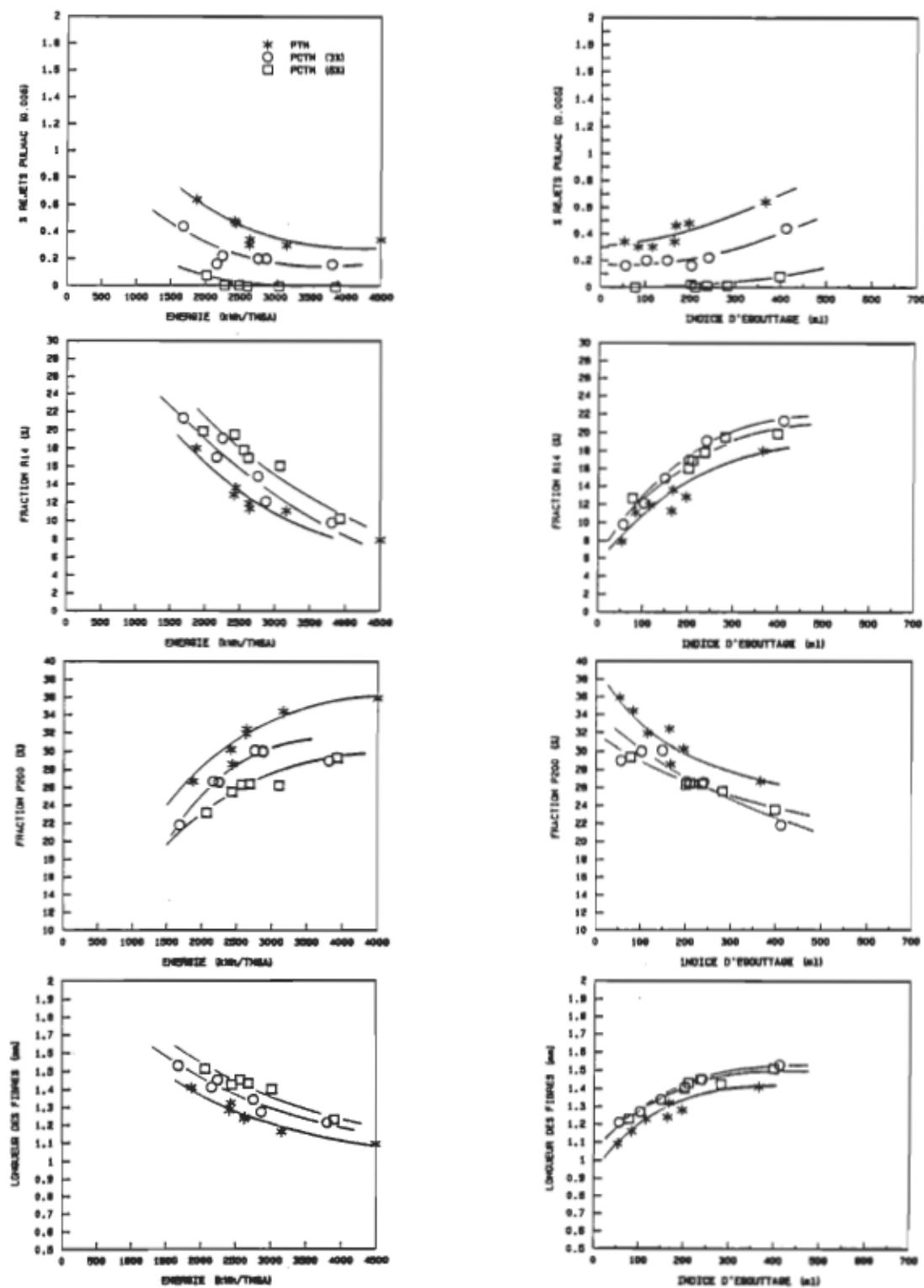


Figure 4.15 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

des fibres, une diminution du pourcentage de fines et des dislocations internes (rupture préférentielle dans la lamelle mitoyenne), on observe à la figure 4.14, une augmentation de la main en fonction du pourcentage de produit chimique.

La comparaison des propriétés mécaniques des papiers secs en fonction de l'indice d'égouttage à la figure 4.16 démontre que les pâtes chimico-thermomécaniques sont de qualité supérieure aux pâtes thermomécaniques au niveau de leurs propriétés de résistance. Cependant, les propriétés mécaniques du PCTM à 6 % en Na_2SO_3 sont à peu près égales au PCTM à 3% en Na_2SO_3 au niveau de la longueur de rupture et la résistance à l'éclatement. L'allongement est même inférieur. L'indice de déchirure des PCTM (6% Na_2SO_3) est de 2 à 10% supérieur à celui des PCTM (3% Na_2SO_3). Lorsque ces mêmes propriétés mécaniques sont comparées en fonction de l'énergie de raffinage, on observe une amélioration de ces dernières pour la PCTM (3% Na_2SO_3) par rapport à la PTM. La PCTM (6% Na_2SO_3) présente des propriétés plus faibles que la PCTM (3% Na_2SO_3). De façon générale, en ce qui concerne les propriétés physiques, les pâtes chimico-thermomécaniques n'apportent que peu d'amélioration malgré une longueur de fibres plus élevée. Il est probable d'une part que la rupture du copeaux dans la lamelle mitoyenne (PTCM), entraînant une diminution de la fibrillation, comparativement à une rupture le long de la paroi S_1/S_2 (PTM), contre-

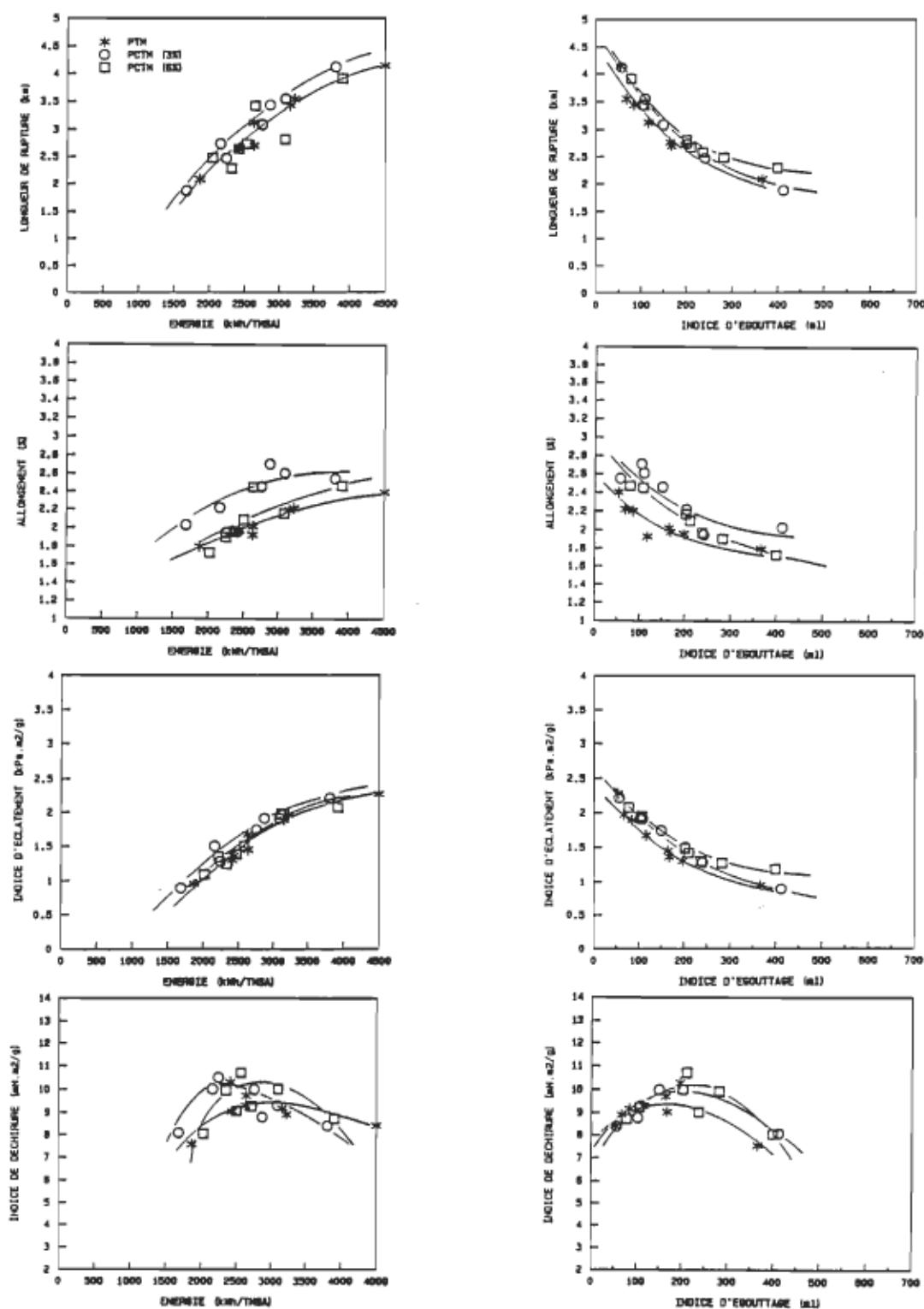


Figure 4.16 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

balance l'augmentation prévue par les gains de longueur des fibres des PCTM. D'autre part, tel que discuté par Heitner et Hattula⁽⁴⁵⁾ qui ont observé un minimum dans la longueur de rupture en fonction du taux de sulfonation, il semble que ces résultats soient dus à une diminution du pourcentage de fibres courtes (fines) qui contre-balance toute amélioration de la longueur de rupture causée par l'augmentation de la flexibilité des fibres résultant d'un léger taux de sulfonation ou dû au fait qu'un léger taux de sulfonation. Nous croyons d'autre part qu'une partie des effets est associé à la qualité du bois utilisé. Le bois vert ne réagit pas comme le bois vieilli (sec) lorsqu'il est imprégné avec du sulfite. Sur un bois vieilli, l'augmentation de la charge en sulfite améliore les propriétés mécaniques du papier alors que pour le bois vert, les propriétés mécaniques en fonction de la charge en sulfite passe par un minimum. C'est-à-dire qu'à une faible charge en sulfite, l'on observe une amélioration des propriétés, mais en augmentant cette charge, les propriétés mécaniques sont diminuées; ce n'est qu'à une haute charge que l'on observe une remontée des propriétés mécaniques. Il s'agit d'un sujet de recherche intéressant pour une étude ultérieure. Du bois vert a été utilisé dans la présente étude.

L'imprégnation des copeaux par une solution de sulfite de sodium modifie les propriétés optiques du papier. Puisque

le traitement chimique réduit considérablement le pourcentage de fines, le papier produit permettra une diffusion moins grande de la lumière que pour une PTM (figure 4.17). De plus, cette diminution en particules fines entraîne une diminution de l'opacité des PCTM autant à indice d'égouttage, qu'à énergie spécifique comparable.

L'addition de sulfite de sodium lors de l'étuvage des copeaux a permis d'augmenter de 4 à 5 points la blancheur initiale des pâtes. Le sulfite de sodium ajouté fixe des groupements SO_3^- sur les chromophores de la lignine, ce qui entraîne une diminution de coefficient d'absorption de la lumière. Il existe une relation complexe entre la diffusion, l'opacité, l'absorption et la blancheur, elle est illustrée à la figure 4.18.

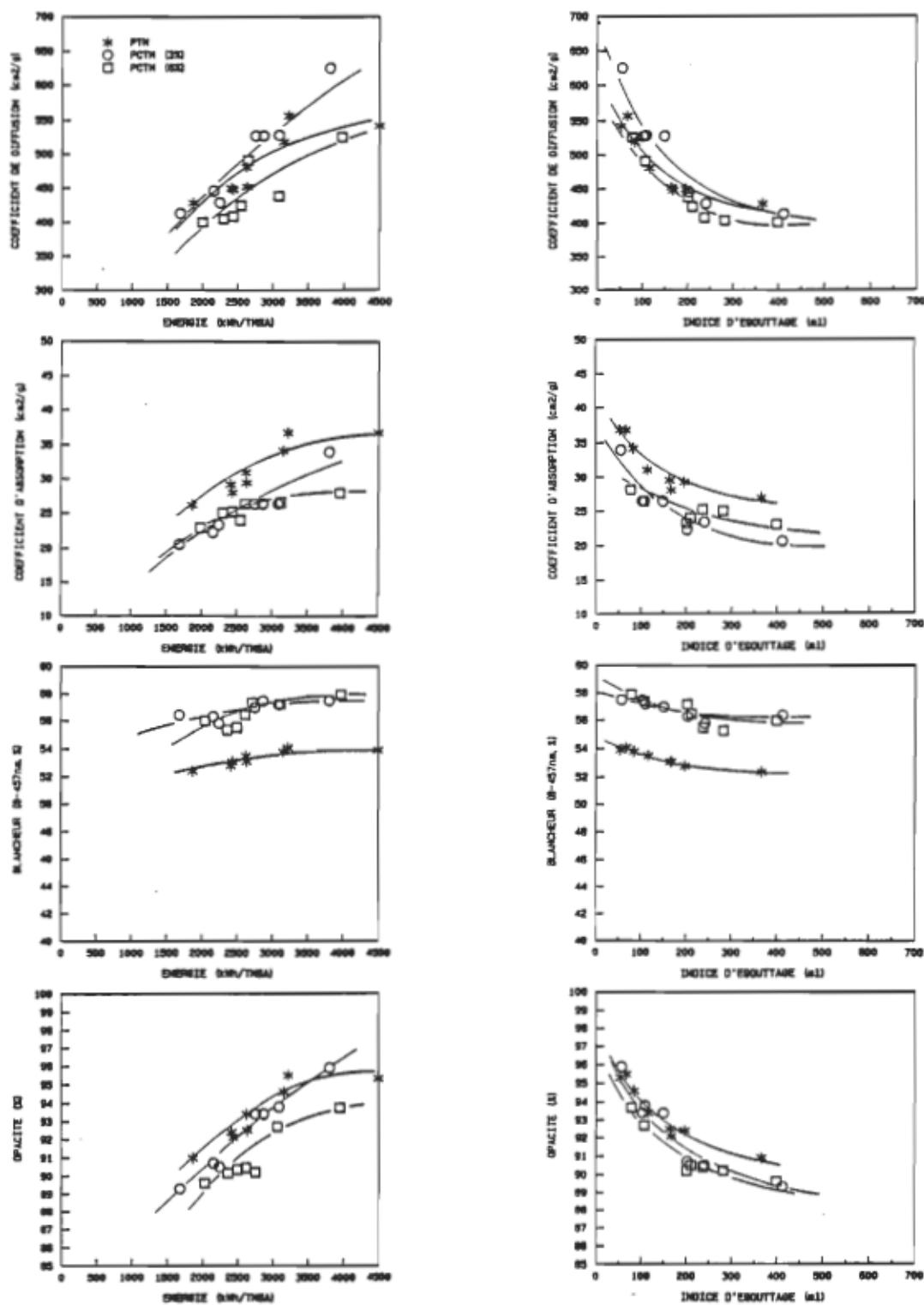


Figure 4.17 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

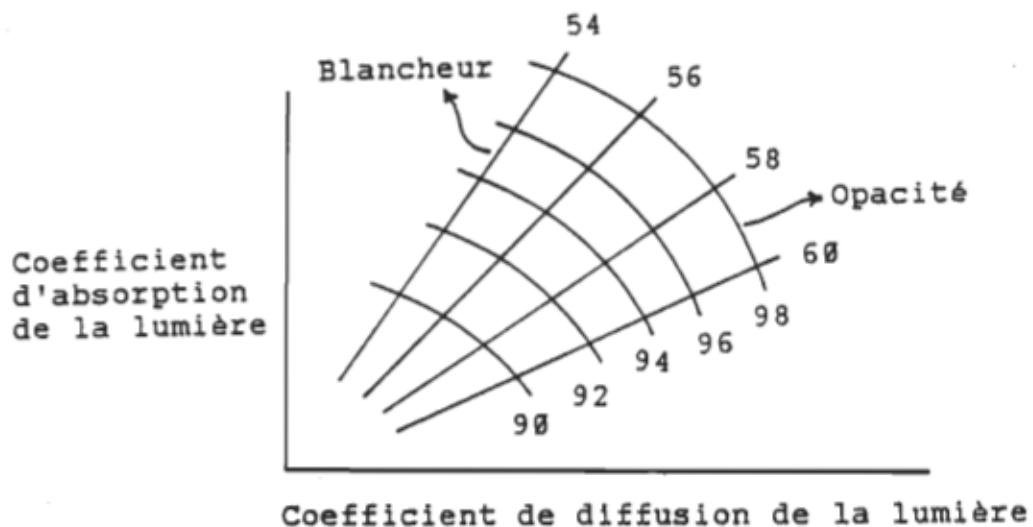


Figure 4.18 Schématisation de la relation existant entre les différentes propriétés optiques

De cette figure, on peut également conclure que le coefficient d'absorption de la lumière diminue pour une pâte CTMP. Sachant que la blancheur et le coefficient de diffusion de la lumière augmentent et que l'opacité diminue, la résultante de ces tendances fait en sorte que le coefficient d'absorption de la lumière doit diminuer. Le tableau 4.3 présente une comparaison de l'ensemble des propriétés selon les différents procédés à des indice d'égouttage de 100 ml et une énergie de raffinage de 3000 kWh/TMSA. Jackson et al (24) ont obtenus des résultats comparables pour une pâte thermomécanique et une pâte chimico-thermomécanique.

Des tableaux 2.6 (24) et 4.3, nous pouvons retenir qu'une PCTM (3% Na₂SO₃) par rapport à une PTM pour le pin loblolly demande plus d'énergie de raffinage (8,5 à 10,5%), donne des longueurs de fibres plus élevées, permet d'améliorer les propriétés de résistance, donne une blancheur supérieure (3,8 points) mais présente une opacité inférieure de 0,6 point.

Tableau 4.3

Comparaison de PCTM et de PTM à énergie constante
et à indice d'égouttage donné

Procédé	PTM		PCTM	
Durée de l'étuvage atm. des copeaux (min)	10		10	10
Température du pré-traitement (°C)	128		128	128
Durée du pré-traitement (min)	6		6	6
Na ₂ SO ₃ (%)	0		3	6
Taux de sulfonation (mmol HSO ₃ /kg)	0		38	61
Energie de raffinage (kWh/TMSA)	2850	3000	3150	3000
Indice d'égouttage (ml)	100	108	100	123
Longueur des fibres (mm)	1,19	1,20	1,25	1,29
Taux de rejets (%)	0,33	0,35	0,14	0,20
Fraction R14 (%)	11,0	11,0	12,5	12,7
Fraction P200 (%)	33,4	33,2	30,5	30,3
Volume spécifique (cm ³ /g)	3,37	3,41	3,48	3,64
Longueur de rupture (km)	3,25	2,32	3,58	3,50
Allongement (%)	2,11	2,13	2,58	2,55
Indice de d'éclatement (kPa.m ² /g)	1,79	1,82	1,98	1,98
Indice de déchirure (mN.m ² /g)	9,15	9,41	9,18	9,05
Indice de productivité (J/g)	4,05	4,14	4,26	4,23
Coeff. de diffusion (cm ² /g)	512	509	547	525
Coeff. d'absorption (cm ² /g)	33,0	33,6	29,6	28,6
Blancheur-iso (%)	53,7	53,3	57,5	57,6
Opacité (%)	94,2	94,3	93,6	93,6
			490	477
			27,0	27,1
			57,7	57,2
			92,8	92,3

4.14 Comparaison des propriétés de pâtes mécaniques de raffineur, thermomécaniques, chimico-thermomécaniques et chimico-mécaniques de pin loblolly avec une pâte thermomécanique d'un mélange sapin/épinette

Dans cette section nous avons comparé les trois procédés de mise en pâte vus jusqu'à maintenant au procédé de mise en pâte chimico-mécanique (CMP). En plus d'une comparaison des quatre procédés de mise en pâte de pin loblolly, chaque graphique situe les propriétés des pâtes par rapport aux propriétés d'une pâte thermomécanique de sapin/épinette. Il est à noter que les énergies de raffinage ont été multipliées par un facteur de 0.75 comparativement aux sections précédentes afin de les comparer directement aux énergies obtenues pour des raffineurs de type commercial. Puisque cette section englobe une partie des résultats discutés précédemment, la discussion qui suit met l'accent sur les particularité de la mise en pâte chimico-mécanique par rapport aux autres procédés.

Tel que discuté précédemment, le prétraitement chimique des copeaux augmente l'énergie de raffinage nécessaire pour atteindre un indice d'égouttage donné (figure 4.19). Cependant, un prétraitement chimique à une concentration en Na_2SO_3 élevée soit 18% (PCM) réduit l'énergie de raffinage nécessaire. L'énergie requise se situe à un niveau inférieur à la pâte thermomécanique mais demeure supérieur à la pâte mécanique de raffineur. Les pâtes chimico-mécaniques

possèdent moins de fines et des fibres plus flexibles que les pâtes PCTM et PTM, la relation indice d'égouttage-énergie se trouve déplacée à des niveaux d'énergie de raffinage inférieurs. Il est à noter que seule une pâte mécanique de raffineur pin loblolly présente des énergies de raffinage comparables à une PTM de sapin/épinette. De plus, l'utilisation du pin loblolly requiert 18% plus d'énergie de raffinage pour la mise en pâte PTM, à un indice d'égouttage de 150 ml, comparativement à la mise en pâte PTM d'un mélange sapin/épinette.

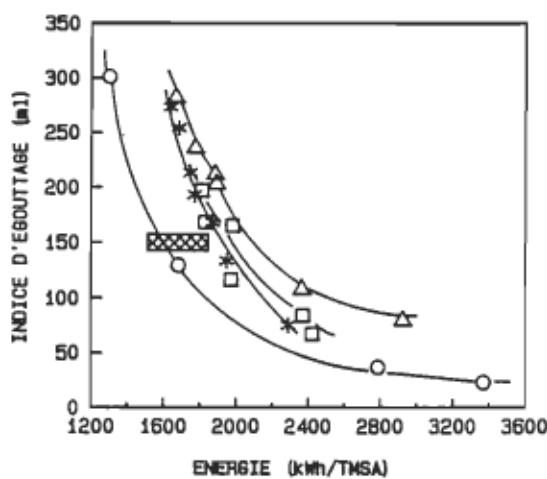


Figure 4.19 Relation indice d'égouttage-énergie

Le prétraitement du bois a pour effet de diminuer le volume spécifique (figure 4.20). Bien qu'une charge faible en sulfite de sodium (PCTM 6% Na₂SO₃) augmente le volume

spécifique par rapport à une pâte thermomécanique, une haute charge (PCM) réduit le volume spécifique de 7% à un indice d'égouttage de 100 ml. Néanmoins, l'on devra atteindre des indices d'égouttage d'environ 50 ml ou raffiner à des énergies d'au delà de 3300 kWh/TMSA pour obtenir un volume spécifique comparable à celui d'un mélange sapin/épinette.

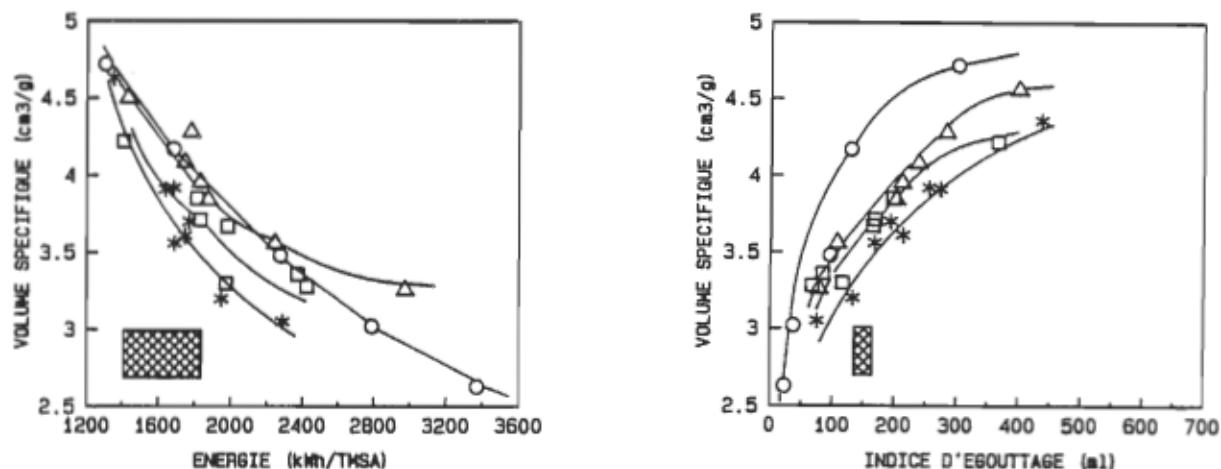


Figure 4.20 Volume spécifique en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

Les propriétés des pâtes sont présentées à la figure 4.21. Le prétraitement chimique des copeaux réduit considérablement le taux de rejets dû à une meilleure séparation des fibres. Plus le prétraitement est sévère, plus le taux de rejets est faible. Les résultats obtenus pour les taux de rejets des pâtes chimico-mécaniques (PCM) montrent que le patron des plaques du raffineur Defibrator utilisées lors de la présente étude n'est pas conçu pour un tel procédé de mise en pâte. Les taux de rejets semblent anormalement élevés. La fraction R14 ainsi que la longueur de fibre sont améliorées par l'augmentation de la température du procédé et de la charge en sulfite de sodium alors que le pourcentage de fines (P200) est réduit. La longueur des fibres est égale ou supérieure à celle d'un mélange sapin/épinette.

L'on constate à la figure 4.22 que les propriétés mécaniques des papiers, comme la longueur de rupture ou l'indice d'éclatement, sont fonction de la sévérité du prétraitement que l'on fait subir aux copeaux. En d'autres termes plus le rendement d'un procédé est bas, meilleures seront ces propriétés de résistance. La pâte chimico-mécanique a subi un prétraitement chimique plus sévère ce qui mène effectivement à une longueur de rupture supérieure. Suivent successivement, la pâte chimico-thermomécanique (PCTM), la thermomécanique (PTM) et

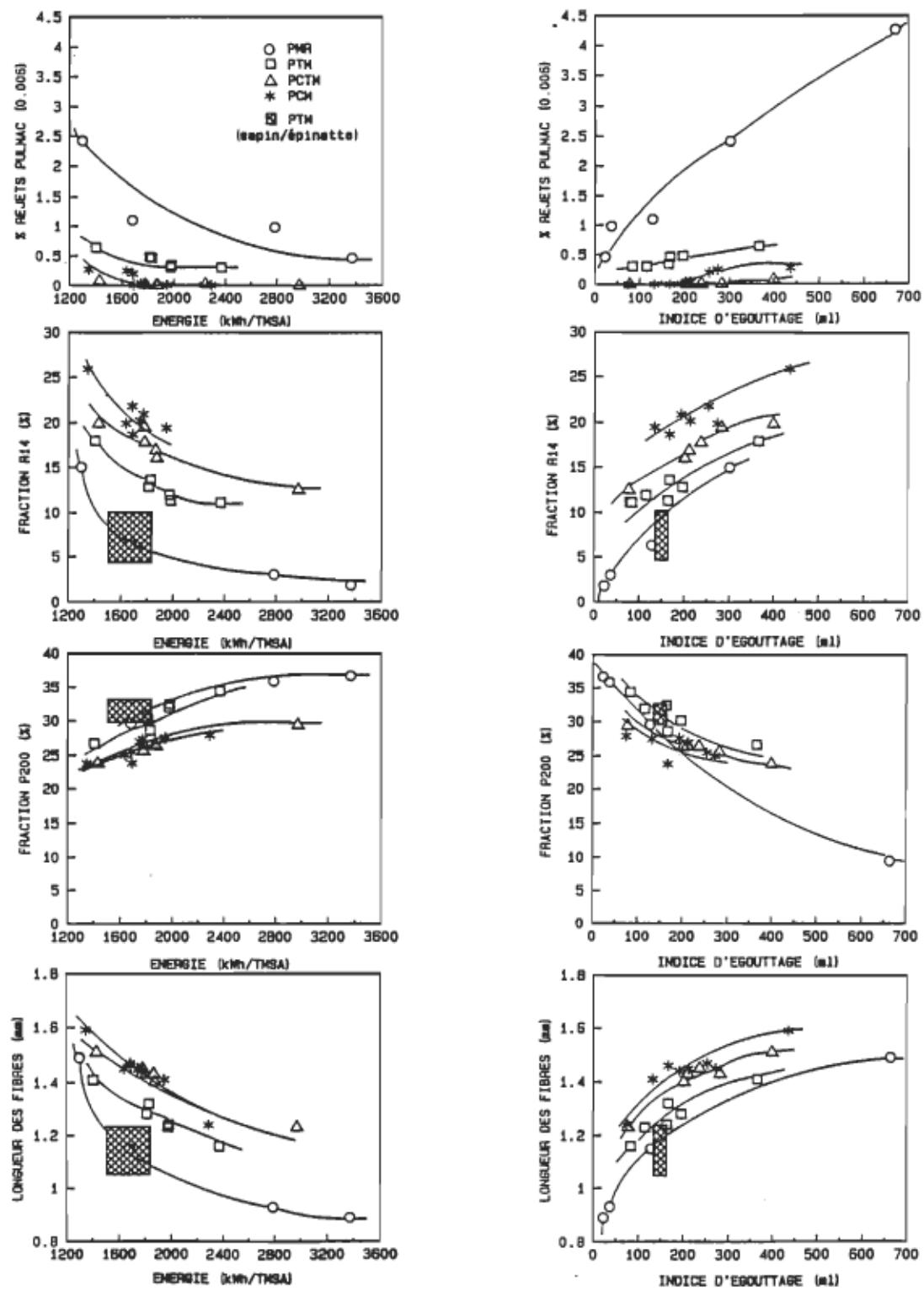
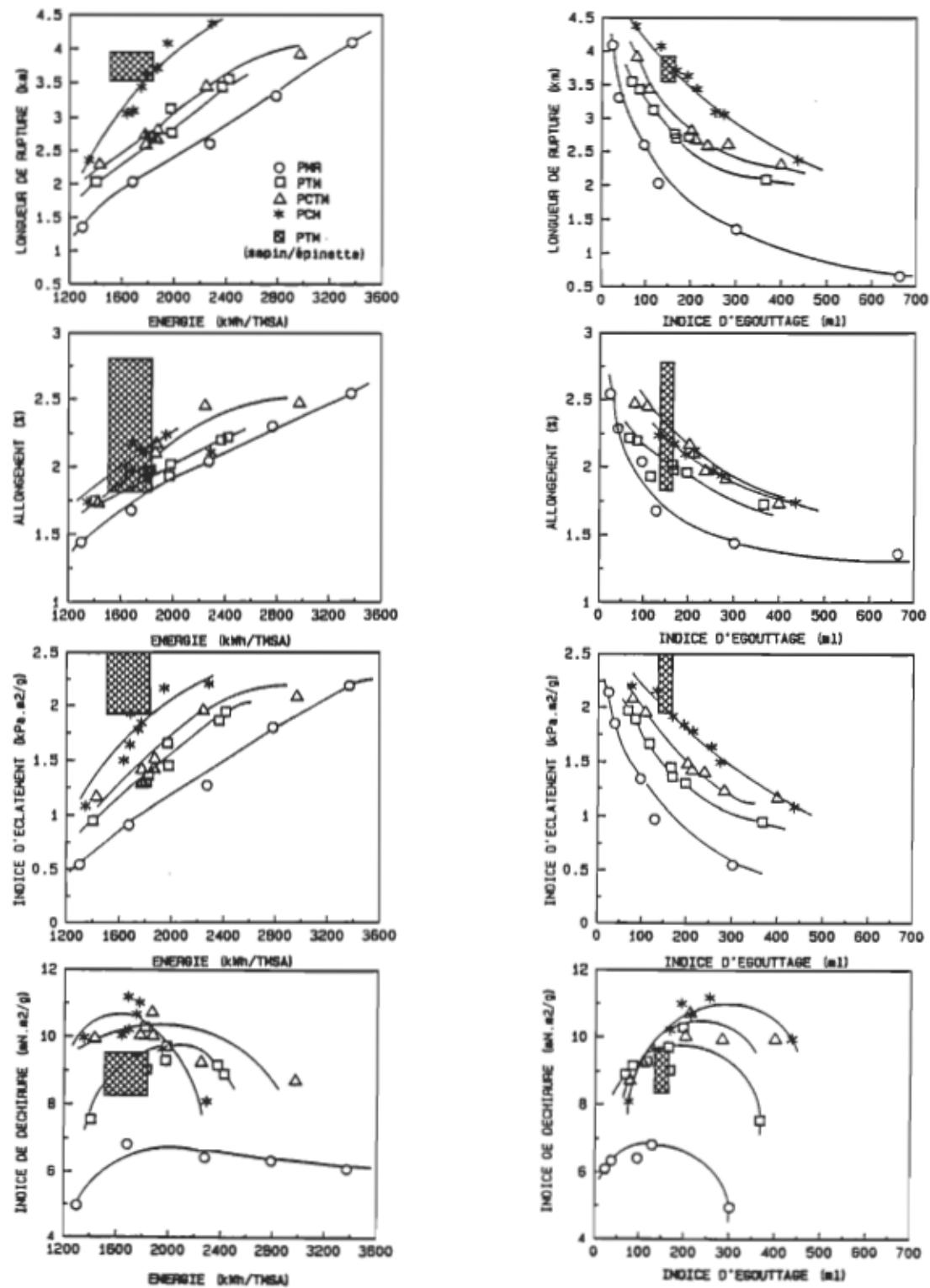


Figure 4.21 Propriétés des pâtes en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage



Figures 4.22 Propriétés de résistance en fonction de l'énergie de raffinage et de l'indice d'égouttage

la pâte mécanique (PMR). L'on peut noter également que seule un pâte chimico-mécanique de pin loblolly nous permet d'obtenir des propriétés mécaniques (longueur de rupture ou indice d'éclatement) se rapprochant d'un mélange sapin/épinette, à moins d'appliquer plus d'énergie de raffinage et ainsi réduire l'indice d'égouttage.

L'indice de déchirure en fonction de l'indice d'égouttage ou de l'énergie de raffinage passe par un maximum. Le maximum atteint se déplace vers des indices d'égouttage plus élevés, plus le prétraitement chimique est sévère. En effet, l'indice de déchirure atteint sa valeur maximale à un indice d'égouttage d'environ 300 ml pour une pâte chimico-mécanique alors que pour les PCTM, cette valeur se situe autour de 200 ml et entre 100-150 ml pour les PTM.

Le prétraitement des copeaux réduit le pourcentage de fines dans la pâte, le coefficient de diffusion de la lumière et l'opacité des pâtes prétraitées sont inférieures par rapport à une pâte mécanique de raffineur ainsi que par rapport à une pâte thermomécanique de sapin/épinette (figure 4.23). L'addition de sulfite de sodium dans l'étuveur permet de réduire le coefficient d'absorption de la lumière et d'augmenter la blancheur des pâtes. Le coefficient d'absorption de la lumière des pâtes chimico-mécaniques (PCM) est supérieur à celui des pâtes chimico-thermomécaniques

(PCTM), ceci est le résultat d'un plus haut contenu en groupements chromophores à cause des conditions plus sévères de mise en pâte (haute température principalement) en plus d'une diminution du coefficient de diffusion de la lumière. Pour un mélange sapin/épinette, les valeurs du coefficient d'absorption de la lumière sont de 34 à 37 cm²/g, ce qui est supérieur au pin.

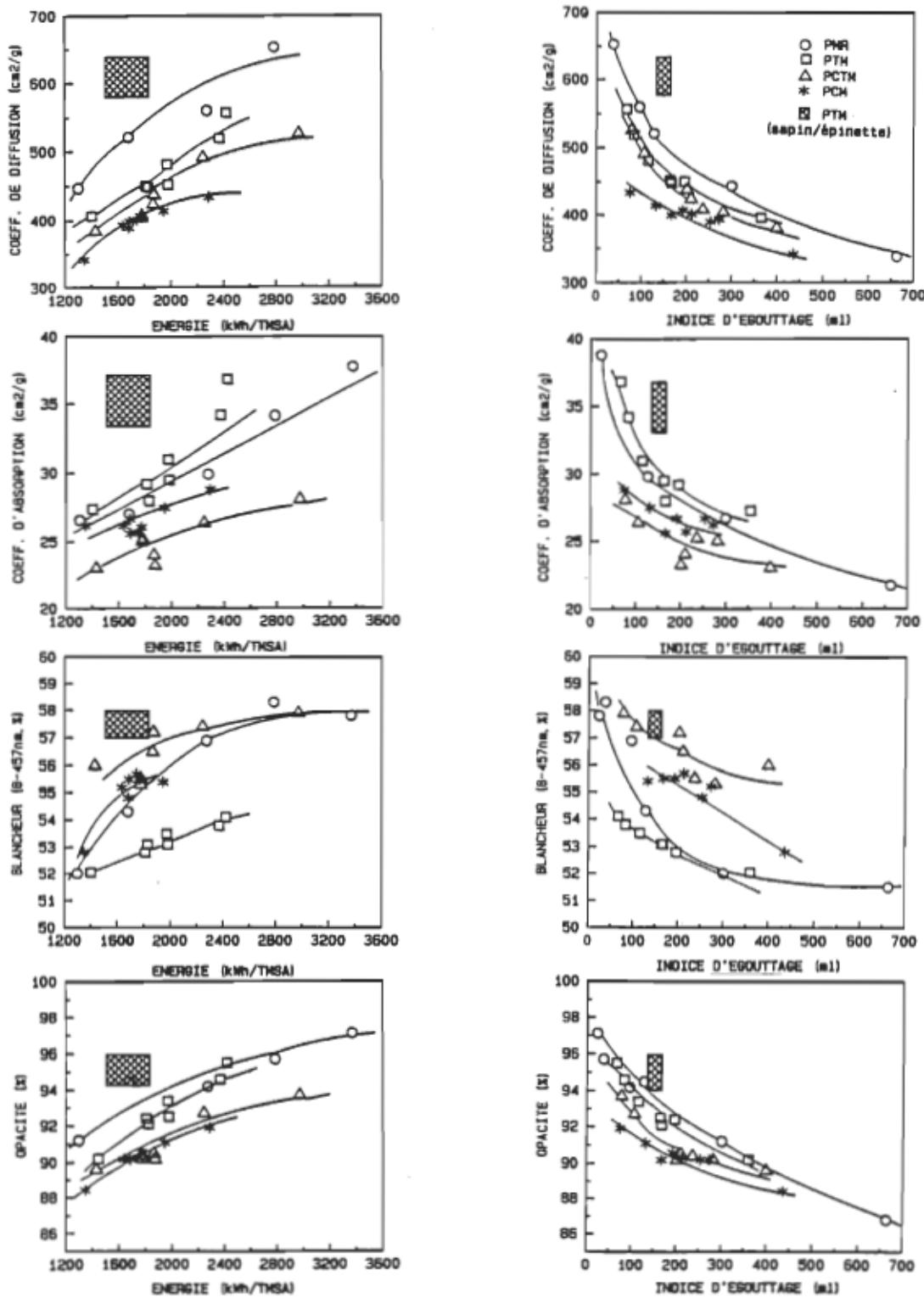


Figure 4.23 Propriétés optiques en fonction de l'énergie de raffinage et de l'incide d'égouttage

Tableau 4.4

Comparaison de pâtes mécaniques et chimico-mécaniques

<u>Essence</u>	<u>Sapin/épinette</u>		<u>Pin loblolly</u>			
<u>Procédé</u>	<u>PTM</u>	<u>PCTM</u>	<u>PMRP</u>	<u>PTM</u>	<u>PCTM</u>	<u>PCM</u>
Température du pré-traitement ($^{\circ}\text{C}$)	128	128	97	128	128	140
Durée du pré-traitement (min)	6	6	6	6	6	30
Na_2SO_3 (%)	-	3	-	-	6	18
Taux de sulfonation (mmole HSO_3/kg)	-	46	-	-	61	93
Energie de raffinage (kWh/TMSA)	1730	2050	1970	2140	2560	2070
Indice d'égouttage (ml)	150	150	100	100	100	100
Longueur des fibres (mm)	1,20	1,33	1,10	1,19	1,27	1,38
Taux de rejets (%)	0,63	0,20	1,1	0,3	0,0	0,0
Volume spécifique (cm^3/g)	2,92	2,84	3,83	3,37	3,64	3,06
Longueur de rupture (km)	3,68	4,11	2,56	3,25	3,60	4,25
Allongement (%)	2,44	2,85	1,75	2,16	2,50	2,37
Indice d'éclatement ($\text{kPa.m}^2/\text{g}$)	2,41	2,82	1,38	1,79	2,04	2,25
Indice de déchirure ($\text{mN.m}^2/\text{g}$)	9,5	10,1	6,6	9,2	9,2	9,2
Indice de productivité (J/g)	4,48	5,34	3,00	4,05	4,33	4,55
Coeff. de diffusion (cm^2/g)	602	539	560	512	490	436
Coeff. d'absorption (cm^2/g)	35,0	28,7	31,0	33,0	27,0	28,4
Blancheur-iso (%)	57,5	59,6	55,5	53,7	57,7	56,0
Opacité (%)	95,5	94,2	94,9	94,2	92,8	91,8

4.2 Résultats de blanchiment

Puisqu'il est à prévoir que les pâtes mécaniques et chimico-mécaniques de pin loblolly seront utilisées dans une gamme variée de produits papetiers, nous avons poursuivi la présente étude en blanchissant les pâtes produites avec le peroxyde d'hydrogène et l'hydrosulfite de sodium.

4.2.1 Blanchiment des pâtes au peroxyde d'hydrogène

Les résultats de blanchiment des pâtes mécaniques de raffineur (PMR) et des pâtes thermomécaniques (PTM) avec du peroxyde d'hydrogène sont illustrés à la figure 4.24. Nous avons porté en graphique les courbes de la blancheur en fonction de la charge en peroxyde ajouté ou consommé.

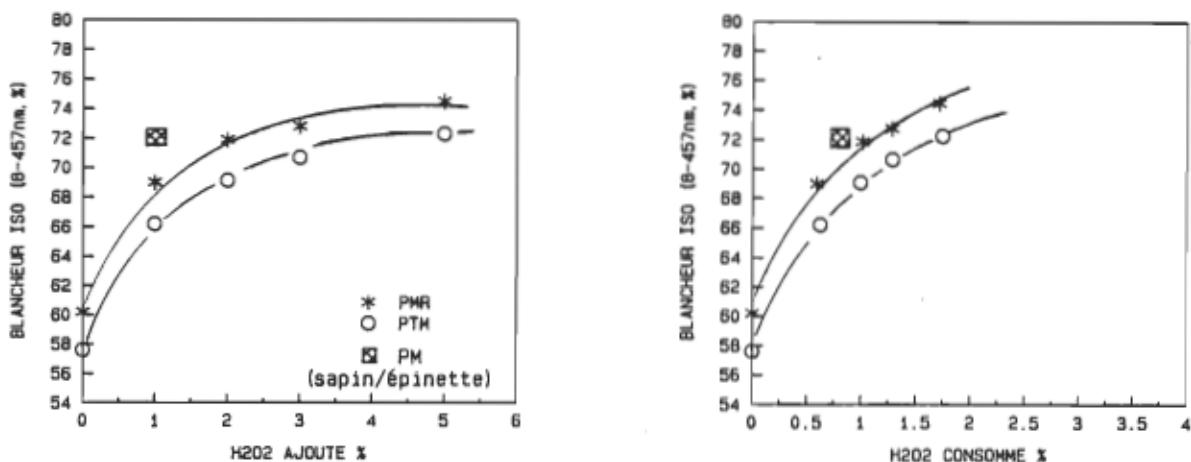


Figure 4.24 Blanchiment de pâtes mécaniques

L'on observe que la blancheur initiale de la pâte mécanique de raffineur est supérieure à la pâte thermomécanique. L'étuvage des copeaux de pin loblolly, précédant le raffinage lors de la mise en pâte thermomécanique, améliore les propriétés de résistance des papiers, mais la blancheur est de 2.6 points inférieure due à la modification des groupements chromophores de la lignine à haute température. Cette différence de blancheur entre les deux pâtes se maintient après le blanchiment, pour une charge donnée de peroxyde. La blancheur de la pâte mécanique de raffineur blanchie est donc plus élevée que la pâte thermomécanique blanchie. Les résultats pour le blanchiment de la pâte de meule⁽⁴⁶⁾ de sapin/épinette avec une charge de 1% de peroxyde ajouté ont permis un gain de 11 points de blancheur soit une blancheur supérieure à la pâte mécanique de raffineur (PMR) pour une consommation de peroxyde inférieure.

A la figure 4.25 est comparé le potentiel de blanchiment des pâtes chimico-thermomécaniques produites avec des charges de 3 et 6% en sulfite de sodium à celui d'une pâte thermomécanique. Le blanchiment au peroxyde augmente la blancheur des pâtes. La blancheur initiale des pâtes chimico-thermomécaniques (PCTM) est supérieure à la pâte thermomécanique. Le sulfite de sodium ajouté dans l'étuveur lors de ce procédé de mise en pâte améliore les propriétés

des pâtes et agit comme un agent de blanchiment. La blancheur des pâtes chimico-thermomécaniques blanchies au peroxyde est supérieure à la pâte thermomécanique. De plus, pour une blancheur donnée, les pâtes PCTM consomment moins de peroxyde qu'une pâte PTM.

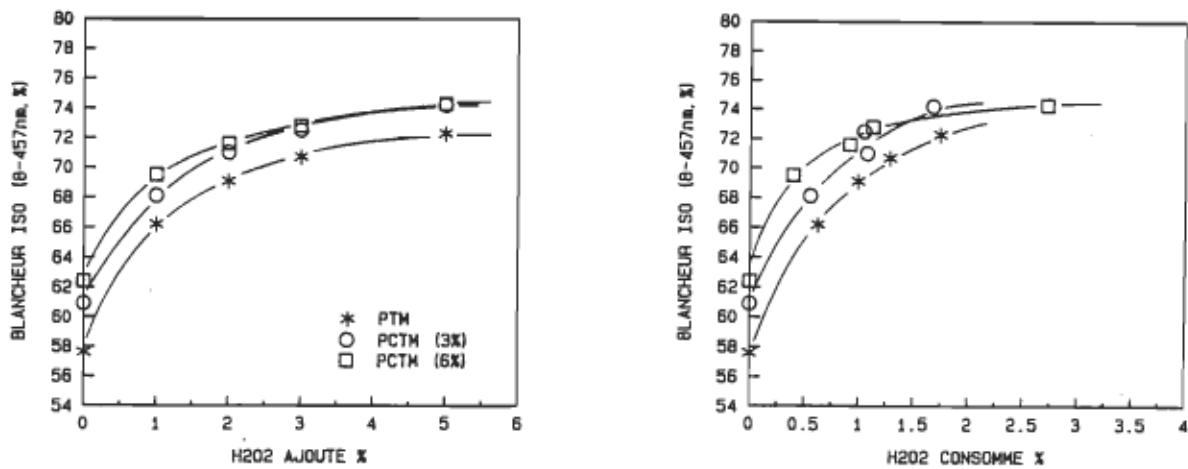


Figure 4.25 Blanchiment de pâtes chimico-thermomécaniques

Dodson et al.⁽⁴⁷⁾ ont effectué des blanchiments au peroxyde d'hydrogène en un stade sur des pâtes PTM, PCTM et PCM de pin loblolly. Pour une même charge ajoutée, leurs résultats démontrent que la PCTM atteint les blancheurs les plus élevées suivie de la PTM et finalement de la PCM. Les

mêmes observations peuvent être déduites à la figure 4.26 qui compare la réponse au blanchiment des quatre procédés de mise en pâte discutés. La PMR et la PCTM (3% Na₂SO₃) consomment le peroxyde lors du blanchiment de façon presque identique. Ceci nous rappelle l'importance d'un bon contrôle des conditions de prétraitemet du bois afin d'éviter le noircissement de la pâte à haute température et/ou d'utiliser efficacement le sulfite de sodium comme agent de préblanchiment. La PMR donne des blancheurs supérieures à la PCTM.

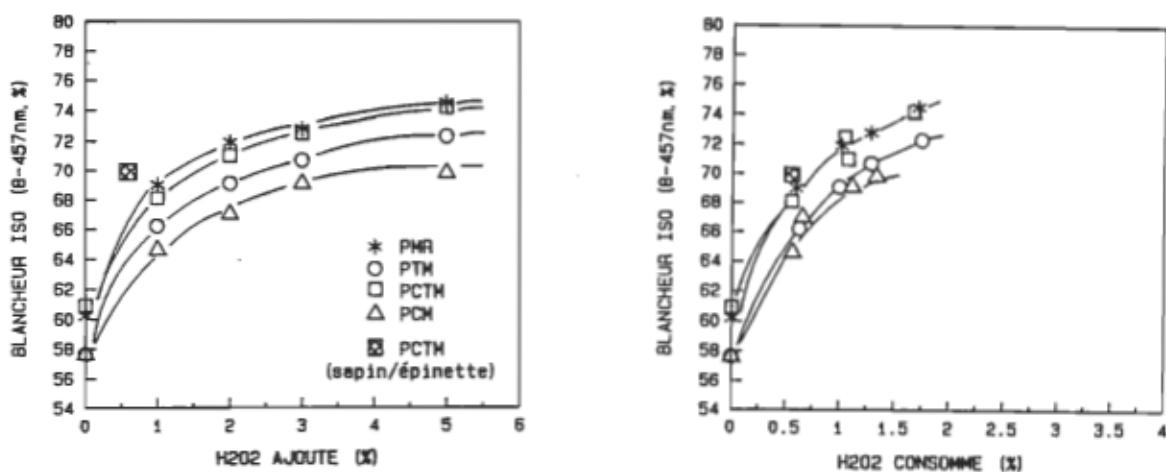


Figure 4.26 Blanchiment de pâtes mécaniques et chimico-mécaniques

La faible blancheur initiale des pâtes PCM découle du faible coefficient de diffusion de la lumière de ces pâtes. Par conséquent, des blancheurs maximales supérieures peuvent être obtenues en blanchissant une pâte PCTM suivie des pâtes PTM et PCM. La blancheur initiale de la PCM et de la PTM sont similaires, cependant la PCM atteint un plateau à des niveaux de blancheur inférieurs alors qu'elle consomme davantage de peroxyde que la PTM. Ceci démontre l'importance du lavage des pâtes avant le blanchiment dans le but d'éliminer effectivement le sulfite résiduel dans la pâte. La présence de sulfite dans la pâte décompose une partie du peroxyde. Lorsque l'on compare la pâte PCTM de pin loblolly avec la pâte PCTM d'un mélange de sapin/épinette, l'on observe qu'une charge plus élevée de peroxyde est requise pour blanchir le pin loblolly à une blancheur donnée. Cependant, la charge en peroxyde résiduel (c'est-à-dire la différence entre le peroxyde ajouté et le peroxyde consommé) est supérieure pour le pin loblolly comparativement au mélange sapin/épinette. D'importants bénéfices peuvent donc être obtenus en recirculant et réutilisant le peroxyde résiduel lors du blanchiment des pâtes de pin loblolly.

Le tableau 4.5 présente les résultats de blanchiment au peroxyde d'hydrogène en un stade pour une blancheur de 70% iso. Les résultats après réversion thermique indique de façon générale, que la PTM subit la plus faible perte de

blancheur comparativement aux autres types de pâte et qu'une augmentation de la charge en sulfite semble diminuer la stabilité de blancheur.

Tableau 4.5

Blanchiment des pâtes PMR, PTM, PCTM et PCM

	PMR	PTM	PCTM(3%)	PCTM(6%)	PCM
Blancheur iso initiale (%)	60,2	57,6	60,9	62,4	57,5
Blancheur iso après blanchiment (%)	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
Peroxyde ajouté (%)	1,35	2,35	1,55	1,20	5,20
Peroxyde consommé (%)	0,75	1,18	0,81	0,50	1,50
Perte en points de blancheur (après réversion thermique)	2,0	1,3	1,6	1,8	1,9

4.2.2 Comparaison des résultats avec d'autres essences

Des pâtes chimico-thermomécaniques (3% en Na_2SO_3) de pin loblolly, de pin gris et d'un mélange sapin/épinette ont été blanchies au peroxyde d'hydrogène en un stade (figure 4.27). La blancheur initiale des pins est inférieure à un mélange sapin/épinette. Les courbes de la blancheur iso en fonction de la charge en peroxyde sont parallèles, mais inférieures pour les pins comparativement à un mélange sapin/épinette. Cette différence entre les pins et le mélange sapin/épinette est attribuée au haut taux de matières extractibles présent des pins. Les pins consomment davantage de peroxyde à des blancheurs inférieures inférieures à 72% iso comparativement au sapin et à l'épinette. Pour les pins, une charge de 1% consomme environ 0.75% du peroxyde alors pour que le mélange sapin/épinette environ 0.90% de peroxyde est consommé. Le mélange sapin/épinette utilise donc davantage le peroxyde disponible. La charge en peroxyde résiduel est donc plus élevée pour les pins impliquant des bénéfices potentiels réalisables avec une stratégie de recirculation de ce peroxyde résiduel. Le tableau 4.6 compare des résultats de blanchiment au peroxyde en un stade de différentes essences, permettant d'obtenir une blancheur de 70% iso.

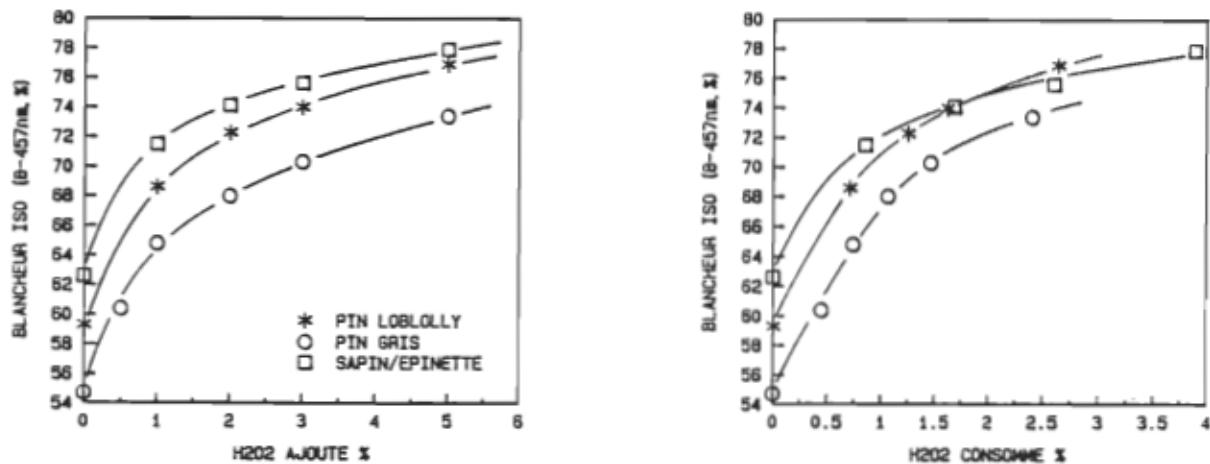


Figure 4.27 Blanchiment au peroxyde de différentes essences

Tableau 4.6
Blanchiment de différentes essences

Essences	Pin loblolly	Pin loblolly	Pin gris	Sapin/épinette
Blancheur iso initiale (%)	59,3	60,9	54,7	62,6
Blancheur iso après blanchiment (%)	70,0	70,0	70,0	70,0
Peroxyde ajouté (%)	1,40	1,55	3,00	0,75
Peroxyde consommé (%)	0,89	0,81	1,50	0,64
Blancheur iso maximale (%)	76,9	74,2	73,4	77,9
Consistance (%)	15	10	15	15
Température (°C)	70	70	70	70
Temps de rétention (h)	1,5	1,5	1,0	1,5

En comparant les deux pâtes chimico-thermomécaniques (PCTM) de pin loblolly, blanchies à 10 et 15% de consistance, l'on peut constater une augmentation de la blancheur à plus haute consistance pour une même charge de peroxyde ajouté (5%).

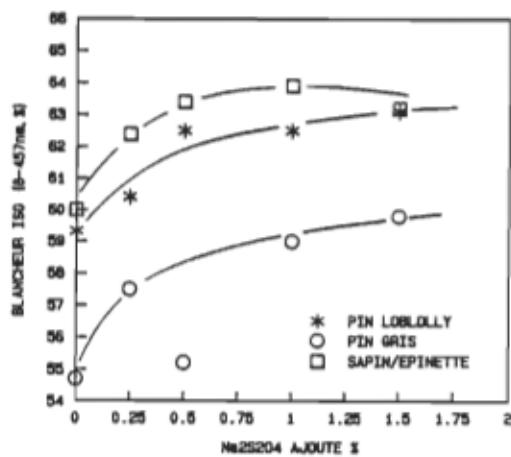
4.2.3 Blanchiment des pâtes à l'hydrosulfite de sodium

Une pâte PCTM de pin loblolly a été blanchie avec de l'hydrosulfite de sodium. Les résultats sont comparés avec ceux du pin gris et d'un mélange sapin/épinette à la figure 4.28. Avec l'hydrosulfite de sodium, des blancheurs comprises entre 60 et 64% iso sont obtenues comparativement à des blancheurs entre 60 et 78% iso pour le peroxyde (figure 4.27). Le blanchiment au peroxyde augmente donc la blancheur des pâtes de façon plus appréciable et offre donc une plus grande flexibilité ainsi que de hauts niveaux de blancheur nécessaires à la production de papier journal et des autres papiers spécialisés. Cependant, les coûts de blanchiment requis pour une blancheur donnée de 62% iso (tableau 4.7) sont plus élevés pour le peroxyde comparativement à l'hydrosulfite de sodium. Dans une gamme de faibles blancheurs (55-62% iso), l'hydrosulfite est l'agent de blanchiment le plus économique. Si de hauts niveaux de blancheur (70-72% iso) sont désirés, le peroxyde d'hydrogène est l'agent de blanchiment nécessaire.

Tableau 4.7

Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium et
peroxyde d'hydrogène

PCTM	Hydrosulfite de sodium	Peroxyde d'hydrogène
Blancheur iso initiale (%)	59,3	59,3
Blancheur iso après blanchiment (%)	62,0	62,0
Hydrosulfite de sodium ajouté (%)	0,55	-
Peroxyde d'hydrogène ajouté (%)	-	0,25
Coût en produits chimiques de blanchiment (US\$/TMSA)	11,80	14,30
Blancheur iso maximale (%)	76,9	63,1

Figure 4.28 Blanchiment à l'hydrosulfite de sodium.

4.3 Analyse technico-économique des procédés de mise en pâte pour le pin loblolly

Dans cette section, nous avons fait une analyse technico-économique des différents procédés de mise en pâte discutés précédemment c'est-à-dire, PMR, PTM, PCTM et PCM. L'analyse a d'abord impliqué la conception des quatre procédés de mise en pâte compte tenu des caractéristiques intrinsèques des pins et des équipements commerciaux disponibles. De plus, afin d'avoir une analyse complète et détaillée, nous avons joint au système de mise en pâte les autres sous-systèmes d'une usine commerciale (i.e. lavage des copeaux, tamisage et épuration, ...). Suite à ce travail de conception et à partir des résultats de la section 4.1 et 4.2 de la présente étude, les bilans de matière et d'énergie de chacune des alternatives de mise en pâte seront effectués à l'aide du logiciel de simulation GEMS ("General Energy and Material Balance System"⁽⁴⁸⁾). Les résultats combinés des simulations, des conditions de mise en pâte et de blanchiment ainsi que les coûts unitaires en bois, électricité, etc. ont été traités subséquemment pour évaluer les coûts de production de chacune des pâtes en plus de prédire les caractéristiques de la pâte blanchie produite et l'impact de chacun des procédés sur les effluents de l'usine.

4.3.1 Description des procédés de mise en pâte

La figure 4.29 montre une représentation schématique des sous-systèmes associés aux procédés de mise en pâte mécaniques et chimico-mécaniques. Certains sous-systèmes sont communs à tous les procédés de mise en pâte que nous avons évalués; les systèmes de lavage des copeaux, de tamisage, d'épuration et d'épaississement de la pâte et le système de blanchiment au peroxyde d'hydrogène en un stade.

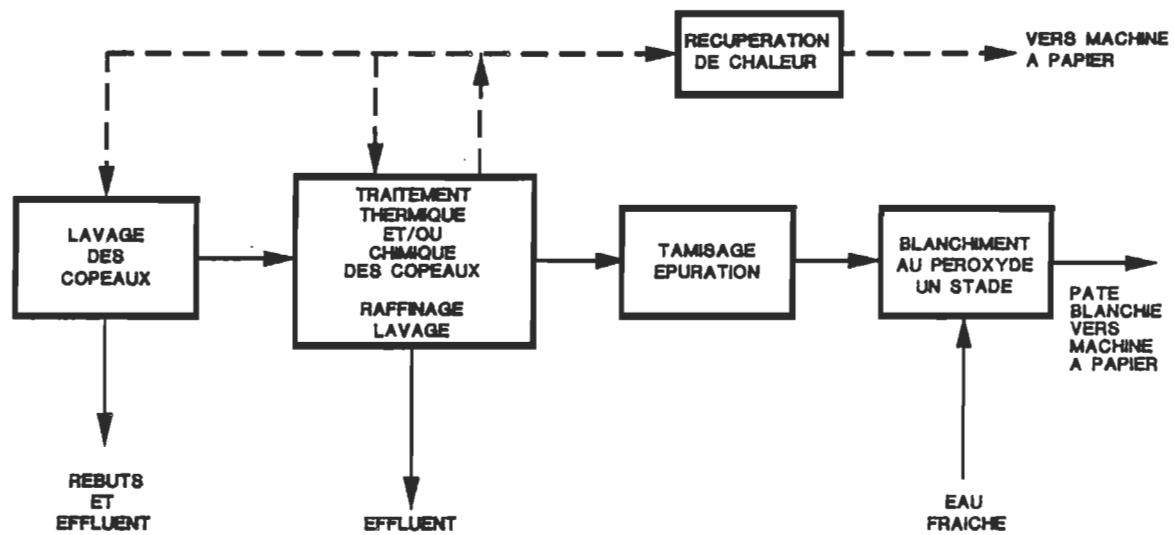


Figure 4.29 Représentation schématique des procédés de mise en pâte mécaniques et chimico-mécaniques

4.3.1.1 Description des sous-systèmes et particularités de mise en pâte

La figure 4.30 illustre le diagramme d'écoulement des copeaux du système de lavage des copeaux. Il comprend un laveur de copeaux, un égoutteur, un tamis incliné et un réservoir de décantation. L'eau blanche est recirculée en boucle fermée afin de minimiser l'apport d'eau fraîche. La trémie de préchauffage permet d'emmageriser les copeaux. De plus, l'addition de vapeur à sa base permet de faire fondre la glace à la surface des copeaux en hiver rendant ainsi plus efficace l'opération de lavage des copeaux.

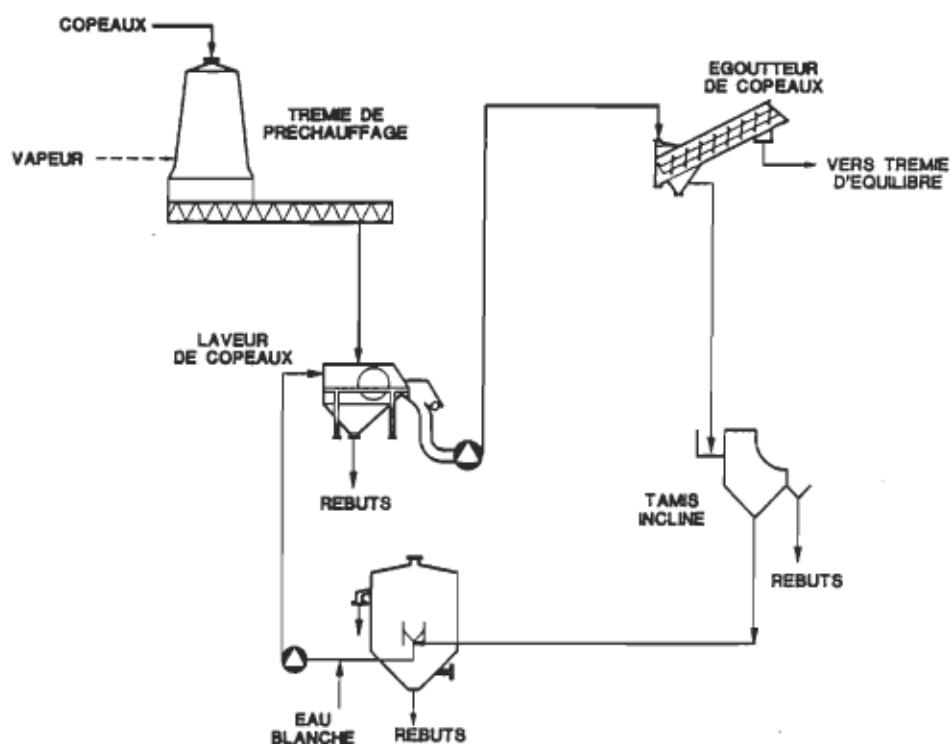


Figure 4.30 Diagramme d'écoulement du système
de lavage des copeaux

Les systèmes de tamisage et d'épuration des pâtes de la ligne principale et de la ligne de rejets (fibre longues) sont également communs à tous les procédés de mise en pâte (figure 4.31). La ligne principale de tamisage et d'épuration est composée d'un tamis primaire et de trois stades d'épuration en cascade. Le tamisage et l'épuration de la ligne de rejets comprennent un tamis de rejets et quatre stades d'épuration. Les acceptés du troisième et quatrième stade sont envoyés au raffineur de rejets de même que les rejets provenant du tamis des rejets. Les rejets du quatrième stade d'épuration du système de tamisage et d'épuration des fibres longues se dirigent vers le système de traitement des effluents. Ce système de tamisage et d'épuration permet d'obtenir une qualité de pâte uniforme. Les rejets non raffinés sont envoyés à un tamis incliné où ils sont épaissis à un consistance de 3 à 4% avant pressage à la presse à vis alimentant le raffineur de rejets.

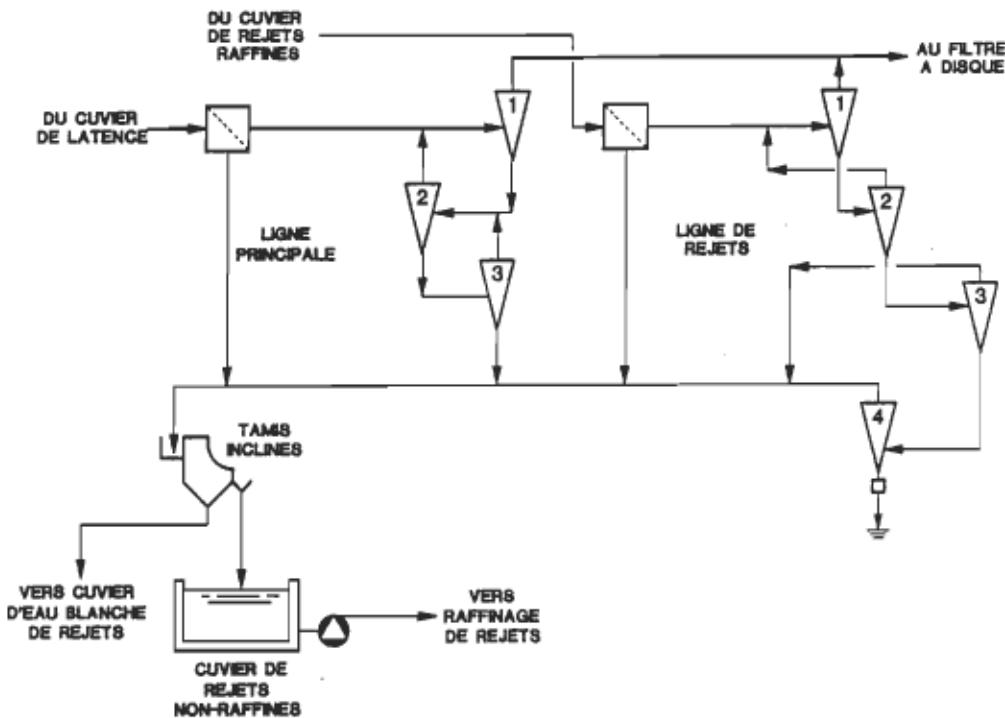


Figure 4.31 Diagramme d'écoulement des pâtes du système de tamisage et d'épuration

Les pâtes acceptées de la ligne principale et de la ligne de rejets sont envoyées aux filtres à disques où elles sont épaissies à une consistance de 10 à 12%.

Le procédé de blanchiment est le dernier sous-système commun à tous les procédés. Un diagramme d'écoulement des pâtes d'un plan de blanchiment au peroxyde d'hydrogène en un stade avec réutilisation et recirculation du peroxyde résiduel et un lavage à contre-courant est représenté à la figure 4.32. Dans ce procédé, le blanchiment a lieu à une consistance moyenne (10-12%), une température de 70°C dans

une tour dont le temps de rétention est de 90 minutes. La presse à l'entrée du plan de blanchiment enlève les solides dissous, une partie des matières extractibles qui sont appréciables pour le pin loblolly ainsi que le sulfite de sodium et les ions métalliques provenant du plan de mise en pâte.

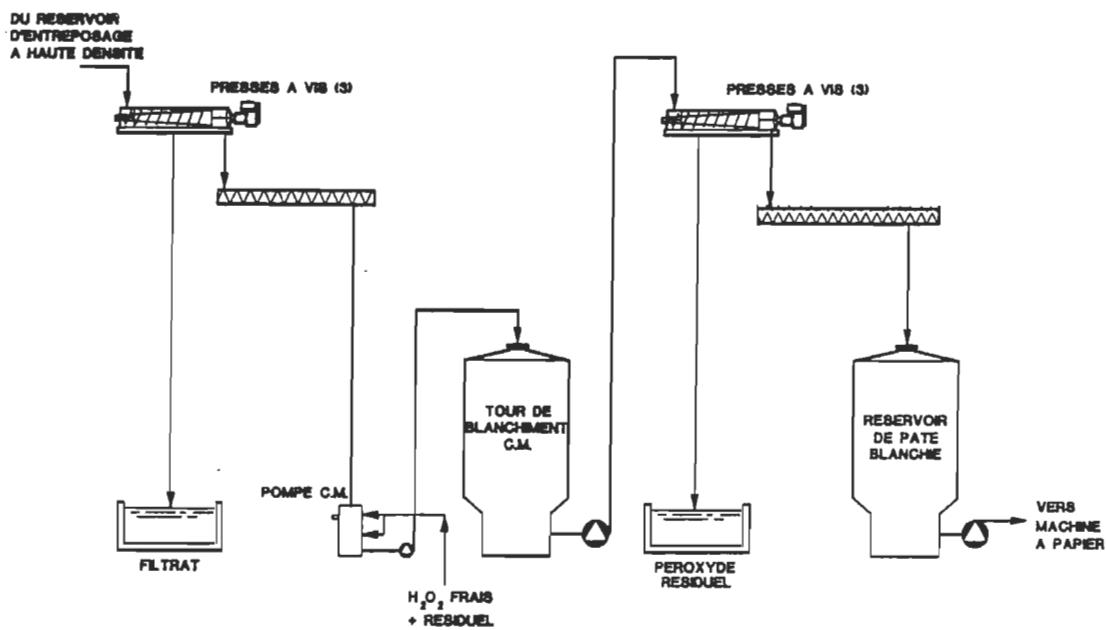


Figure 4.32 Diagramme d'écoulement des pâtes du système de blanchiment au peroxyde en un stade

La presse à la sortie du plan de blanchiment permet de récupérer une partie du peroxyde résiduel qui contient cependant, des résines saponifiées qui sont produites lors des réactions d'oxydation à pH élevé. Avec l'utilisation de la stratégie de lavage à contre-courant, le filtrat des presses est envoyé en amont afin de réagir avec le sulfite de sodium provenant du plan de mise en pâte et les matières extractibles. L'eau blanche du plan de blanchiment, envoyée au système de lavage des copeaux ou aux presses de lavage interstade, est finalement acheminée au plan de traitement des effluents. Le procédé de blanchiment permet d'enlever la poix et les matières extractibles du pin loblolly dans l'usine et permet de rencontrer les critères de qualité du produit fini. Cette stratégie de recirculation de l'eau blanche fait en sorte de prévenir les dépôts de poix, les problèmes de peluchage et de poussière, les problèmes potentiels de fonctionnement de la machine à papier en plus d'éviter des diminutions de blancheur de la pâte associés à l'utilisation d'alun dans le circuit d'eau blanche de la machine à papier tel que démontré dans une étude⁽⁴⁹⁾.

Compte tenu des caractéristiques intrinsèques des pins, i.e. un denier et une épaisseur de la paroi élevés ainsi qu'un taux élevé en matières extractibles, certaines particularités au niveau de la mise en pâte ont été considérées.

Puisque les pins requièrent plus d'énergie de raffinage que d'autres conifères comme l'épinette noire et le sapin Beaumier, il est préférable d'appliquer cette énergie en plusieurs stades et de raffiner à de hautes consistances, afin de maintenir une distance adéquate entre les plaques du raffineur, optimisant ainsi la longueur des fibres. Un haut taux de rejets (50%) qui est constitué de fibres longues non fibrillées, envoyées à un raffineur de rejets indépendant, constitue une excellente stratégie pour optimiser la qualité des pâtes produites. Il est important de ne pas interrompre la ligne de raffinage des rejets. Les diagrammes d'écoulement (figures 4.33 à 4.36) des pâtes pour chacun des procédés de mise en pâte mécaniques ou chimico-mécaniques sont tels qu'un raffineur secondaire peut être converti à l'occasion en raffineur de rejets lorsque le raffineur de rejets est arrêté afin d'effectuer les changements de plaques ou l'entretien du raffineur. Il est préférable de pressuriser le raffineur de rejets pour faciliter l'opération du système. Puisque la récupération de vapeur est nécessaire afin de réduire les coûts d'opération, toute l'opération de raffinage se doit d'être pressurisée.

4.3.1.2 Système de mise en pâte mécanique de raffineur pressurisé (PRMP)

La figure 4.33 illustre le diagramme d'écoulement des pâtes du procédé de mise en pâte de raffineur pressurisé (PRMP). Après lavage, les copeaux sont préchauffés à la vapeur à une température de 90°C dans une trémie d'équilibre. L'addition de vapeur est suffisante pour amener la température de ceux-ci dans la région de la température de transition vitreuse de la lignine humide (80-90°C), ce qui est suffisant pour ne pas endommager les copeaux lorsque compressés dans l'alimentateur à bouchon. Cet alimentateur à bouchon permet d'enlever en partie les matières extractibles, les ions métalliques et les solides dissous, avant d'alimenter le raffineur primaire, en plus de permettre un raffinage pressurisé à haute pression permettant ainsi d'optimiser la récupération de vapeur du système.

Suite au premier stade de raffinage, la pâte est soufflée du raffineur primaire au raffineur secondaire. Ce raffinage en tandem permet une récupération maximale de vapeur. Du raffineur secondaire, la pâte est soufflée à un cyclone pressurisé, où la vapeur est récupérée, avant d'être déchargée au cuvier de latence.

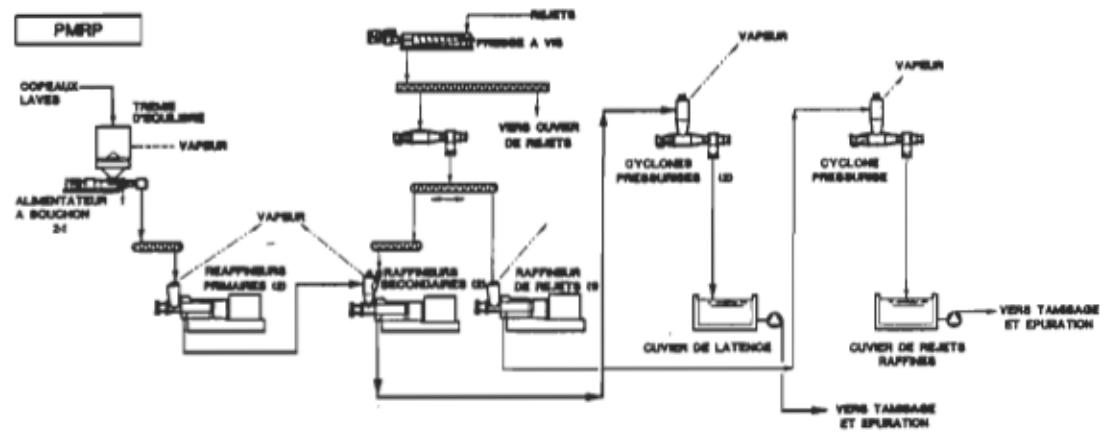


Figure 4.33 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte mécanique de raffineur pressurisé (PMRP)

4.3.1.3 Système de mise en pâte thermomécanique (PTM)

La figure 4.34 représente le diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte thermomécanique (PTM). Le préchauffeur augmente la température des copeaux avant le raffinage. L'ajout d'un alimentateur à bouchon, entre l'étuveur et l'entrée du premier stade de raffinage, permet une récupération maximale de la vapeur du système de raffinage tout en préservant la blancheur de la pâte, en isolant l'opération de raffinage de l'étuvage. Ceci est particulièrement critique pour les pins qui contiennent un

haut taux de matières extractibles. L'alimentateur à bouchon permet également d'enlever les matières extractibles et les solides dissous. L'arrangement illustré à la figure 4.34 assure une qualité de pâte uniforme ainsi que de faibles coûts d'opération. Une pression et une consistance de raffinage élevées augmentent l'efficacité de récupération de vapeur.

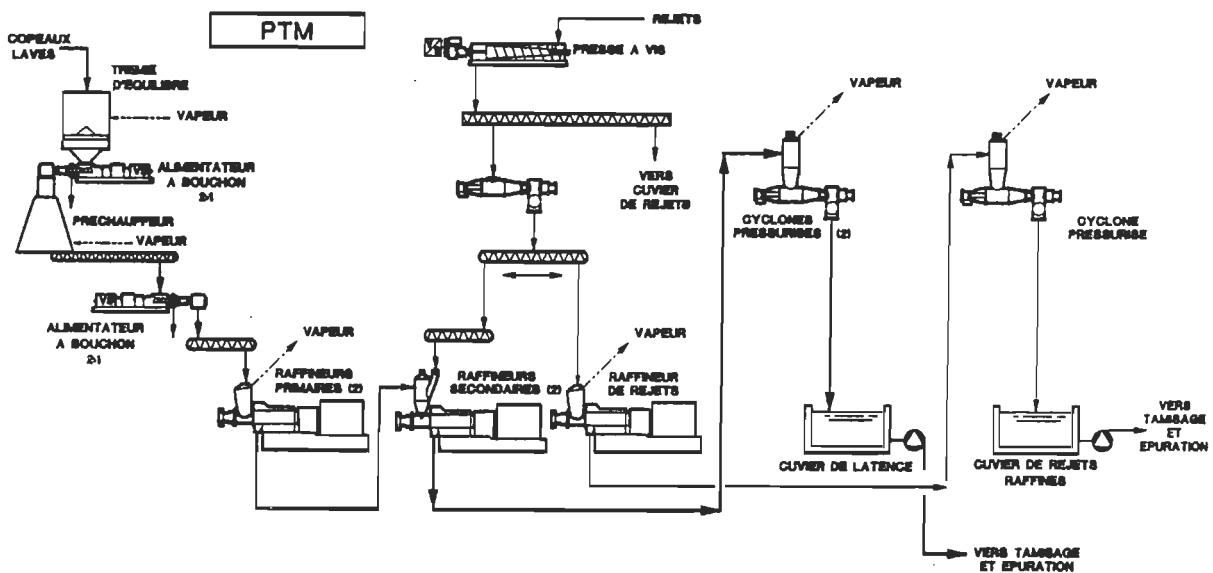


Figure 4.34 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte thermomécanique (PTM)

4.3.1.4 Système de mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM)

La figure 4.35 représente le diagramme d'écoulement des pâtes du procédé de mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM). Dans une étude antérieure⁽⁵⁰⁾, quatre procédés chimico-thermomécaniques furent comparés et il fut démontré que la pâte PCTM produite suivant le procédé illustré à la figure 4.35 a le plus faible contenu en matières extractibles, solides dissous et une récupération de vapeur optimale menant au plus faible coût de production.

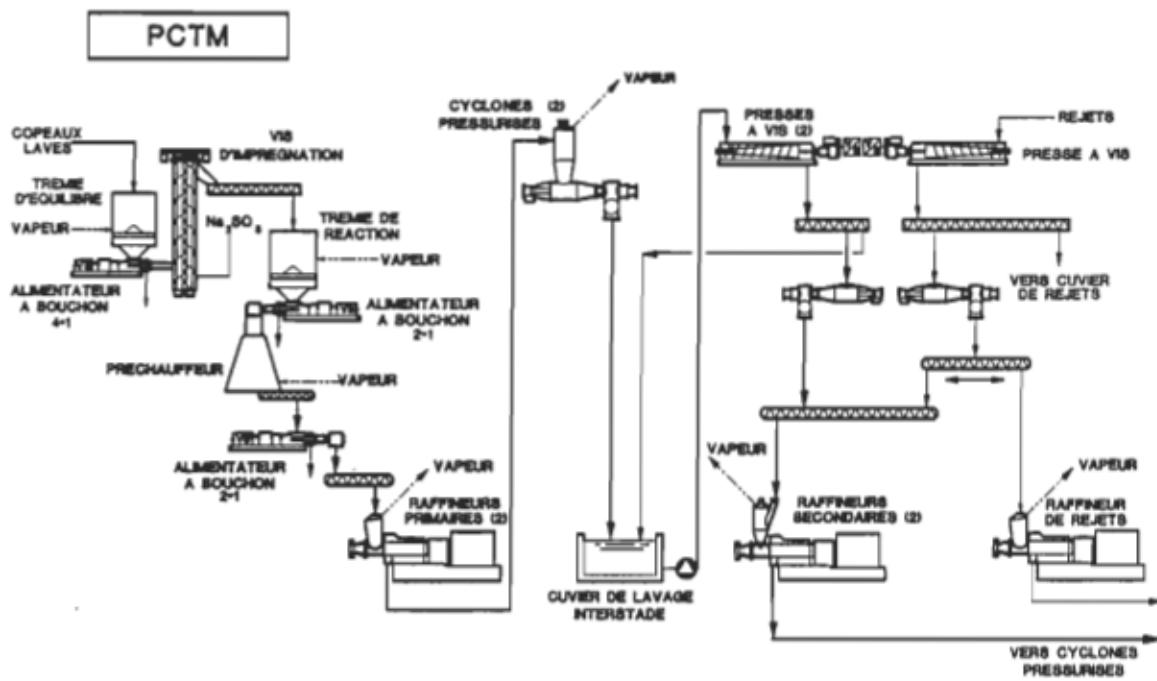


Figure 4.35 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM)

Les caractéristiques principales de ce système sont l'ajout de sulfite de sodium et le lavage interstade de la pâte. Le procédé de mise en pâte PCTM débute par l'imprégnation des copeaux avec la liqueur sulfitique qui s'effectue à l'aide d'un alimentateur à bouchon à haut taux de compression. Ce dernier augmente la surface spécifique des copeaux par délamination de ceux-ci le long de la paroi externe de la fibre tout en minimisant le coupage des fibres. Une délamination accrue facilite l'extraction de liquide à l'intérieur de la fibre et son remplacement par une solution chimique lors de l'imprégnation, en plus d'augmenter le taux de réaction et les sites disponibles pour réagir avec les produits chimiques.

La liqueur sulfitique est ajoutée à la base de l'imprégnateur vertical. Ce dernier sert aussi de convoyeur permettant de transporter les copeaux à la trémie de réaction. De la vapeur est ajoutée à la base de cette dernière, afin de poursuivre les réactions de sulfonation avec la lignine et de saponification avec les résines. L'alimentateur à bouchon placé entre la trémie de réaction et le préchauffeur permet par la suite l'extraction des résines saponifiés et de divers autres sous-produits de réaction avec la liqueur sulfitique. L'alimentateur à bouchon entre le préchauffeur et le raffineur primaire extrait encore plus de sous-produits tout en assurant une alimentation constante

et à haute consistance au raffineur primaire. De plus, cet alimentateur à bouchon isole l'opération de raffinage du prétraitement thermique des copeaux dans l'étuveur permettant ainsi une récupération maximale de vapeur et une production de pâte de qualité supérieure. Finalement, la pâte du raffineur primaire se décharge au cuvier de transfert, à l'aide d'un cyclone pressurisé. Le lavage interstade de la pâte s'effectue à l'aide d'une presse à vis.

4.3.1.5 Système de mise en pâte chimico-mécanique (PCM)

La figure 4.36 représente le diagramme d'écoulement des pâtes du procédé chimico-mécanique (PCM). Pour ce procédé, toute l'opération d'imprégnation a été pressurisée. La liqueur sulfitique est ajoutée à l'aide d'un imprégnateur pressurisé. Une charge de 18% en sulfite de sodium a été ajoutée. Les réactions de sulfonation ont lieu dans un réacteur pressurisé à une température de 140°C pour un temps de rétention de 30 minutes.

L'on retrouve deux alimentateurs à bouchon avant le raffinage. Pour le procédé PCM, le lavage interstade devient des plus important afin d'enlever les résines et le sulfite résiduel aussi bien que les solides dissous organiques dans la pâte.

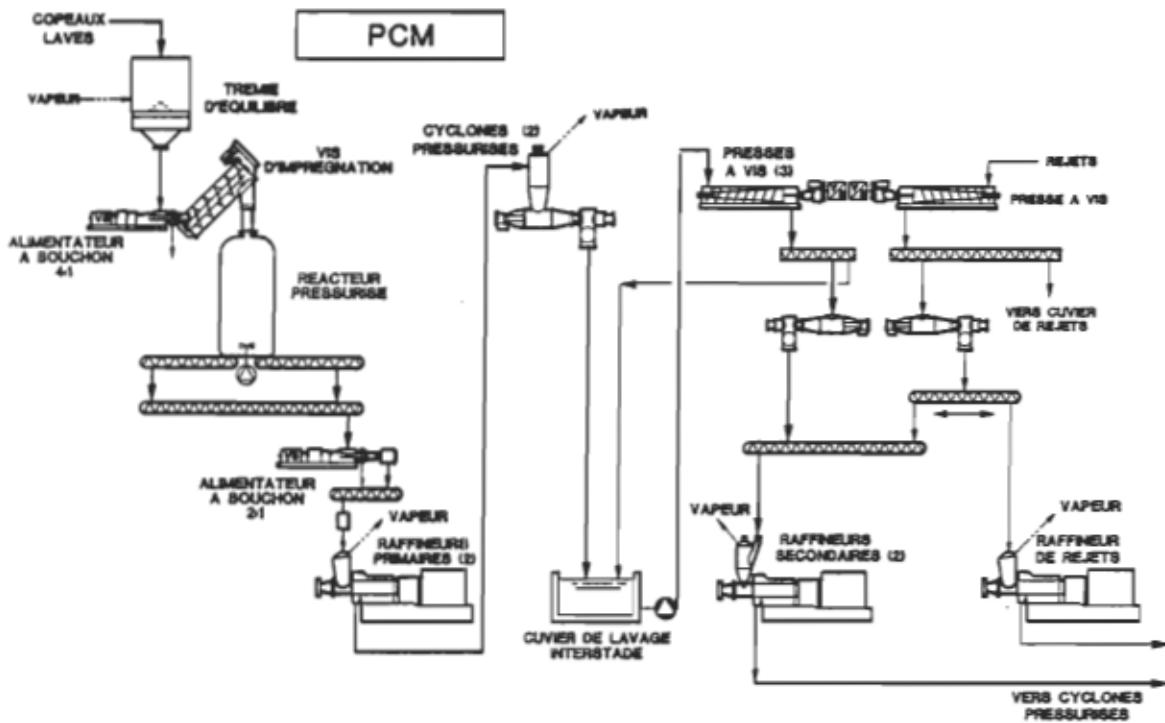


Figure 4.36 Diagramme d'écoulement des pâtes pour la mise en pâte chimico-mécanique (PCM)

4.3.2 Le logiciel GEMS

L'analyse technico-économique des différents procédés décrits à la section précédente a été effectué à l'aide du logiciel de simulation GEMS. Nous avons effectué les bilans de matière et d'énergie de chacune des alternatives.

GEMS est un système modulaire qui comprend un programme d'exécution joint à un groupe de blocs de procédés de base ou de sous-routines qui peuvent être assemblés selon différentes configurations dans le but de modéliser chacun des procédés proposés. Par exemple, l'une de ces sous-routines permet de simuler les réactions de sulfonation des copeaux ou des fibres. L'effet du temps, de la température, du pH et de la charge en sulfite sur la sulfonation et le rendement de la pâte sont inclus dans cette sous-routine.

La figure 4.37 montre un exemple d'un schéma "bloc" construit pour la simulation du procédé PCTM. Les réactions de sulfonation ont été considérées à chacune des étapes du procédé de raffinage.

Les données de base servant aux calculs effectués par le logiciel de simulation proviennent des conditions de mise en pâte et de blanchiment décrites à la section 4.3.3. Les paramètres et les variables d'opération des équipements (i.e. efficacité, consistance, ect.) sont aussi requis pour la simulation. Dans la présente étude, nous avons utilisé des valeurs provenant de la banque de données de la compagnie Hymac Ltée de Ville de Laval, Québec, Canada.

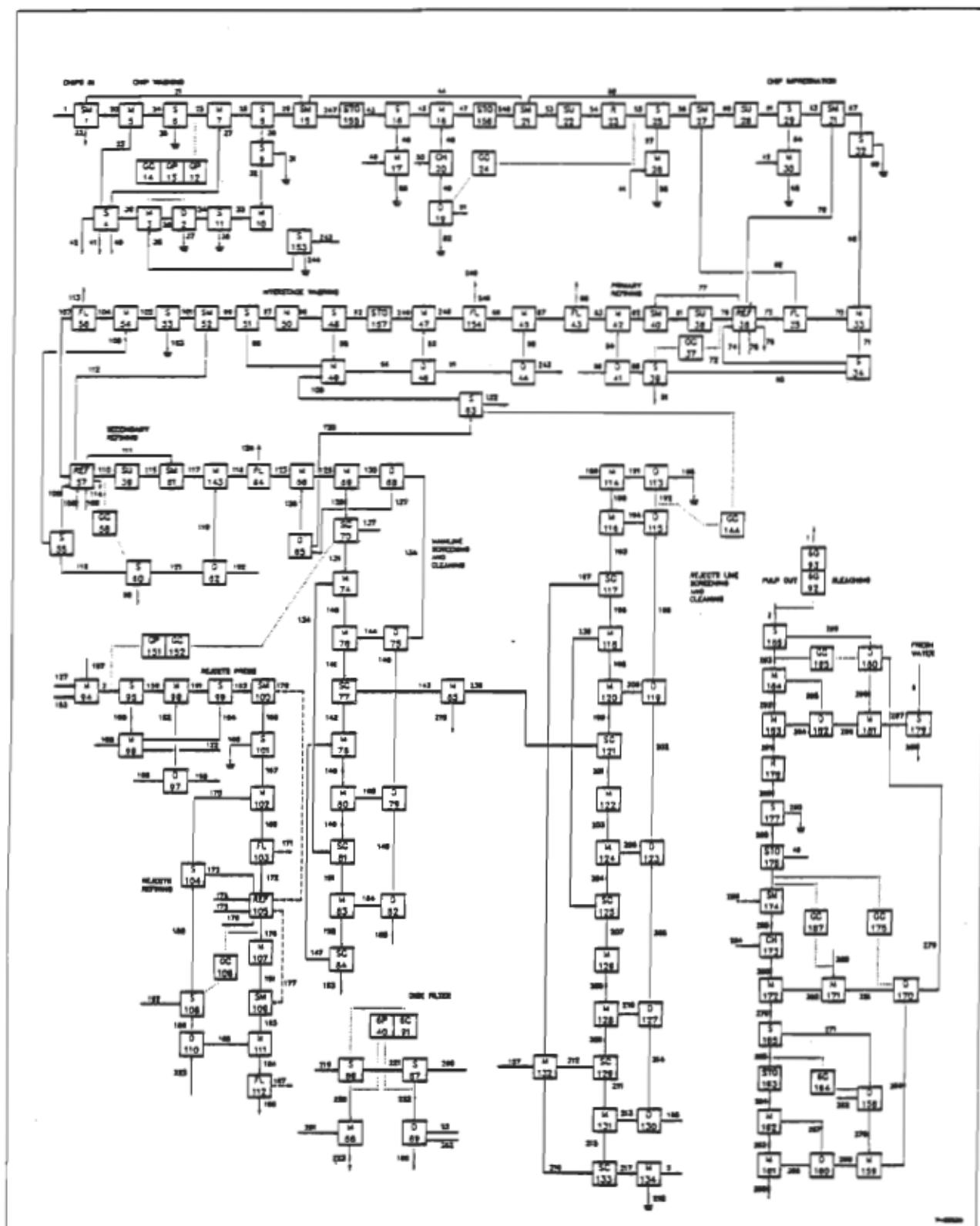


Figure 4.37 Schéma bloc pour la simulation du procédé PCTM

4.3.3 Conditions de mise en pâte et de blanchiment

Les conditions d'opération nécessaire pour la simulation de chacun des procédés étudiés sont données au tableau 4.8. Les temps de rétention, températures et les charges de sulfite typiques de l'industrie. Les données de blanchiment au peroxyde d'hydrogène proviennent des résultats de la présente étude obtenus en laboratoire (section 4.2). Les taux de production de pâte pour chacun des procédés varient parce qu'ils ont été calculés à partir des résultats de la section 4.1 en fixant la puissance électrique totale de raffinage à 60 MW. De plus, nous avons fixé pour tous les procédés un taux de rejets de 50% (30% pour le mélange sapin/épinette). L'énergie de raffinage appliquée au raffineur primaire et secondaire de la ligne principale a été répartie selon un ratio 55% et 45% respectivement.

L'eau fraîche requise en fonctionnement de chaque usine de mise en pâte, tel que décrit à la figure 4.29 a été fixée à 15 m³/Tm sèche de pâte. De plus, une stratégie de recirculation d'eau à contre-courant a été utilisée; l'eau fraîche est ajoutée au procédé de blanchiment et au cuvier d'eau blanche pauvre du filtre à disques alors que les points d'émission au plan de traitement des effluents sont situés (1) à l'épurateur quaternaire du système de tamisage et d'épuration des rejets (2) au cuvier de lavage de transfert

interstade et (3) au système de lavage des copeaux.

Tableau 4.8

Conditions d'opération pour chacun des procédés

	SAPIN/EPINETTE		PIN LOBLOLLY			PCM
	PTM	PCTM	PRMP	PTM	PCTM	
Trémie de réaction						
Température (°C)	-	95	-	-	95	140
Temps de rétention (min)	-	30	-	-	30	30
Préchauffeur						
Température (°C)	115	115	-	115	115	-
Temps de rétention (min)	3	3	-	3	3	-
Produits chimiques pour la mise en pâte et le blanchiment (70% iso)						
Sulfite de sodium (%)	-	3,0	-	-	4,0	18,0
DTPA (%)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Peroxyde d'hydrogène (%)	1,18	0,61	1,17	2,39	1,45	3,61
Hydroxyde de sodium (%)	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
Silicate de sodium (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sel d'Epsom (%)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Energie spécifique (MWh/Tm)	1,92	2,28	2,19	2,38	2,62	2,30
Indice d'égouttage (ml)	150	150	100	100	100	100
Taux de production pâte blanchie (Tm/j)	605	485	560	500	425	510
Eau fraîche (m³/Tm)	15	15	15	15	15	15

4.3.3 Résultats des simulations

4.3.4.1 Caractéristiques de la pâte blanchie

On compare au tableau 4.9 quelques caractéristiques de la pâte blanchie de pin loblolly dans la tour d'emmagasinage de pâte blanchie.

Tableau 4.9

Caractéristiques de la pâte blanchie

	SAPIN/EPINETTE		PIN LOBLOLLY			
	PTM	PCTM	PRMP	PTM	PCTM	PCM
Production de pâte blanchie (Tm/j)	605	485	560	500	425	510
Eau fraîche (m ³ /Tm)	15	15	15	15	15	15
Contenu en sulfonate (% S)	-	0,20	-	-	0,23	0,45
Matières extractibles DCM (%)*	0,26	0,05	0,68	0,58	0,10	0,09
Peroxyde résiduel (%)	0,07	0,01	0,08	0,24	0,13	0,41
Solides dissous totaux (%)	1,17	0,78	1,64	1,68	0,98	1,28
Blancheur (%, iso)	70	70	70	70	70	70

* Un contenu en matières extractibles (DCM) de 4% pour le pin loblolly et de 1.8% pour le sapin/épinette a été utilisé.

Les caractéristiques des pâtes et de l'eau blanche rapportées au tableau 4.9 sont:

- (1) le contenu en sulfonate qui donne une indication sur la résistance potentiel du papier final,
- (2) les matières extractibles dans la pâte (extraction au dichlorométhane, DCM) qui influencent la résistance, la blancheur, la réversion et la résistance de surface des papiers,
- (3) le peroxyde résiduel qui a un effet sur la réversion de la blancheur,
- (4) les solides dissous totaux qui ont une importance au niveau de l'efficacité des additifs ajoutés à la partie humide de la machine à papier, du drainage de la pâte, de la résistance des nappes humides et de l'opération de la machine à papier⁽⁵¹⁾.

Au tableau 4.9, l'on observe que pour une puissance électrique donnée, le taux de production de la pâte est inférieur pour le pin loblolly comparativement au mélange sapin/épinette (17% pour le PTM et 12% pour le PCTM). Pour les conditions d'opération spécifiées au tableau 4.8, la pâte PCM donne un taux de sulfonation supérieur à la pâte PCTM.

Le contenu en sulfonate de la pâte PCTM de pin loblolly est légèrement supérieur par rapport à la pâte PCTM du mélange sapin/épinette. De plus hautes charges en sulfite de sodium doivent être ajoutées sur les copeaux de pin loblolly à cause du denier élevé de la fibre. Ce taux de sulfonation supérieur cependant, n'entraîne pas nécessairement des propriétés de pâte supérieures. Les procédés de mise en pâte chimico-mécaniques (PCTM et PCM) produisent une pâte avec un contenu inférieur en matières extractibles comparativement au pâtes PRMP et PTM.

Le peroxyde résiduel dans la pâte à la tour d'emmagasinage est supérieur pour les pâtes PTM et PCM. Ceci indique qu'un procédé de blanchiment à haute consistance serait préférable. Les pâtes chimico-mécaniques (PCTM et PCM) blanchies ont un contenu en solides dissous inférieur par rapport aux pâtes mécaniques (PRMP et PTM). Ceci est principalement dû au lavage interstade présent dans ces procédés chimico-mécaniques puisque la quantité d'eau fraîche est identique dans chaque cas. Pour chacun des procédés évalués, des valeurs de DCM (matières extractibles) et de solides dissous inférieures auraient été obtenues dans le produit final, si une plus grande quantité d'eau fraîche eut été utilisée.

4.3.4.2 Impact sur les effluents de l'usine

Le tableau 4.10 présente quelques données permettant de comparer l'impact sur les effluents de l'usine des différents procédés de mise en pâte pour le pin loblolly et un mélange sapin/épinette.

Tableau 4.10

Données environnementales

	SAPIN/EPINETTE		PIN LOBLOLLY			PCM
	PTM	PCTM	PMRP	PTM	PCTM	
Rendement (%)	94,7	92,0	95,6	94,7	92,2	91,4
Rendement (%) (incluant la perte de fibres)	92,4	88,5	93,2	92,0	88,3	87,8
Taux de production (Tm/j) pâte blanchie	605	485	560	500	425	510
Eau fraîche (m ³ /Tm)	15	15	15	15	15	15
Effluent total de l'usine						
Température (°C)	55	76	56	57	77	78
Volume (m ³ /Tm)	13,5	13,7	13,2	13,2	13,5	15,6
Solides en suspension (kg/Tm)	17,8	31,4	18,5	21,8	35,3	33,6
DCO (kg/Tm)	81	142	87	103	172	195
DOB ₅ (kg/Tm)	36	64	39	46	77	88
Effluent de l'alimentateur à bouchon						
Volume (m ³ /Tm)	0,8	2,5	0,4	0,9	2,6	2,5
Solides en suspension (kg/Tm)	6,7	10,7	3,3	6,6	10,7	7,1
DCO (kg/Tm)	13	53	8	20	77	82
BOD ₅ (kg/Tm)	5	23	4	10	34	37

Les rendements indiqués au tableau 4.10 sont ceux calculés par la sous-routine de sulfonation des copeaux de logiciel de simulation GEMS dans laquelle les paramètres ont été fixés à partir des résultats de laboratoire de la présente étude. Lorsque l'on tient compte des pertes de fibres, due à la stratégie de recirculation des eaux blanches et au choix des équipements, des rendements inférieurs sont obtenus pour chacun des systèmes de mise en pâte.

La température de l'effluent des procédés chimico-mécaniques est supérieure (environ 20°C) comparativement aux procédés mécaniques. Le lavage interstade de la pâte est responsable de cette hausse de température. Dans les usines de traitement aérobie et anaérobie modernes, un échangeur de chaleur est utilisé de façon courante pour refroidir l'effluent. Les charges en DBO et DCO (demande biologique et chimique en oxygène) sont pour la pâte PCTM 75% supérieures à la PTM alors que pour la pâte PCTM de pin loblolly les charges en DBO et DCO sont 67% supérieures à la pâte PTM. Le rendement inférieur des procédés PCTM est responsable de cette différence. Pour le pin loblolly, les charges en DBO et DCO pour le procédé PCM sont environ 15% supérieures comparativement au PCTM. La plus haute charge en sulfite et le traitement thermique plus sévère de PCM expliquent ces résultats. A cause des restrictions environnementales, il a été proposé de traiter séparément les effluents très

concentrés provenant des alimentateurs à bouchon. L'on observe au tableau 4.10 que cette stratégie serait bénéfique pour les procédés chimico-mécaniques (PCTM et PCM).

4.3.4.3 Coûts de production de la pâte blanchie

Le tableau 4.11 compare les coûts de production des pâtes PTM et PCTM de sapin/épinette à un indice d'égouttage de 150 ml avec des pâtes de pin loblolly à un indice d'égouttage de 100 ml. Pour ces calculs, des coûts nord-américain ont été utilisés pour les produits chimiques, le traitement des effluents, la main d'oeuvre, les pièces et l'administration⁽⁵²⁾ (tableau 4.12). Les coûts du bois et de l'électricité pour l'est du Canada ont été utilisés pour le sapin/épinette alors que les coûts pour les états du sud des Etats-Unis ont été utilisés pour le pin loblolly. Le coût en capital pour une nouvelle usine mise en chantier sur un terrain vacant et inexploité "greenfield" a aussi été calculé à partir des coûts en équipement requis pour chacun des procédés apparaissant aux figures 4.33 à 4.36. Nous avons multiplié ces coûts par un facteur pour prendre en considération les autres coûts impliqués dans la construction de l'usine et ainsi obtenir un coût total en capitalisation pour chacune des alternatives évaluées. Le coût total a été amorti sur une période de 8 ans, à un taux d'intérêt de 10%.

Au tableau 4.11, l'on observe que le coût de production d'une pâte PRMP de pin loblolly peut être inférieur à celui d'une pâte PTM de sapin/épinette. Les différences entre le coût des copeaux ainsi que le coût en électricité pour chacune des régions expliquent ces résultats. Produire une pâte PTM de pin loblolly dans le sud des Etats-Unis coûte plus cher que produire une pâte PTM de sapin/épinette dans l'est du Canada en dépit de la différence des coûts en copeaux. Cette observation est aussi valide pour les pâtes PCTM. Les raisons principales sont:

- (1) la consommation en peroxyde frais supérieure pour le pin loblolly comparativement au sapin/épinette,
- (2) les coûts en électricité de sud des Etats-Unis supérieurs à ceux de l'est du Canada,
- (3) les coûts de production par tonne de pâte produite supérieur pour le pin loblolly. Les mêmes équipements sont utilisés mais la capacité de production est supérieure pour une usine utilisant du sapin/épinette.

La différence entre produire une pâte PCM de pin loblolly comparativement à une pâte PCTM est d'environ 50\$/Tm. La pâte PCM nécessite moins d'énergie de raffinage par rapport à la pâte PCTM et le coût en capital par tonne de

pâte est inférieur à cause du plus haut taux de production des pâtes PCM. Cependant, la différence principale entre le procédé PCM et PCTM est la consommation en produits chimiques 18%; de sulfite de sodium fut utilisé pour le PCM alors que seulement 4% fut utilisé pour le PCTM. De plus, 3,6% de peroxyde d'hydrogène est nécessaire pour blanchir la pâte PCM et seulement 1,5% pour la pâte PCTM. Ceci représente une différence de 62\$/Tm de pâte en produits chimiques entre ces deux procédés ou 23% du coût total pour la pâte PCM et 11% du coût total pour la pâte PCTM (figure

Tableau 4.11

Coûts de production de la pâte (USS/Tm)

	SAPIN/EPINETTE		PIN LOBLOLLY			PCM
	PTM	PCTM	PRMP	PTM	PCTM	
Bois	119,03	124,24	64,36	65,24	67,96	68,37
Produits chimiques						
Imprégnation	-	9,18	-	-	12,26	55,68
Blanchiment	31,39	26,25	30,62	40,04	32,17	50,64
Total	31,39	35,44	30,62	40,04	44,43	106,32
Electricité						
Raffineurs	43,07	51,76	111,13	121,06	133,85	118,48
Récupération de vapeur	-19,60	-20,55	-53,70	-60,11	-57,73	-40,82
Total	23,47	31,21	57,43	60,95	76,12	77,67
Traitemennt des effluents	7,26	12,79	7,82	9,23	15,45	17,51
Main d'oeuvre	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Fournitures	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Administration	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Coût en capital*	85,92	126,05	90,13	103,10	144,40	129,09
TOTAL	334,06	396,72	317,35	345,56	415,36	465,95

* Basé sur un taux d'intérêt de 10% et un amortissement sur 8 ans.

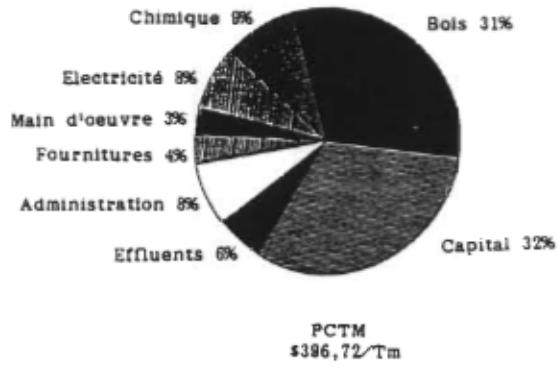
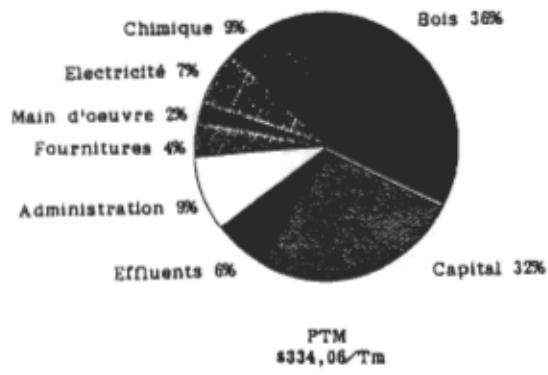
Tableau 4.12

Coûts unitaires

	Est du Canada Sapin/épinette	Sud des Etats-Unis Pin loblolly
Bois (\$/Tm)	110	60
Produits chimiques mise en pâte et blanchiment (\$/kg)		
Sulfite de sodium	0,27	0,27
Peroxyde d'hydrogène	1,433	1,433
Hydroxyde de sodium	0,573	0,573
Silicate de sodium	0,154	0,154
Sel d'Epsom	0,331	0,331
DTPA	1,125	1,125
Electricité (\$/kWh)	0,022	0,050
Traitemet des effluents (\$/kg DOB)	0,20	0,20
Main d'oeuvre (\$/Tm)	14,00	14,00
Equipement (\$/Tm)	30,00	30,00
Administration (\$/Tm)	23,00	23,00

4.38). A la figure 4.38, l'on retrouve les coûts unitaires par item présentés en pourcentage du coût de production pour les procédés PTM et PCTM produits dans l'est du Canada et dans le sud des Etats-Unis. L'on observe que pour l'est du Canada, le coût total de production d'une pâte PCTM est approximativement également réparti entre le coût en capital du projet (32%), les coûts du bois (31%) et les autres coûts (37%) dans lesquels l'électricité représente un faible pourcentage (8%). Pour le sud des Etats-Unis, le pourcentage évalué pour l'électricité est de 18% et celui du bois de 16%. Les coûts de l'électricité sont plus élevés et les coûts des copeaux sont inférieurs (tableau 4.12).

SAPIN/EPINETTE (EST DU CANADA)



PIN LOBLOLLY (SUD DES ETATS-UNIS)

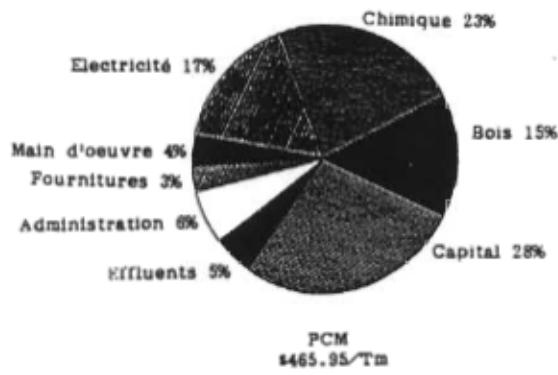
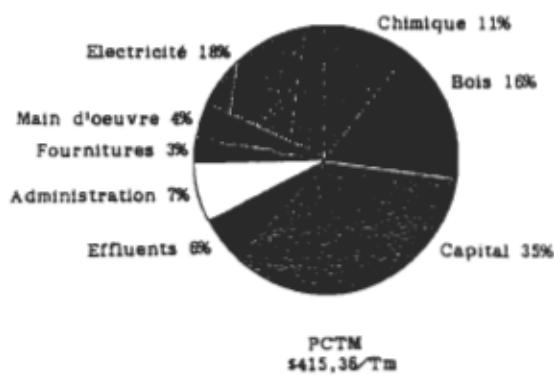
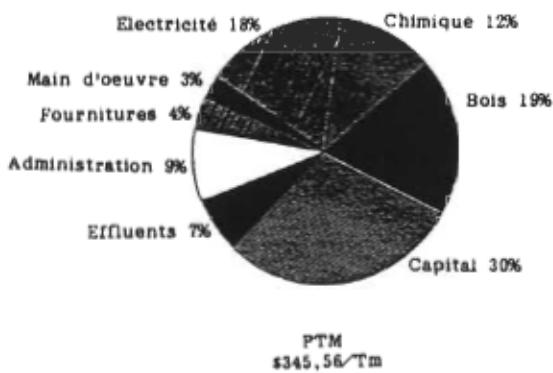
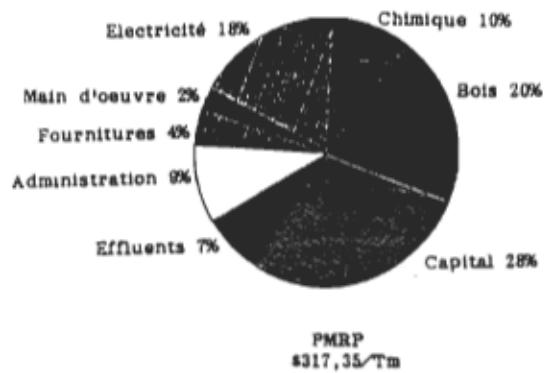


Figure 4.38 Coût de production de chacun des procédés

5. CONCLUSION

Les propriétés des pâtes et des papiers sont grandement dépendantes des caractéristiques des fibres et de la composition chimique des essences qui les composent.

Les pins et plus particulièrement le pin loblolly par rapport à un mélange sapin/épinette demandent plus d'énergie de raffinage, donnent un volume spécifique supérieur alors que les propriétés mécaniques et optiques sont inférieures. Des pâtes de pin de faible indice d'égouttage doivent être produites afin de développer adéquatement les fibres qui formeront une feuille de papier ayant des propriétés comparables à un mélange sapin/épinette.

Les différents procédés de mise en pâtes mécaniques (PMR et PTM) et chimico-mécaniques (PCTM et PCM) actuellement utilisés en industrie développent les fibres du pin loblolly de façon différente. Des pâtes mécaniques de raffineur de pin loblolly de faible résistance mais ayant un coefficient de diffusion de la lumière, une blancheur et une opacité élevés peuvent être produites afin de remplacer la pâte de meule dans la fabrication du papier journal. Le prétraitement thermique et/ou chimique des copeaux (PTM, PCTM et PCM) permet d'améliorer les propriétés de résistance des

papiers mais l'opacité est inférieure comparativement aux pâtes mécaniques de raffineur (PMR).

En combinant les résultats de l'analyse technico-économique et les résultats de propriétés de pâtes des différents procédés de mise en pâte, l'on constate que le gain en propriété augmente avec les coûts de production. La pâte PCTM de pin loblolly se rapproche de la pâte PTM de sapin/épinette au niveau de la résistance mais, son coût de production est 24% plus élevé. Les coûts de production des pâtes PTM de pin loblolly et du sapin/épinette pourraient se comparer, cependant la résistance est de 12% inférieure pour les pâtes de pin loblolly. On ne réussit donc pas à produire une pâte de pin loblolly comparable en termes de propriétés et de coûts de production, à un mélange sapin/épinette. Les mélanges de pâtes utilisées pour obtenir une pâte équivalente seront différents pour le sud des Etats-Unis comparativement à l'est du Canada. Les interactions entre les propriétés des pâtes et des papiers en fonction des procédés, des coûts de production et des coûts en capital, sont donc différentes pour les pins comparativement à un mélange sapin/épinette.

Il est clair qu'à la lumière de ces résultats, que tous les aspects, dans le choix de l'implantation d'une usine de mise en pâte, doivent être considérés avant la décision finale portant sur le choix du procédé de mise en pâte; les

propriétés et la qualité des pâtes, les considérations environnementales et les coûts de production sont des facteurs déterminants. De plus, d'autres facteurs, spécifiques pour chaque usine, doivent être considérés tel que l'utilisation des autres types de pâte en fonction du produit final . Cette étude, néanmoins donnent des lignes directrices pour le producteur de pâte et de papier sur le mérite de chacun des procédés de mise en pâte, pour produire à de faibles coûts des pâtes mécaniques et chimico-mécaniques de pin loblolly.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- ISENBERG, I.H., "Pulpwood of United States and Canada Volume I-Conifers", Third Edition, Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin (1980).
- 2- STERNITZKE, H.S. and NELSON, T.C., "The Southern Pines of the United States", Economic Botany, 24 (2): 142-150, April/June (1970).
- 3- EGUILUZ PIEDRA, T., "Descripcion Botanica De Los Pinos Mexicanos", Division de Ciencias Forestales Universidad Autonoma Chapingo, Chapingo,, México, Junio (1985).
- 4- SCALLAN, A.M. and GREEN, H.V., "A Technique for Determining the Transverse Dimensions of the Fibre in Wood", Wood and Fiber, Winter 1974, Volume 5 (4), p. 323-333.
- 5- BRITT, K.W., "Determination of Fibre Coarseness in Wood Samples ", Tappi 48 (1): 7-10, January (1965).
- 6- COWN, D.J., "Wood Density of Pinus Caribaea var. Hondurensis Grown in FIJI", N.Z.J. Forestry Sci. 11 (3): 244-253 (1981).
- 7- WORRAL, J., BURLEY, J., PALMER, E.R., HUGHES, J.F., "The Properties of some Caribbean Pine Pulps, and their Relationship to Wood Specific Gravity Variables", Commonwealth Forestry Institute, South Park Road, Oxford, United Kingdom, January (1977).
- 8- KOCH, P., "Utilization of the Southern Pines. II Processing", U.S. Department of Agriculture Forest Service, Handbook no. 420: volume 2, p.1413-1431, Washington, 1972.
- 9-Collaboration, "The Practical Identification of Wood Pulp Fibers", Tappi, 200 p. (1976).
- 10- KOCH, P., "Utilization of the Southern Pines. I Raw Material", U.S. Department of Agriculture Forest Service, Handbook no.420 : volume 1, p.189-234, Washington, 1972.

- 11- McCubbin, N., "Techniques de base de l'industrie des pâtes et papiers, et ses pratiques de protection environnementale", Guide de formation SPE 6-EP-83-1F, Direction générale des programmes de protection de l'environnement, mars, 224 p. (1984).
- 12- KOKTA, B.V., Notes de Cours de "Chimie du Bois", (1988).
- 13- SARKANEN, K.V., CHANG, H. and ALLAN, G.G., "Species variations in lignins II. Conifer lignins", Tappi 50: 583-587 (1967).
- 14-FENGEL, P. and WEGENER, G., "Wood, Walter de Gruyter and Co.", Berlin (1983).
- 15- ALTMAN, P.L. and DITTMER, D.S., "Biology data book", Fed. Amer. Soc. Exp. Biol., Washington D.C., 615 p. (1964).
- 16- LEASK, R.A., "Mechanical Pulp Past and Present", Southern Pulp and Paper Manufacturer, p.26-33, March (1977).
- 17- COLLICUT, S.A., FRAZIER, W.C., HOLMES, G.W., JOYCE, P., MACKIE, D.M. and TORZA, S., "Developments in refiner mechanical pulping", Tappi 64 (6): 57-61, June (1981).
- 18- BONIN, P., JANKNECHT, S., BARBE, M.C., VALADE, J.L., "Utilisation de sciures, planures et fines de scieries dans la fabrication du papier journal", Les Papetières du Québec, Vol.1 no.1: 25-34, février (1990).
- 19- JACKSON, M., "The Manufacture and Quality Characteristics of Refiner Mechanical and Thermomechanical Pulp", Mechanical Pulping Course, p.113-121 (1982).
- 20- FRANZEN, R.G., "General and Selective Upgrading of Mechanical Pulps", International Mechanical Pulping Conference, p.19-33 (1985).
- 21- Collaboration, "Developments and Trends in Thermomechanical Pulping", Sunds Defibrator, 20 p.
- 22- KURDIN, J.A., "New Developments in Mechanical Pulping", Southern Pulp and Paper Manufacturer, p.45-51, March (1985).
- 23- LACHENAL, D. et de CHOUDENS, C., "Evolution des procédés dans l'industrie des pâtes", ATIP 34 (6): 277-282, juin-juillet (1980).
- 24- JACKSON, M., DANIELSSON, O. and RYRBERG, G., "The Production and Quality Characteristics of High Yield Pulps from South African Wood Species", Sunds Defibrator, 23 p.

- 25- MUTTON, D.B., TMUBLER, G., GARDNER, P.E. and FORD, M.J., "The Story of Sulfonated Chemimechanical Pulp", Pulp and Paper Canada 82 (9): 44-48 (1981).
- 26- JACKSON, M., "The Manufacture and Quality Characteristics of CTMP and CMP", Mechanical Pulping Course, p.141-148 (1982).
- 27- McCUBBIN, N., "Techniques de base de l'industrie des pâtes et papiers, et ses pratiques de protection environnementale", Environnement Canada, SPE G-EP-83-1F, 224 p., mars (1984).
- 28- GUPTA, V.N., "Carbonyl Chromophores in Eastern Canadian Groundwood", Pulp and Paper Magazine of Canada, 73 (6): 71-77 (1979).
- 29- SINGH, R.P., "The Bleaching of Pulp", Monograph 43, Technical Association for Pulp and Paper Industries, New York, p. 211-274 (1979).
- 30- RINKER, R.G., GORDON, T.P., MASON, D.M. and SAKAIDA, R.R., "Kinetics and Mechanism of the Air Oxidation of the Dithionite Ion ($S_2O_4^{2-}$) in Aqueous Solution", Journal of Physical Chemistry 64: 573-580 (1960).
- 31- DANEHY, F.P. and ZUBRITSKY, C.W., "Iodometric Method for the Determination of Dithionite, Bisulfite and Thiosulfate in the Presence of Each Other and its Use in Following the Decomposition of Aqueous Solution of Sodium Dithionite", Analytical Chemistry 46 (3): 391-395 (1974).
- 32- ANDREWS, D.H., "The Bleaching of Mechanical Pulp Part I. Bleaching Theory", Mechanical Pulping Course: 195-200 (1982).
- 33- GARNER, A., "Source of Thiosulphate in Papermachine White Water Part II: Thiosulphate Formation During Sodium Hydrosulphite Brightening", Journal of Pulp and Paper Science 10 (3): J51-J57 (1984).
- 34- Virchem Canada, Rapport interne.
- 35- KATZ, S., BEATSON, R.P. and SCALLAN, A.M., "The Determination of Strong and Weak Acidic Groups in Sulfite Pulps", Svensk Papperstidning 87 (6): R48-R53 (1984).
- 36- TASMAN, J.E., "The Fiber Length of Bauer-McNett Screen Fractions", Tappi 55 (1): 136-138, January (1972).

- 37- MAY, W.D., LUNAN, E., "Thermomechanical Pulping", Thirteenth Progress Report, 20 p., July (1980).
- 38- SINKEY, D.J., "The Heating of Wood Chips in Thermomechanical Pulping", Pulp and Paper Canada 80 (3): T75-T79 (1979).
- 39- VEAL, M.A., "Some Wood Properties of Southern Pines that Influence Production and Properties of Mechanical Pulp", Weyerhauser Paper Company, Tacoma WA, May (1988).
- 40- ATTACK, D., JACKSON, M., FONTEBASSO, J. and STATIONWALA, M.I., "Pressurized Grinding of Loblolly Pine", Tappi Proceedings, 1983 Annual Meeting, p.163-170 (1983).
- 41- GARCEAU, J.J., "Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques, Les pâtes mécaniques de raffineur", Chapitre 4, p. 86-139 (1989).
- 42- SCALLAN, A.M. and BORCH, J., "Fundamental Parameters Affecting the Opacity and Brightness of Uncoated Paper", Presented at the Fundamental Properties of Paper related to its uses, Cambridge (1973).
- 43- DESSUREAULT, S., "Comparaison de différentes alternatives de mise en pâte chimico-thermomécanique", mémoire de thèse de Maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, avril (1990).
- 44- LEMAY, Y., "Pâtes Mécaniques et Chimico-mécaniques, Les pâtes à très haut rendement avec traitement chimique", ACPPP, Chapitre 5, p. 140-153 (1989).
- 45- HEITNER, C. and HATTULA, T., "Ultra-High Yield Pulping. Part VI. The Effect of Sulphonation on the Development of Fiber Properties", International Mechanical Pulping Conference, p. 145-151, June (1987).
- 46- DICK, R.H. and ANDREWS, D.H., Pulp and Paper Magazine Canada 66 (3): T-201, March (1965).
- 47- DODSON, M.G., BOHN, W.L., MEYRANT, P., KOUK, R.S., "Impact of Sulfonation Level on Hydrogen Peroxide Bleaching Response of Hardwood and Softwood High-yield Pulps", 1987 Tappi Pulping Conference, p.479-495 (1987).
- 48- EDWARDS, L.L., ABBOT, R., AHLENIUS, L., HAYNES, J., "PCGEMS Reference Manual", Idaho Research Foundation, Moscow, Idaho, (1987).

- 49- GAGNE, C., BARBE, M.C., REMILLARD, B., LAPOINTE, M., "Properties of Mechanical and Chemi-mechanical Jack Pine Pulps. Part IV. Bleaching Studies", Pulp and Paper Can 91 (6): T221-230, June (1990).
- 50- DESSUREAULT, S., and BARBE, M.C., "Comparison of Different CTMP Pulping Processes", Preprints 76th Annual Meeting CPPA, p. A245-253, January (1990).
- 51- WEARING, J.T., BARBE, M.C. and OUCHI, M.D., "The Effect of White-water Contamination on Newsprint Properties", Journal of Pulp and Paper Science, Vol II (4): J113-121, July (1985).
- 52- HARRIS, M., JAN, R., MICHIE, C., IONIDES, G., "Market Bleached CTMP: Interregional Comparison of Manufacturing Costs and Future Prospects", Temanex Consulting Inc., Vancouver, January (1990).

ANNEXE A

PROJECT: S. Janknecht
WOOD: loblolly pine
PROCESS: RMP
FILE: lob.o

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

DATE: juillet 88

155

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	r1	r1-1	r1-2	r1-3	r1-4	r1-5
------	----	------	------	------	------	------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	47	21	34	45	63	67
-----------	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.95	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.19	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

DISK CLEAREANCE

FLAT DISKS (mm) (measured)	0.8	0.8	0.5	0.4	0.35	0.3
CONICAL DISKS (mm) (measured)	2.4	2.4	1.5	1.2	1.05	0.9
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.80	0.90	0.50	0.40	0.35	0.30

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	4833	4100	4113	3268	2806	2003
SAMPLING TIME (dry)	60	60	60	60	60	60
CONSISTENCY (%)	15.03	13.07	11.85	11.76	14.19	16.33
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.726	0.536	0.488	0.384	0.398	0.327

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1078.6	1078.6	1078.6	1078.6	1078.6	1078.6
-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

2nd STAGE		653.3	1162.3	1951.5	2637.7	3413.2
-----------	--	-------	--------	--------	--------	--------

TOTAL	1078.6	1731.9	2240.9	3030.1	3716.3	4491.9
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

FRENESS (ml)	667	388	185	95	72	38
--------------	-----	-----	-----	----	----	----

PROJECT: S. Janknecht
WOOD: loblolly pine
PROCESS: TMP
FILE: lob.p

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

DATE: juillet 88

156

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	p1	p1-1	p1-2	p1-3	p1-4	p1-5	p1-6	p1-7
------	----	------	------	------	------	------	------	------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	73	19	17	22	28	35	47	54
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.72	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.18	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

DISK CLEAREANCE

FLAT DISKS (mm)(measured)	0.8	0.8	0.6	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
CONICAL DISKS (mm)(measured)	2.4	2.4	1.8	1.5	1.35	1.2	1.05	0.9
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.80	0.80	0.60	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	2433	4628	4343	4182	5238	4887	4946	3194
SAMPLING TIME (dry)	60	60	60	60	60	60	60	60
CONSISTENCY (%)	26.74	12.58	11.48	11.39	11.76	11.29	11.67	10.73
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.651	0.582	0.499	0.476	0.615	0.453	0.577	0.343

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1870.1	1870.1	1870.1	1870.1	1870.1	1870.1	1870.1	1870.1
2nd STAGE		544.0	568.3	770.0	758.7	1289.1	1357.5	2625.3
TOTAL	1870.1	2414.1	2438.4	2648.1	2628.9	3159.2	3227.6	4495.4
FRENESS (ml)	410	262	230	211	170	133	95	83

PROJECT: S. Janknecht
WOOD: loblolly pine
PROCESS: ctmp (3%)
FILE: lob.p

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

DATE: juillet 88

157

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	cp2	cp2-1	cp2-2	cp2-3	cp2-4	cp2-5	cp2-6
------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	91	19	27	34	42	40	57
-----------	----	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.85	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.19	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

DISK CLEARENCE

FLAT DISKS (mm)(measured)	0.5	0.8	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
CONICAL DISKS (mm)(measured)	1.5	2.4	1.5	1.35	1.2	1.05	0.9
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.50	0.80	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	3876	4686	5080	4218	4006	4258	3327
SAMPLING TIME (dry)	60	60	60	60	60	60	60
CONSISTENCY (%)	23.24	12.04	18.55	12.51	12.41	13.16	13.44
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.901	0.564	0.942	0.528	0.497	0.560	0.447

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1683.7	1683.7	1683.7	1683.7	1683.7	1683.7	1683.7
2nd STAGE		561.3	477.5	1074.2	1407.7	1189.7	2124.6
TOTAL	1683.7	2245.0	2161.3	2757.9	3091.4	2873.4	3808.3

FRENESS (ml)	427	262	238	184	117	79	62
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	----	----

PROJECT: S. Janknecht
WOOD: loblolly pine
PROCESS: ctmp (6%)
FILE: lob.p

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

DATE: juillet 88

158

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	cp1	cp1-1	cp1-2	cp1-3	cp1-4	cp1-5	cp1-6	cp1-7
------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	77	10	16	17	19	41	42	60
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.85	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.18	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

DISK CLEARENCE

FLAT DISKS (mm)(measured)	0.5	0.8	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
CONICAL DISKS (mm)(measured)	1.5	2.4	1.5	1.35	1.2	1.05	0.9	0.75
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.50	0.80	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	2628	4322	4063	4024	4415	4545	3861	3350
SAMPLING TIME (dry)	68	68	68	68	68	68	68	68
CONSISTENCY (%)	25.48	11.67	10.92	11.01	10.83	12.51	11.48	12.60
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.670	0.504	0.444	0.443	0.478	0.568	0.351	0.422

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1916.5	1916.5	1916.5	1916.5	1916.5	1916.5	1916.5	1916.5
2nd STAGE		338.5	601.0	639.3	662.5	1202.1	1992.0	2369.1
TOTAL	1916.5	2247.1	2517.6	2555.8	2579.0	3118.7	3908.5	4285.6
FRENESS (ml)	416	375	317	271	184	117	88	49

PROJECT: S. Janknecht
WOOD: loblolly pine
PROCESS: cmp (12%)
FILE: lob.p

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

DATE: juillet 88

159

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	sc1	sc1-1	sc1-2	sc1-3	sc1-4	sc1-5	sc1-6	sc1-7
------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	47	17	19	28	39	42	41	45
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.62	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.18	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

DISK CLEARENCE

FLAT DISKS (mm)(measured)	0.4	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
CONICAL DISKS (mm)(measured)	1.2	1.5	1.35	1.2	1.05	0.9	0.75	0.6
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.48	0.50	0.45	0.48	0.35	0.30	0.25	0.20

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	3689	3763	3857	3741	3875	2988	2820	3059
SAMPLING TIME (dry)	68	68	68	68	68	68	68	68
CONSISTENCY (%)	19.46	12.13	11.29	10.27	10.83	11.76	12.04	11.48
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.702	0.457	0.436	0.384	0.420	0.351	0.348	0.351

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1115.4	1115.4	1115.4	1115.4	1115.4	1115.4	1115.4	1115.4
2nd STAGE		628.6	727.8	867.9	1549.3	1992.1	2012.6	2136.4
TOTAL	1115.4	1735.9	1842.4	1983.2	2664.7	3107.5	3128.0	3251.9
FREENESS (ml)	737	712	722	687	488	204	163	111

PROJECT: S. Janknecht

HYMAC LTEE (CRPP/UQTR)

160

WOOD: loblolly pine

PROCESS: cmo (18%)

DATE: juillet 88

FILE: lob.p

CALCULATION OF REFINING SPECIFIC ENERGY

CODE	sc82	sc82-1	sc82-2	sc82-3	sc82-4	sc82-5	sc82-6	sc82-7
------	------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

POWER CONSUMPTION

LOAD (kw)	102	11	11	15	15	19	20	32
-----------	-----	----	----	----	----	----	----	----

DILUTION

FLAT DISKS (galUS/min)	0.67	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
CONICAL DISKS (galUS/min)	0.21	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

DISK CLEARENCE

FLAT DISKS (mm) (measured)	0.3	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
CONICAL DISKS (mm) (measured)	0.9	1.5	1.35	1.2	1.05	0.9	0.75	0.6
CONICAL DISKS (mm) (real)	0.30	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20

CALCULATION OF AVERAGE PRODUCTION OUTPUT (kg/min)

WET WEIGHT SAMPLE (g)	2785	4362	4270	4567	4343	4195	4062	3894
SAMPLING TIME (dry)	60	60	60	60	60	60	60	60
CONSISTENCY (%)	34.02	10.83	9.52	10.27	10.17	10.83	10.27	10.92
PRODUCTION (dry basis) (kg/min)	0.947	0.472	0.487	0.469	0.442	0.454	0.417	0.425

CALCULATION OF SPECIFIC ENERGY (kwh/BDMT)

1st STAGE	1794.3	1794.3	1794.3	1794.3	1794.3	1794.3	1794.3	1794.3
2nd STAGE		388.2	451.0	533.2	565.8	697.2	799.3	1254.2
TOTAL	1794.3	2182.5	2245.3	2327.5	2360.1	2491.5	2593.6	3048.5
FRENESS (ml)	287	273	254	213	193	168	133	75

ANNEXE B

BOIS:lobiofily pine
PROCEDE: rmp
FICHIER: prep

DATE: JUILLET 88

CODE	r1	r1-1	r1-2	r1-3	r1-4	r1-5	162
ENERGIE (Kwh/TMSA)	1079	1732	2241	3030	3716	4492	
(MJ/kg)	3.88	6.24	8.87	10.91	13.38	16.17	
(HPD/TMSA)	60.3	96.8	125.2	169.3	207.6	251.0	
PROPRIETES DES PATES							
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	663	301	129	96	37	23	
FRACTIONS BAUER McNETT (%)							
R 14	11.8	15.0	6.3	8.8	3.0	1.8	
14/28	32.9	36.3	26.8		19.6	17.0	
28/48	26.0	26.1	23.2		20.5	24.9	
48/100	17.0	11.0	11.0		13.7	12.0	
100/200	2.9	3.9	3.9		7.3	7.6	
P 200	9.4	29.6	29.6		35.9	36.7	
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.49	1.65	1.15	0.88	0.93	0.89	
% REJETS PULMAC (0.006)	4.308	2.428	1.108	0.808	0.938	0.468	
PROPRIETES DU PAPIER SEC							
STRUCTURALES							
GRAMMAGE (g/m²)	60.87	59.97	59.08	61.46	61.68	60.54	
VOLUME SPECIFIQUE (cm³/g)	5.56	4.72	4.17	3.38	3.02	2.63	
DENSITE (g/cm³)	0.18	0.21	0.24	0.30	0.33	0.39	
POROSITE (ml/min)	2688	2188	1388	282	58	28	
RESISTANCE							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	0.65	1.35	2.03	2.68	3.31	4.09	
ALLONGEMENT (%)	1.36	1.44	1.68	2.04	2.55	2.54	
ENERGIE DE RUPTURE (cm²gf)	58	111	199	321	512	648	
IND. ECLATEMENT (kPa*m²/g)	0.00	0.55	0.97	1.34	1.85	2.14	
COEF. ECLAT. (gf*cm²*m²/g)	0.00	5.61	9.91	13.67	18.84	21.86	
INDICE DECHIRURE (aN*m²/g)	2.61	4.96	6.83	6.44	6.35	6.10	
COEF. DECHIR.(100 gf*m²/g)	26.60	50.59	69.66	65.71	64.73	62.16	
L.R. LIMITE (km)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	
PROPRIETES OPTIQUES							
BLANCHEUR (3-457nm, %)	51.5	52.0	54.3	56.9	58.3	57.8	
(10-FMY, %)	70.8	68.4	70.2	72.7	73.5	72.4	
OPACITE (%)	86.9	91.2	94.5	94.2	95.7	97.1	
COEFF. DIFFUSION (cm²/g)	337	397	521	560	653	712	
COEFF. ABSORPTION (cm²/g)	21.7	24.9	27.5	29.0	32.9	38.8	

BOIS:icobolally pine
PROCEDE:tmp
FICHIER:ptmp1

DATE: JUILLET 88

CODE	p1	p1-1	p1-2	p1-3	p1-4	p1-5	p1-6	p1-7	163
ENERGIE (KWh/TMSA)	1878	2414	2438	2648	2629	3159	3228	4495	
(MJ/kg)	6.73	8.69	8.78	9.58	9.46	11.37	11.62	16.18	
(HPD/TMSA)	184.5	134.9	136.2	147.5	146.9	176.5	180.4	251.2	
PROPRIETES DES PATES									
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	366	197	168	165	116	84	67	53	
FRACTIONS BAUER McNETT (%)									
R 14	18.0	12.8	13.6	11.3	11.9	11.1	8.0	7.9	
14/28	26.0	28.5	29.1	27.5	26.7	24.9		23.9	
28/48	18.0	14.4	15.1	17.2	15.6	12.2		16.8	
48/100	7.8	10.3	10.3	7.8	9.8	13.2		10.3	
100/200	3.2	3.3	2.8	3.5	3.8	3.9		4.9	
P 200	26.7	38.2	28.6	32.4	31.9	34.4		35.9	
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.41	1.28	1.32	1.24	1.23	1.16	0.80	1.09	
Z REJETS PULMAC (0.006)	0.648	0.488	0.468	0.348	0.388	0.388	0.808	0.348	
PROPRIETES DU PAPIER SEC									
STRUCTURALES									
GRAMMAGE (g/m²)	59.92	61.17	60.51	60.21	60.94	60.89	59.97	60.42	
VOLUME SPECIFIQUE (cm³/g)	4.22	3.85	3.71	3.67	3.30	3.36	3.28	3.80	
DENSITE (g/cm³)	0.24	0.26	0.27	0.27	0.30	0.30	0.30	0.33	
POROSITE (ml/min)	1920	1380	1120	880	322	288	144	69	
RESISTANCE									
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	2.08	2.72	2.78	2.77	3.13	3.44	3.55	4.14	
ALLONGEMENT (%)	1.80	1.96	1.98	2.02	1.93	2.28	2.22	2.40	
ENERGIE DE RUPTURE (cm²gf)	228	322	321	334	361	456	475	607	
IND. ECLATEMENT (kPa*m²/g)	0.95	1.38	1.36	1.45	1.67	1.89	1.97	2.28	
COEF. ECLAT. (gf*cm²*m²/g)	9.55	13.38	13.85	14.84	17.03	19.24	19.24	20.13	
INDICE DECHIRURE (N*m²/g)	7.55	10.29	9.84	9.72	9.38	9.17	8.91	8.41	
COEF. DECHIR.(100 gf*m²/g)	77.01	104.95	92.22	99.07	94.83	93.51	90.82	85.80	
L.R. LIMITE (km)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	
PROPRIETES OPTIQUES									
BLANCHEUR (8-457nm, %)	52.4	52.8	53.1	53.1	53.5	53.8	54.1	53.9	
(10-FMY, %)	69.3	69.9	70.3	69.8	70.0	69.7	69.7	69.3	
OPACITE (%)	91.9	92.4	92.1	92.5	93.4	94.6	95.5	95.3	
COEFF. DIFFUSION (cm²/g)	428	458	448	452	481	519	557	542	
COEFF. ABSORPTION (cm²/g)	29.2	29.2	28.0	29.5	31.8	34.2	36.8	36.8	

BOIS:loblolly pine
PROCEDE: ctmp(3%)
FICHIER:pctmp2

DATE: JUILLET 88

CODE	cp2	cp2-1	cp2-2	cp2-3	cp2-4	cp2-5	cp2-6	164
ENERGIE (Kwh/TMSA)	1684	2245	2161	2758	3091	2973	3008	
(MJ/kg)	6.86	8.08	7.78	9.93	11.13	10.34	10.71	
(HPD/TMSA)	94.1	125.4	120.7	154.1	172.7	168.5	212.8	
PROPRIETES DES PATES								
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	412	241	203	150	109	103	56	
FRACTIONS BAUER McNETT (%)								
R 14	21.3	19.1	17.0	14.9	8.0	12.1	9.8	
14/28	27.3	28.0	27.8	27.3		26.5	26.5	
28/48	17.9	15.3	17.5	18.0		19.2	19.9	
48/100	7.7	7.3	7.2	7.5		8.3	8.7	
100/200	4.0	3.7	3.4	2.2		3.9	6.1	
P 200	21.8	26.6	26.7	30.1		30.0	29.0	
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.53	1.45	1.41	1.34	8.00	1.27	1.21	
% REJETS PULMAC (0.006)	0.440	0.220	0.160	0.200	0.000	0.200	0.160	
PROPRIETES DU PAPIER SEC								
STRUCTURALES								
GRAMMAGE (g/m ²)	59.31	59.23	59.10	59.05	58.94	59.04	59.59	
VOLUME SPECIFIQUE (cm ³ /g)	4.44	4.38	4.09	3.88	3.67	3.43	3.11	
DENSITE (g/cm ³)	0.23	0.23	0.24	0.26	0.27	0.29	0.32	
POROSITE (ml/min)	2270	1640	1200	482	246	184	57	
RESISTANCE								
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	1.87	2.47	2.74	3.09	3.55	3.44	4.12	
ALLONGEMENT (%)	2.03	1.95	2.22	2.46	2.61	2.71	2.55	
ENERGIE DE RUPTURE (cm*gf)	232	276	356	445	546	562	643	
IND. ECLATEMENT (kPa*m ² /g)	0.89	1.28	1.50	1.74	1.91	1.91	2.22	
COEF. ECLAT. (gf*cm ² *m ² /g)	9.08	13.07	15.29	17.72	19.43	19.43	19.43	
INDICE DECHIRURE (N*m ² /g)	8.07	10.50	10.00	10.00	9.30	8.78	8.39	
COEF. DECHIR.(100 gf*m ² /g)	82.33	107.00	102.02	101.99	94.79	89.53	85.60	
L.R. LIMITE (ks)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	
PROPRIETES OPTIQUES								
BLANCHEUR (8-457nm, %)	56.4	55.8	56.3	57.0	57.2	57.5	57.5	
(10-FMY, %)	72.7	72.3	72.6	73.2	73.1	73.3	72.5	
OPACITE (%)	89.3	90.5	90.7	93.4	93.8	93.4	95.9	
COEFF. DIFFUSION (cm ² /g)	413	429	446	528	529	528	625	
COEFF. ABSORPTION (cm ² /g)	28.6	23.4	22.3	26.4	26.4	26.4	34.0	

BOIS: iobiobilly pine

PROCEDE: ctmp (61)

DATE: JUILLET 88

FICHIER:pctwo1

CODE	cp1	cp1-1	cp1-2	cp1-3	cp1-4	cp1-5	cp1-6	cp1-7 ¹⁶⁵
ENERGIE (KwH/TMSA)	1917	2245	2518	2556	2579	3119	4286	4414
(MJ/kg)	8.78	10.45	10.94	11.35	13.55	12.69	17.15	15.89
(HPD/TMSA)	136.3	162.2	169.9	176.2	218.3	196.9	266.1	246.6
PROPRIETES DES PATES								
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	399	282	237	211	202	187	78	39
FRACTIONS BAUER McNETT (%)								
R 14	19.9	19.5	17.8	16.9	16.8	8.8	18.2	7.2
14/28	29.5	30.7	30.2	30.0	29.4		27.3	25.6
28/48	1.7	15.8	15.9	16.5	17.8		19.1	20.7
48/100	21.1	6.1	6.5	7.8	7.2		8.6	9.9
100/200	3.8	2.3	3.2	3.1	4.1		5.4	6.4
P 200	24.8	25.6	26.4	26.5	26.3		29.4	30.2
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.43	1.51	1.45	1.43	1.48	0.00	1.23	1.14
Z REJETS PULMAC (0.006)	0.000	0.010	0.010	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000
PROPRIETES DU PAPIER SEC								
STRUCTURALES								
GRAMMAGE (g/m ²)	58.10	58.57	58.57	57.20	58.15	57.96	58.16	57.89
VOLUME SPECIFIQUE (cm ³ /g)	4.56	4.78	4.48	4.35	4.24	3.62	3.36	2.96
DENSITE (g/cm ³)	0.22	0.21	0.22	0.23	0.24	0.28	0.30	0.34
POROSITE (ml/min)	1980	2350	1770	1500	1160	274	130	31
RESISTANCE								
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	2.29	1.88	2.59	2.67	2.81	3.44	3.91	4.44
ALLONGEMENT (%)	1.73	1.91	1.97	2.10	2.17	2.45	2.47	2.25
ENERGIE DE RUPTURE (cm*gf)	222	193	289	316	357	493	569	575
IND. ECLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.16	0.88	1.38	1.42	1.48	1.95	2.08	4.78
COEF. ECLAT. (gf*cm ² m ² /g)	11.86	8.95	13.28	14.44	15.10	19.88	19.88	21.16
INDICE DECHIRURE (N*m ² /g)	9.94	8.84	9.83	10.72	10.02	9.24	8.72	7.76
COEF. DECHIR.(100 gf*m ² /g)	101.35	81.96	92.11	109.31	102.14	94.19	88.92	79.16
L.R. LIMITE (km)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
PROPRIETES OPTIQUES								
BLANCHEUR (B-457nm, %)	56.0	55.3	55.5	56.5	57.2	57.4	57.9	57.7
(10-FMY, %)	71.4	70.4	70.5	71.5	72.3	72.1	72.2	71.5
OPACITE (%)	89.6	90.2	90.4	90.5	90.2	92.7	93.7	95.4
COEFF. DIFFUSION (cm ² /g)	401	404	408	424	438	491	526	585
COEFF. ABSORPTION (cm ² /g)	23.0	25.0	25.2	24.0	23.2	26.4	28.1	33.2

BOIS:lobiolly pine

PROCEDE: cmp (12%)

FICHIER:pscml

DATE: JUILLET 88

CODE	sc1-1	sc1-2	sc1-3	sc1-4	sc1-5	sc1-6	sc1-7	166
ENERGIE (Kwh/TMSA)	1736	1842	1983	2665	3108	3128	3252	
(MJ/kg)	6.25	6.63	7.14	9.59	11.19	11.26	11.71	
(HPD/TMSA)	97.8	102.9	110.8	148.9	173.7	174.8	181.7	
PROPRIETES DES PATES								
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	687	676	621	363	186	116	103	
FRACTIONS BAUER McNETT (%)								
R 14	26.6	26.2	24.1	20.6	13.2	0.0	0.0	
14/28	31.8	30.6	31.7	32.3	30.2			
28/48	1.3	11.8	13.9	12.5	16.8			
48/100	18.5	8.1	6.6	9.2	10.4			
100/200	1.8	2.8	2.6	3.5	4.4			
P 200	20.7	21.3	21.1	21.8	25.8			
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.63	1.66	1.64	1.55	1.34	0.00	0.00	
Z REJETS PULMAC (0.006)	0.120	0.100	0.120	0.100	0.070	0.000	0.000	
PROPRIETES DU PAPIER SEC								
STRUCTURALES								
GRAHMAGE (g/m ²)	58.89	61.11	58.79	58.29	59.52	59.13	60.02	
VOLUME SPECIFIQUE (cm ³ /g)	5.52	5.74	5.25	4.60	3.85	3.71	3.55	
DENSITE (g/cm ³)	0.16	0.17	0.19	0.17	0.26	0.27	0.28	
POROSITE (ml/min)	2600	2600	2590	2300	730	378	312	
RESISTANCE								
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	1.19	1.15	1.38	2.20	3.02	3.35	3.32	
ALLONGEMENT (%)	1.04	1.20	1.14	1.48	1.88	2.12	2.07	
ENERGIE DE RUPTURE (cm*gf)	67	77	87	182	332	354	299	
IND. ECLATEMENT (kPa*m ² /g)	0.51	0.47	0.61	1.03	1.51	1.88	1.76	
COEF. ECLAT. (gf*cm ² *m ² /g)	5.23	4.84	5.21	10.53	15.40	18.30	21.05	
INDICE DECHIRURE (mN*m ² /g)	5.48	5.08	6.70	9.28	8.65	7.39	6.34	
COEF. DECHIR.(100 gf*m ² /g)	55.86	51.82	68.37	93.77	88.18	75.33	64.62	
L.R. LIMITE (km)	ERR							
PROPRIETES OPTIQUES								
BLANCHEUR (6-457nm, %)	48.8	49.2	49.5	51.7	53.0	53.3	53.7	
(10-FMY, %)	66.5	67.1	67.2	68.5	69.3	69.6	69.8	
OPACITE (%)	88.7	87.3	88.7	90.1	91.9	92.7	93.0	
COEFF. DIFFUSION (cm ² /g)	334	318	340	380	429	453	466	
COEFF. ABSORPTION (cm ² /g)	28.3	25.6	27.2	27.4	29.1	30.2	30.5	

BOIS:loblolly pine
PROCEDE: cmf (18%)
FICHIER:pscapp8r

DATE: JUILLET 88

CODE	sc8-5	sc82-1	sc82-2	sc82-3	sc82-4	sc82-5	sc82-6	sc82-7	167
ENERGIE (KwH/TMSA)	1794	2183	2245	2328	2360	2492	2594	3049	
(MJ/kg)	6.46	7.86	8.08	8.38	8.58	8.97	9.34	10.98	
(HPD/TMSA)	100.2	122.8	125.4	130.1	131.9	139.2	144.9	178.4	
PROPRIETES DES PATES									
INDICE D'EGOUTTAGE (ml)	436	273	254	213	193	168	133	75	
FRACTIONS BAUER McNETT (%)									
R 14	25.9	19.9	21.8	20.2	20.9	18.7	19.4	11.4	
14/28	25.8	25.7	24.1	25.6	24.1	27.3	24.1	25.3	
28/48	15.8	17.3	16.3	16.8	16.7	18.2	17.1	21.3	
48/100	6.1	8.6	8.7	7.1	7.2	7.7	7.2	5.1	
100/200	3.1	3.3	3.4	3.3	1.8	4.3	4.7	9.8	
P 200	23.8	25.8	25.5	27.0	29.3	23.8	27.5	27.9	
LONGUEUR DES FIBRES (mm)	1.59	1.45	1.47	1.45	1.44	1.46	1.41	1.24	
I REJETS PULMAC (0.006)	0.270	0.250	0.200	0.040	0.010	0.000	0.000	0.000	
PROPRIETES DU PAPIER SEC									
STRUCTURALES									
GRAMMAGE (g/m²)	58.87	58.55	60.72	60.38	59.35	60.72	64.59	57.89	
VOLUME SPECIFIQUE (cm³/g)	4.63	3.91	3.92	3.61	3.78	3.56	3.20	3.05	
DENSITE (g/cm³)	0.22	0.26	0.26	0.28	0.27	0.28	0.31	0.33	
POROSITE (ml/min)	2390	1600	1530	1040	870	700	282	122	
RESISTANCE									
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	2.36	3.06	3.10	3.44	3.63	3.71	4.08	4.38	
ALLONGEMENT (%)	1.74	1.94	1.98	2.13	2.10	2.18	2.24	2.11	
ENERGIE DE RUPTURE (ca*gf)	241	349	376	453	459	501	598	528	
IND. ECLATEMENT (kPa*m²/g)	1.08	1.50	1.64	1.78	1.84	1.92	2.16	2.20	
COEF. ECLAT. (gf*cm²*m²/g)	11.03	15.34	16.76	18.11	18.81	19.58	19.58	22.87	
INDICE DECHIRURE (N*m²/g)	9.96	10.04	11.19	10.66	11.01	10.22	9.64	8.09	
COEF. DECHIR.(100 gf*m²/g)	101.54	102.42	114.16	108.65	112.25	104.24	98.29	82.48	
L.R. LIMITE (km)	ERR								
PROPRIETES OPTIQUES									
BLANCHEUR (8-457nm, %)	52.8	55.2	54.8	55.7	55.5	55.5	55.4	55.5	
(10-FMY, %)	67.7	69.6	69.2	70.8	70.0	70.0	69.6	69.6	
OPACITE (%)	88.4	90.2	90.2	90.3	90.6	90.2	91.1	91.9	
COEFF. DIFFUSION (cm²/g)	341	393	389	401	407	399	414	434	
COEFF. ABSORPTION (cm²/g)	26.2	26.2	26.7	25.7	26.1	25.6	27.5	28.8	

ANNEXE C

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY	EXP. NO. :	184	169
CODE	R1-3	DATE :	04/08/88	
STAGE	1 (P)			

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	0.92	1.20	1.40	1.80
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	10.0	10.0	10.0	10.0
TEMPERATURE	C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.2	11.2	11.2	11.1
pH (FINAL)	-	9.1	9.1	9.5	9.7
pH (NEUTRALISATION)	-				
H ₂ O ₂ (RES.)	%	41.3	49.3	57.4	65.8
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g OD)		0.41	0.99	1.72	3.29
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g OD)		0.59	1.01	1.28	1.71
NaOH (RESIDUAL)	%				

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	60.2	69.0	71.9	72.8	74.5
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	80.0	86.8	88.3	88.5	89.0
L*	90.00	93.67	94.48	94.70	94.95
A*	-1.07	-2.91	-3.13	-3.41	-3.13
B*	14.82	13.30	12.32	11.93	10.97
COST (ADDED) (\$ CAN)		27.38	39.76	51.99	76.44
COST (CONS.) (\$ CAN)		22.49	28.09	31.62	37.52
EFFICIENCY (PER. ADDED)		2.52	1.81	1.40	0.97
EFFICIENCY (PER. CONS.)		3.07	2.56	2.30	1.99
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)		2.82	1.84	1.43	1.01

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.0	67.2	69.8	70.8	71.8
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	78.9	84.0	85.2	85.3	85.5
L*	89.58	92.57	93.32	93.54	93.62
A*	-1.44	-3.20	-3.57	-3.93	-3.50
B*	15.05	13.07	12.10	11.53	10.59
COST (ADDED) (\$ CAN)		27.38	39.76	51.99	76.44
COST (CONS.) (\$ CAN)		22.49	28.09	31.62	37.52
EFFICIENCY (PER. ADDED)		2.45	1.76	1.36	0.94
EFFICIENCY (PER. CONS.)		2.99	2.48	2.24	1.91
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)		2.75	2.13	1.78	1.35

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY	EXP. NO. :	183	170
CODE	P1-6	DATE :	04/08/88	
STAGE	1(P)			

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	0.88	1.20	1.40	1.80
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	10.0	10.0	10.0	10.0
TEMPERATURE	°C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.1	11.1	11.1	11.0
pH (FINAL)	-	8.8	8.7	8.6	8.8
pH (NEUTRALISATION)	-				
H ₂ O ₂ (RES.)	%	38.3	50.5	57.4	65.2
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g OD)		0.38	1.01	1.72	3.26
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g OD)		0.62	0.99	1.28	1.74
NaOH (RESIDUAL)	%				

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	57.6	66.2	69.1	70.7	72.3
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	77.3	84.7	87.0	87.6	88.5
L*	88.88	92.62	93.75	94.10	94.57
A*	-1.46	-2.78	-3.02	-2.96	-3.05
B*	14.90	14.21	13.53	12.67	12.13
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.30	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)	22.77	27.81	31.62	37.88	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.42	1.74	1.36	0.95	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	2.91	2.48	2.24	1.91	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	2.69	1.77	1.39	0.98	

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	56.2	65.1	68.0	69.2	70.6
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	76.0	83.4	85.1	85.2	86.4
L*	88.26	92.04	93.10	93.15	93.75
A*	-1.60	-2.54	-3.48	-3.01	-3.28
B*	15.39	13.75	13.28	12.22	12.08
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.3	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)	22.77	27.81	31.62	37.88	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.38	1.71	1.33	0.92	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	2.86	2.45	2.19	1.86	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	2.65	2.09	1.74	1.32	

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY PINE	EXP. NO. :	182	171
CODE	CP1-S	DATE :	04/08/88	
STAGE	1 (P)			

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	0.88	1.20	1.40	1.76
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	10.0	10.0	10.0	10.0
TEMPERATURE	°C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.2	11.2	11.1	11.0
pH (FINAL)	-	9.1	8.9	9.2	9.7
pH (NEUTRALISATION)	-				
H ₂ O ₂ (RES.)	%	61.2	54.3	62.7	45.7
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g OD)		0.61	1.09	1.88	2.28
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g OD)		0.39	0.91	1.12	2.72
NaOH (RESIDUAL)	%				

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	62.4	69.5	71.6	72.8	74.3
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	80.5	87.0	88.3	88.6	89.2
L*	90.51	93.71	94.31	94.70	95.08
A*	-1.61	-2.76	-2.62	-3.30	-3.46
B*	13.74	13.28	12.53	12.02	11.35
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.30	39.76	51.99	76.36	
COST (CONS.) (\$ CAN)	20.06	26.91	29.72	49.34	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.55	1.80	1.40	0.97	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	3.46	2.66	2.45	1.51	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	3.03	1.84	1.44	0.99	

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	60.7	67.8	69.6	70.2	72.9
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	79.5	84.9	85.2	85.7	85.3
L*	89.95	92.93	93.23	93.45	93.67
A*	-1.35	-3.07	-3.23	-3.14	-3.73
B*	13.99	13.06	12.03	11.81	10.08
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.3	39.76	51.99	76.36	
COST (CONS.) (\$ CAN)	20.06	26.91	29.72	49.34	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.483	1.750	1.350	0.954	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	3.379	2.586	2.362	1.477	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	2.953	2.171	1.817	1.212	

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY PINE	EXP. NO. :	180	172
CODE	CP2-4	DATE :	04/08/88	
STAGE	1 (P)			

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	1.20	1.20	1.40	1.80
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	10.0	10.0	10.0	10.0
TEMPERATURE	°C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.4	11.1	11.2	11.1
pH (FINAL)	-	9.8	9.2	9.3	9.6
pH (NEUTRALISATION)	-	5.5	5.5	5.5	5.5
H ₂ O ₂ (RES.)	%	45.1	46.3	65.3	66.6
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g OD)		0.45	0.93	1.96	3.33
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g OD)		0.55	1.07	1.04	1.67
NaOH (RESIDUAL)	%				

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	60.9	68.1	71.0	72.5	74.2
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	80.2	86.5	87.9	88.7	89.0
L*	90.04	93.45	94.23	94.70	94.99
A*	-0.67	-2.85	-2.99	-3.23	-3.43
B*	14.24	13.88	12.72	12.18	11.29
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.93	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)	22.59	28.81	28.82	37.07	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.44	1.79	1.39	0.97	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	3.01	2.46	2.52	2.00	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	2.75	1.82	1.43	1.00	

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.8	66.7	69.3	70.3	59.8
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	78.8	84.2	85.3	85.5	78.8
L*	89.63	92.66	94.10	93.45	89.63
A*	-1.52	-3.43	-6.93	-3.41	-1.52
B*	14.47	13.57	13.78	11.72	14.47
COST (ADDED) (\$ CAN)	27.93	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)	22.59	28.81	28.82	37.07	
EFFICIENCY (PER. ADDED)	2.39	1.74	1.35	0.78	
EFFICIENCY (PER. CONS.)	2.95	2.41	2.44	1.61	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)	2.70	2.09	1.85	1.13	

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY PINE	EXP. NO. :	181	173
CODE	SC1-7	DATE	04/08/88	
STAGE	1 (P)			

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	1.00	1.20	1.40	1.80
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	10.0	10.0	10.0	10.0
TEMPERATURE	C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.3	11.1	11.1	11.0
pH (FINAL)	-	10.3	10.0	10.1	9.8
pH (NEUTRALISATION)	-				
H ₂ O ₂ (RES.)	%	43.6	67.3	63.0	73.4
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g OD)		0.44	1.35	1.89	3.67
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g OD)		0.56	0.65	1.11	1.33
NaOH (RESIDUAL)	%				

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	57.6	64.4	67.0	69.1	69.8	
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	77.5	84.6	85.8	87.0	87.0	
L*	-	88.69	92.40	93.19	93.71	93.80
A*	-	-0.48	-2.68	-3.21	-2.88	-2.98
B*	-	14.96	15.44	14.39	13.54	13.09
COST (ADDED) (\$ CAN)		27.53	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)		22.38	23.83	29.63	33.00	
EFFICIENCY (PER. ADDED)		2.34	1.69	1.33	0.91	
EFFICIENCY (PER. CONS.)		2.88	2.81	2.33	2.12	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)		2.64	1.73	1.36	0.95	

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	57.1	63.1	65.3	66.8	67.0	
BRIGHTNESS (FILTRE #9)	76.7	81.9	82.1	83.1	83.5	
L*	-	88.45	91.51	91.82	92.31	92.44
A*	-	-0.89	-3.43	-3.56	-3.56	-3.44
B*	-	14.84	14.81	13.27	12.87	12.93
COST (ADDED) (\$ CAN)		27.53	39.76	51.99	76.44	
COST (CONS.) (\$ CAN)		22.38	23.83	29.63	33	
EFFICIENCY (PER. ADDED)		2.29	1.64	1.28	0.88	
EFFICIENCY (PER. CONS.)		2.82	2.74	2.25	2.03	
EFFICIENCY (PER. CONS. 60)		2.58	2.16	1.73	1.33	

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD LOBLOLLY PINE EXP. NO. : 251
 CODE CP2-3 DATE : 22/09/88 174
 STAGE 1 (P)

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄	%	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH	%	1.40	1.20	1.20	1.20
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%	1.0	2.0	3.0	5.0
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%				
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	20	20	20	20
CONSISTENCY	%	15.0	15.0	15.0	15.0
TEMPERATURE	°C	70	70	70	70
RETENTION TIME	hr.	1.5	1.5	1.5	1.5
pH (INITIAL)	-	11.0	11.1	10.8	10.8
pH (FINAL)	-	10.0	9.9	9.9	9.9
pH (NEUTRALISATION)	-	5.5	5.5	5.5	5.5
H ₂ O ₂ (RES.) (g/100 g DD)		0.29	0.75	1.38	2.36
H ₂ O ₂ (CONS.) (g/100 g DD)		0.71	1.25	1.62	2.64
H ₂ O ₂ (FRESH) (g/100 g DD)					

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.3	68.6	72.3	74.0	76.9	
L*	-	89.35	93.23	93.93	94.36	94.95
A*	-	-1.28	-2.33	-2.10	-2.01	-2.35
B*	-	14.75	13.07	11.11	10.52	9.26
COST (ADDED) (\$ CAN)		28.52	39.96	51.79	75.45	
COST (CONS.) (\$ CAN)		25.11	22.35	19.20	19.55	
COST (FRESH) (\$ CAN)						

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.2	67.7	71.5	73.0	74.9	
L*	-	89.16	92.84	93.10	93.62	93.75
A*	-	-1.08	-4.03	-2.28	-2.11	-2.43
B*	-	14.33	13.17	10.27	9.84	8.25
COST (ADDED) (\$ CAN)		28.52	39.96	51.79	75.45	
COST (CONS.) (\$ CAN)		25.11	22.35	19.20	19.55	
COST (FRESH) (\$ CAN)						

HYMAC LTD - BLEACHING

WOOD	LOBLOLLY PINE	EXP. NO. :	254		
CODE	CP2-3	DATE	: 22/09/98	175	
STAGE	1 (H)				

CHEMICALS AND CONDITIONS

Na ₂ SiO ₃	%				
MgSO ₄	%				
NaOH	%				
D.T.P.A.	%	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ ADDED	%				
NaBH ₄	%				
Na ₂ S ₂ O ₄	%	0.25	0.5	1.0	1.5
Na ₂ SO ₃	%				
DRY PULP	g	10	10	10	10
CONSISTENCY	%	5.0	5.0	5.0	5.0
TEMPERATURE	°C	60	60	60	60
RETENTION TIME	hr.	0.5	0.5	0.5	0.5
pH (INITIAL)	-	5.5	5.5	5.5	5.5
pH (FINAL)	-	6.1	5.5	4.9	4.5
pH (NEUTRALISATION)	-				

H₂O₂ (RES.) (g/100 g DD)H₂O₂ (CONS.) (g/100 g DD)H₂O₂ (FRESH) (g/100 g DD)

OPTICAL PROPERTIES AND BLEACHING COSTS

BEFORE REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.3	60.4	62.3	62.5	63.1	
L*	-	89.35	90.73	91.01	91.10	91.05
A*	-	-1.28	-0.98	-1.48	-1.01	-1.44
B*	-	14.75	15.90	14.79	14.76	14.31
COST (ADDED) (\$ CAN)		9.57	14.82	25.32	35.82	
COST (CONS.) (\$ CAN)						
COST (FRESH) (\$ CAN)						

AFTER REVERSION :

BRIGHTNESS (ISO-457nm) %	59.2	60.4	61.5	62.3	62.4	
L*	-	89.16	89.86	90.28	90.51	90.41
A*	-	-1.08	-1.27	-1.82	-1.73	-1.89
B*	-	14.33	14.58	13.90	14.01	13.67
COST (ADDED) (\$ CAN)		9.57	14.82	25.32	35.82	
COST (CONS.) (\$ CAN)						
COST (FRESH) (\$ CAN)						

ANNEXE D

COMPARISON OF LOBLOLLY PINE MECHANICAL AND CHEMI-MECHANICAL PULPING PROCESSES; PULP PROPERTIES, PROCESS FEATURES AND PULP PRODUCTION COSTS.

S. Janknecht, S. Dessureault and M.C. Barbe

HYMAC LTD
1867 Berlier St
Laval, Quebec
Canada H7L 3S4

ABSTRACT

The intrinsic fiber characteristics and chemical composition of loblolly pine and other softwoods are compared. Properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP pulps from loblolly pine were obtained and are presented. These are discussed with reference to TMP and CTMP pulps of a Spruce/Balsam mixture. The results are rationalized in terms of the fiber characteristics of the wood species and the refining mechanism involved for each process. As most of the technology for mechanical and chemi-mechanical pulping has been developed for spruce and balsam, we subsequently review and discuss the special process features that are required with loblolly pine. Process flow diagrams are proposed, and we compare end-product quality, impact on effluents and the estimated production cost of each pulp for its potential use in the manufacture of newsprint and other printing and writing grades. The pulp production costs were evaluated using the modular computer system GEMS combined with a spreadsheet in which the cost of wood, chemicals, electrical energy (heat recovery) effluent treatment, labour, supplies, administration and the capital cost of the equipment are involved.

KEY WORDS

Mechanical pulping, chemi-mechanical pulping, *pinus taeda*, *picea mariana*, *abies balsamea*, pulp properties, paper properties, process variables, production, costs, environment, BOD, COD.

INTRODUCTION

Mechanical and chemi-mechanical pulping processes offer several advantages from an environmental point of view when compared with fully bleached Kraft pulp or other chemical pulps; (1) the pulp yield is approximately 90% and we, therefore, harvest half the trees; (2) we use about 25% of the fresh water of a Kraft mill; (3) no chlorinated by-products are produced, which are either present in the mill effluent or in the pulp; (4) there is no, or little, odour emission and (5) the plants do not contribute to acid rain, because there is little, or no, sulfur emission.

The growth in capacity of refiner based pulp world wide has therefore, been

phenomenal over the last decade. With this growth new technologies have also emerged rapidly. Today, 14 mechanical and chemi-mechanical pulping process alternatives are currently commercially used for hardwoods and softwoods. (1) Simultaneously, with the development of these processes several innovations were made at the level of the machinery and equipment used in high yield pulping: (1) single rotating disc refiners of robust construction with dynamic stability and rotor stiffness for highest pulp quality and uniformity, (2) tandem feeding arrangement for maximum heat recovery, (3) high compression plug screw feeders for effective delamination of the chips and higher liquor absorption/extraction, (4) tandem disc refiners with two independent zones of robust and symmetrical construction for high pulp quality and uniformity, (5) displacement washing screw presses, (6) etc. The development, and the implementation of these new technologies, has been driven by four principal factors: improvements in the quality of the paper products manufactured, increases in production with reductions in pulp production costs, compliance with government legislation (i.e. environmental regulations) and the use of new wood resources, such as aspen for the production of BCTMP (1).

Historically, most of the technology for mechanical and chemi-mechanical pulping has been developed in countries where electrical energy is available at low cost and where the fiber resources, e.g. spruce and balsam (*picea mariana* and *abies balsamea*) are recognized as being well suited for paper making. As pines are notorious for giving inferior pulp quality, due to their intrinsic fiber characteristics and chemical composition, we have been dedicating our research efforts over the last 5 years to reviewing the merit of some currently used high yield pulping technologies to develop the pine fibers for extending their use, or improving their quality, for the production of newsprint and other printing and writing grades. Several studies were reported in the area of mechanical and chemi-mechanical pulping and pulp bleaching of various pine species; pulp quality data were reported for mechanical and chemi-mechanical jack pine (*pinus bankisiana* lamb) pulps, caribbean pine (*pinus caribaea*) and loblolly pine (*pinus taeda*): TMP (2,4,7,8), RMP (4,7,8), CTMP (3-5,7-9), OPCR interstage treated pulps (5,7,9). Pulp bleaching results with sodium hydrosulfite and hydrogen peroxide were also reported for the same wood species (6,10) and in one study we have reported, screw press washing efficiency results of a southern pine CTMP pulp. (11)

The purpose of this paper is to review and compare, in terms of pulp quality, the impact on effluents and pulp production costs, the mechanical and chemi-mechanical pulping processes which can be potentially used for Loblolly pine. First, we compare

TABLE 1. FIBRE CHARACTERISTICS AND CHEMICAL COMPOSITION OF DIFFERENT WOOD SPECIES (12-18)

Species	<u>Black Spruce</u>	<u>White Spruce</u>	<u>Balsam Fir</u>	<u>Jack Pine</u>	<u>Lodgepole Pine</u>	<u>Ponderosa Pine</u>	<u>Loblolly Pine</u>	<u>Slash Pine</u>	<u>Pinus Radiata</u>	<u>Caribbean Pine</u>
Fibre length (mm)	3.5	3.3	3.5	3.5	3.1	3.6	3.6	4.2	4.0	2.6-3.9
Width (micro m)	25-30	25-30	30-40	28-40	35-45	35-45	35-45	-	35-45	40-50
Coarseness (mg/100m)	16-29	-	25.0	27-40	23.0	26-46	30-56	29-67	-	-
Cell wall thickness (um)	2.2	2.4	2.5	2.5-2.9	3.0	2.4	3.3	4.2	3.0	6.0-7.1
Specific gravity o.d. (g/cm ³)	0.45	0.42	0.37	0.46	0.43	0.42	0.54	0.66	0.43	0.33-0.68
Lignin (%)	27.6	29.4	29.4	28.3	27.7	35.6	28.6	26.8	28.9	26.2-31.2
Alpha-cellulose(%)	48.6	42.6	49.4	45.2	45.7	37.4	44.5	47.3	-	40.4
Hemicellulose (%)	17.4	-	15.4	16.2	-	-	15.3	-	-	-
Pentosans (%)	10.0	4.8	6.4	11.5	12.3	9.4	12.5	10.0	10.8	9.6-14.2
Solubility in										
Alcohol- /benzene (%)	2.2	2.0	2.5	4.0-4.2	3.5	4.4-5.0	3.2-5.4	3.4-6.0	5.4	4.2
Ether (%)	0.9-1.2	1.4	0.2-1.8	2.5-4.3	2.8	4.8-5.0	2.4-2.8	1.4-5.1	-	-
Hot water (%)	2.1	2.6	3.6	3.1	-	5.0	3.8	3.9	-	-

the intrinsic fiber characteristics and chemical composition of various pines and other softwood species such as spruce and balsam. Then pulp and paper properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP pulps of loblolly pines are reported as a function of refining energy and freeness. These are discussed with reference to TMP and CTMP pulps of a spruce/balsam mixture. We then, rationalize the properties obtained in terms of the basic refining mechanism involved and use as reference TMP pulps of a spruce/balsam mixture. As most of the technology for these pulping processes has been developed for spruce and balsam, we then review and discuss the special process features that are required with pines for the production of optimum pulp quality and uniformity. Process flow diagrams are proposed for each of the pulping processes and we compare end-product quality, impact on effluents and the pulp production costs for each process. The processes were evaluated using the modular computer system GEMS, combined with a spreadsheet to calculate the total pulp production costs. The costs of wood, chemicals, electrical energy (heat recovery), effluent treatment, labour, supplies, administration and capital equipment are taken into consideration in the evaluation.

The capital cost figures are for greenfield mill installations. Pulp production costs were evaluated for Eastern Canada and Southern USA.

FIBER CHARACTERISTICS AND CHEMICAL COMPOSITION OF LOBLOLLY PINE

Table 1 compares the fiber characteristics and chemical composition of different wood species. Black spruce, white spruce and balsam fir are the preferred Canadian softwood species for papermaking. Jack pine is a most important wood species, coming second to black spruce in Canada. In the southern USA, loblolly pine is the most abundant pine species being half of the total volume of all pine present. The pines listed are found in other parts of the world.

The tracheids of pine have an average length of 3.6 mm and a diameter of 35 to 45 um. They are comparable in this respect to spruce and balsam fir tracheids. The notorious peculiarity of pine, however, is its thick cell wall and high coarseness. Both of these properties vary with wood age and density, but on the average, pine compared with spruce and balsam has greater cell wall thickness. Pine fibers are,

TABLE 2. COMPARISON OF MECHANICAL AND CHEMI-MECHANICAL PULPS

WOOD SPECIES	SPRUCE/BALSAM (<i>Picea mariana/abies balsam.</i>)		LOBLOLLY PINE (<i>Pinus taeda</i>)				
	PROCESS	TMP	CTMP	RMP	TMP	CTMP	SCMP
CSF (ml.)	150	150		100	100	100	100
Sulfite charge (%)	-	3		-	-	6	18
Sulfonate content (mmole HSO ₃ /kg)	-	46		-	-	61	93
Refining energy (kWh/ADMT)	1730	2050		1970	2140	2560	2070
Fibre length (mm)	1.20	1.33		1.10	1.19	1.27	1.38
Pulpmill shives (%)	0.63	0.20		1.1	0.3	0.0	0.0
Bulk (cm ³ /g)	2.92	2.84		3.83	3.37	3.64	3.06
Breaking length (km)	3.68	4.11		2.56	3.25	3.60	4.25
Stretch (%)	2.44	2.85		1.75	2.16	2.50	2.37
Burst index (kPa.m ² /g)	2.41	2.82		1.38	1.79	2.04	2.25
Tear index (mN.m ² /g)	9.5	10.1		6.6	9.2	9.20	9.2
Runnability index * (J/g)	4.78	5.34		3.00	4.05	4.33	4.55
Scattering coeff. (cm ² /g)	602	539		560	512	490	436
Absorption coeff. (cm ² /g)	35.0	28.7		31.0	33.0	27.0	28.4
Brightness (%)	57.5	59.6		55.5	53.7	57.7	56.0
Printing opacity (%)	95.5	94.2		94.9	94.2	92.8	91.8

* Runnability index = $\sqrt{(\text{burst index} \times \text{tear index})}$

therefore, more rigid or stiff and require greater chemical treatment and/or mechanical treatment to collapse and confer adequate strength to the sheet. It has been reported that, in North America, wood species from the north (black spruce, white spruce, balsam fir, jack pine,...) have an average coarseness of 35.4 mg/100 m while species from the south (southern pine) have an average coarseness of 62.3 mg/100 m (15). Southern pine also has a high ratio of summer wood fibers to spring fibers. The spring fibers have a thin cell wall which is comparable to spruce. Summer fibers constitute 60 to 75% of the fibers in pine (16). The specific gravity of pine also reflects the high proportion of summer fibers in pine.

Another notorious peculiarity of pine is the high level of resinous materials soluble in organic solvents such as alcohol-benzene, ether or dichloromethane (DCM). The use of pine often leads to pitch problems in the mill. As many pine species grow in tropical countries where climatic conditions are favorable to the growth of fungi and bacteria, the production of these resinous materials containing fungicide agents constitutes a protection mechanism ensuring

the tree's survival and growth. In Canada, jack pine is a major wood species of silviculture programs. It grows at a faster rate and offers greater site tolerance and disease resistance than the other conifers. This is one of the reasons why in many areas of the world, *pinus radiata* and *pinus caribaea* have been the favored species of man made plantations.

COMPARISON OF PULP AND PAPER PROPERTIES

Pulp and paper properties of mechanical and chemi-mechanical pulps are highly dependent on the fiber characteristics and the wood chemical composition of the species.

In Table 2 TMP and CTMP pulp quality data is compared for a mixture of spruce/balsam with loblolly pine. From these results, the inferior pulp quality of pine can be appreciated. Pine pulps of low freeness must be produced so that fibers may be adequately developed to generate a sheet with properties comparable to spruce/balsam. TMP and CTMP pulps of spruce/balsam have a greater strength compared to TMP and CTMP loblolly pine pulps; the properties of the spruce/balsam pulps of higher freeness (e.g. 150 ml CSF) are superior to the properties of

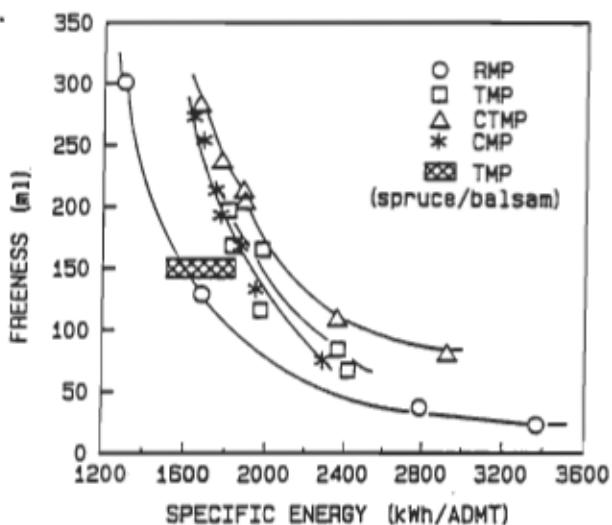


Figure 1. Freeness-energy relationship for RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps. In this figure and subsequent figures the shaded area represents the range obtained for TMP spruce/balsam pulps from Eastern Canada.

the loblolly pine pulps of lower freeness (e.g. 100 ml CSF). The net result, therefore, is that appreciably more refining energy (between 15 and 30%) is required for pine than for spruce/balsam.

As it can be observed from Table 2, the different mechanical and chemi-mechanical pulping processes currently used commercially, develop pine fibers in different ways and, therefore, give rise to different pulp and paper properties. Figures 1 to 6 compare the pulp and paper properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps as a function of specific refining energy and pulp freeness. These pulps may find different uses in the production of newsprint and other paper grades.

It can be observed that RMP pulps can be produced at a given freeness level with low refining energies compared to TMP (Figure 1). The fibers are short (Figure 2) while shives (Figure 2) and bulk (Figure 3) are high. RMP pulps of low strength (Figure 4) but of high scattering coefficient, brightness and opacity, (Figure 5) can be produced for groundwood replacement for newsprint manufacture.

Thermomechanical pulps (TMP) of greater strength can be produced with 10 to 15% more refining energy compared to RMP (Figure 1). Fiber length is improved (Figure 2) because with the presteaming of wood chips, the

lignin in the middle lamella is softened and fiber separation occurs with less fiber damage and debris; bulk is reduced (Figure 1) and strength properties (breaking length, stretch, burst and tear index) are enhanced (Figure 4). Scattering coefficient is, however, lower compared to RMP (Figure 5). With high pretreatment temperatures the absorption coefficient increases and the pulp brightness is reduced. We have found and reported in previous studies (2-4) that pretreatment temperatures above 128°C had only marginal affects on pulp strength but reduced pulp brightness appreciably.

In CTMP pulping, sodium sulfite has three main effects: (a) a reduction of the elastic shear modulus of the wood chips, (b) an increase in fiber flexibility and (c) a chemical modification of lignin and extractives. Reduction of the wood elastic shear modulus, and the degradation of lignin, result in a better fiber separation in the middle lamella which leads to increased fiber length and fiber flexibility with lower mechanical fibrillation (Figures 2 and 3). Therefore, CTMP pulps require greater amounts of refining energy to reach a given freeness level compared to TMP. (10-15%) (Figure 1) There are also fewer rejects and fines in the pulp. The changes in fiber characteristics have different effects on the subsequent pulp and paper properties. Improvements in breaking length, stretch, burst index and tear index are observed (Figure 4). The optical properties are also affected; the light absorption coefficient, the light scattering coefficient and the opacity are lowered while the ISO brightness is improved (Figure 5).

With more severe chemical treatment of wood chips with sodium sulfite, such as in the SCMP pulping process, appreciably longer fibers are produced with less fines and shives (Figure 2). Because the fibers are also substantially more flexible, the freeness-energy relationship is shifted to lower refining energy values (Figure 1). High strength properties (breaking length, stretch, burst index and tear index) are obtained (Figure 4). The pulp, however, has low scattering coefficient and opacity (Figure 5).

BLEACHING RESPONSE OF PULPS

Considering the use of loblolly pine mechanical and chemi-mechanical pulps in specialty grades, we have bleached all of the pulp types with hydrogen peroxide in one stage. The brightness curves as a function of the charge of peroxide added and consumed are shown in Figure 6. It can be observed that the initial brightness of the RMP pulp is superior to the TMP pulp. Chip presteaming increases strength properties, but reduces the pulp brightness by ~2.6 points. This difference in pulp brightness remains after bleaching with peroxide. The initial brightness of CTMP pulps is superior

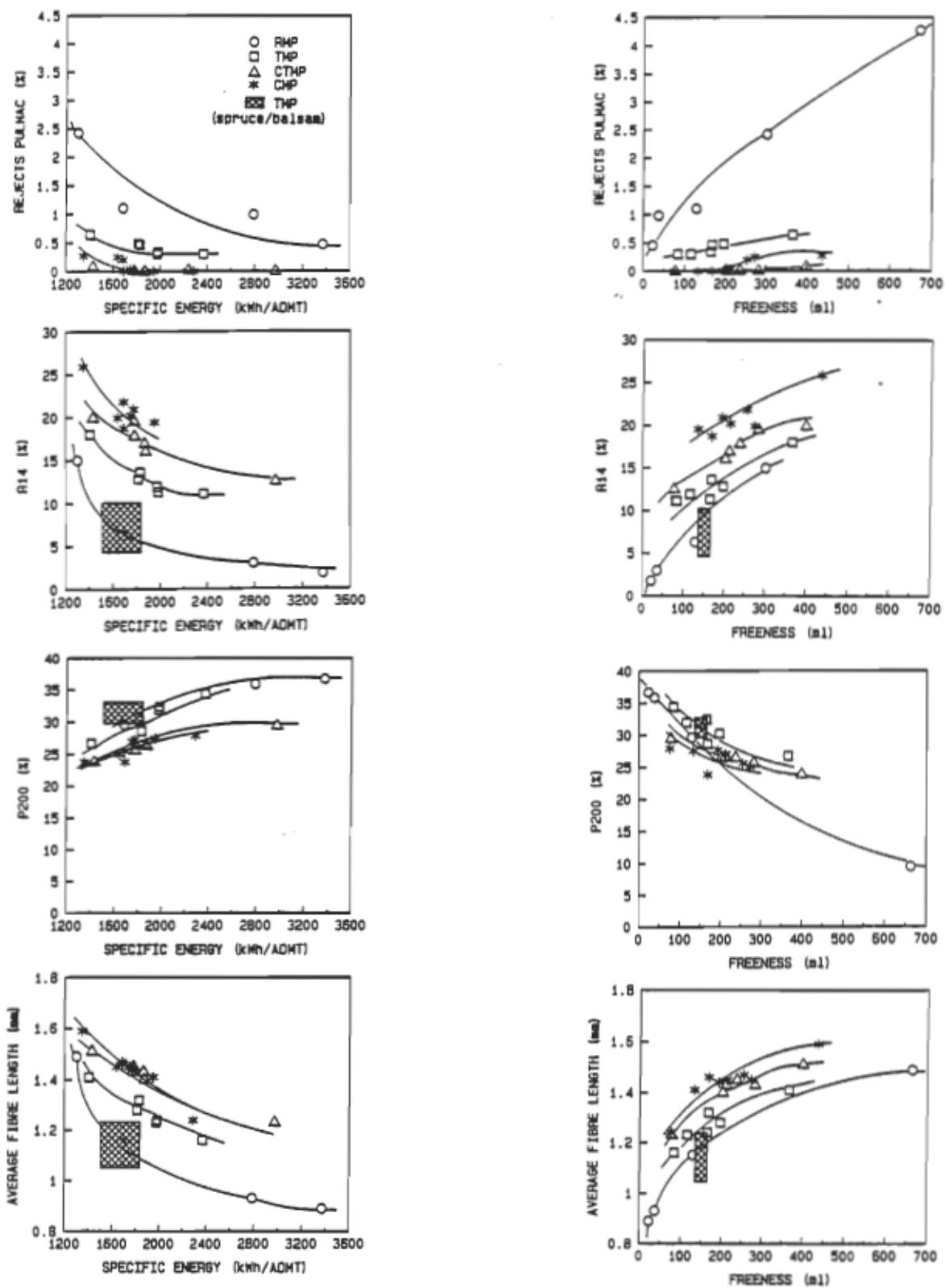


Figure 2. Pulp properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps as a function of total specific energy and freeness.

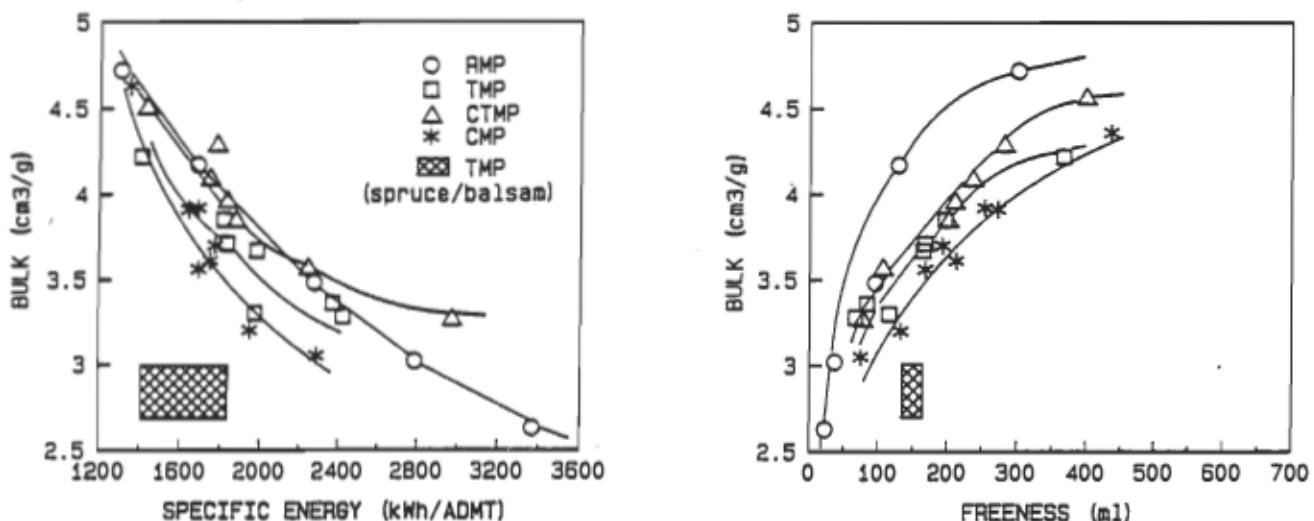


Figure 3. Dry sheet bulk of RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps as a function of total specific energy and freeness.

to TMP. The sodium sulfite, used in the preheater, chemically modifies chromophoric groups of the lignin and bleaches the pulp. Therefore, higher brightness values can be obtained with CTMP pulps compared with TMP and SCMP pulps at a given peroxide charge. Higher maximum brightness values are also obtained. It is interesting to note that the bleaching response of RMP and CTMP pulps are similar. This points to the need of properly controlled wood pretreatment conditions to avoid pulp darkening at high temperature and/or to effectively use sodium sulfite as a prebleaching agent. The lower initial pulp brightness of the SCMP pulp is due to the low scattering coefficient of the pulp.

When comparing CTMP loblolly pine pulps with CTMP spruce/balsam pulps, it can be observed that a higher peroxide charge is required to bleach the loblolly pine at a given brightness level. Therefore, the residual peroxide (i.e. the difference between the peroxide added and consumed) is more appreciable for loblolly pine compared with spruce/balsam so that important benefits can be obtained in recovering and reusing this unreacted or residual peroxide when bleaching loblolly pine pulps.

PULPING PROCESS COMPARISON USING COMPUTER SIMULATION

Pulping process description

Figure 7 shows a schematic representation of mechanical and chemi-mechanical pulping processes with their sub-systems. In our comparison of these processes, certain sub-systems are common to all of the processes that we have evaluated (e.g. chip washing, pulp screening, cleaning

and thickening, and the one-stage peroxide bleaching system) while special features have been introduced in all, in view of the special characteristics of pine.

Figure 8 represents the process flow diagram of the chip washing sub-system. It is composed of a chip washer, drainer, side hill screen and a grit settling tank. A closed white water recirculation loop minimizes the amount of fresh water used. In addition a presteaming bin serves the dual purpose of retaining the chips as well as allowing the removal of ice and snow in the winter to improve chip washing.

Also common is a separate screening and cleaning system for the main line and the rejects (long fibers) as shown in Figure 9. The main line screening and cleaning system is composed of a primary screen with three-stage cleaning in cascade. The reject line screening and cleaning is composed of a reject screen with four-stage cleaning. The accepts from the third and fourth stages are recirculated to the reject refiner as well as the rejects from the reject screen. The rejects from fourth-stage cleaners are sent to a sewer. This screening and cleaning system allows for achieving the highest pulp quality and uniformity. The unrefined rejects are sent to a side hill screen where they are thickened to a consistency of 3 to 4% before the screw press which feeds the rejects refiner. The accepts pulp from the rejects and main lines are sent to the disc filter where it is thickened to about 10-12% consistency.

The last common feature to each pulping process is the bleaching system. A process flow diagram of a low cost single-stage

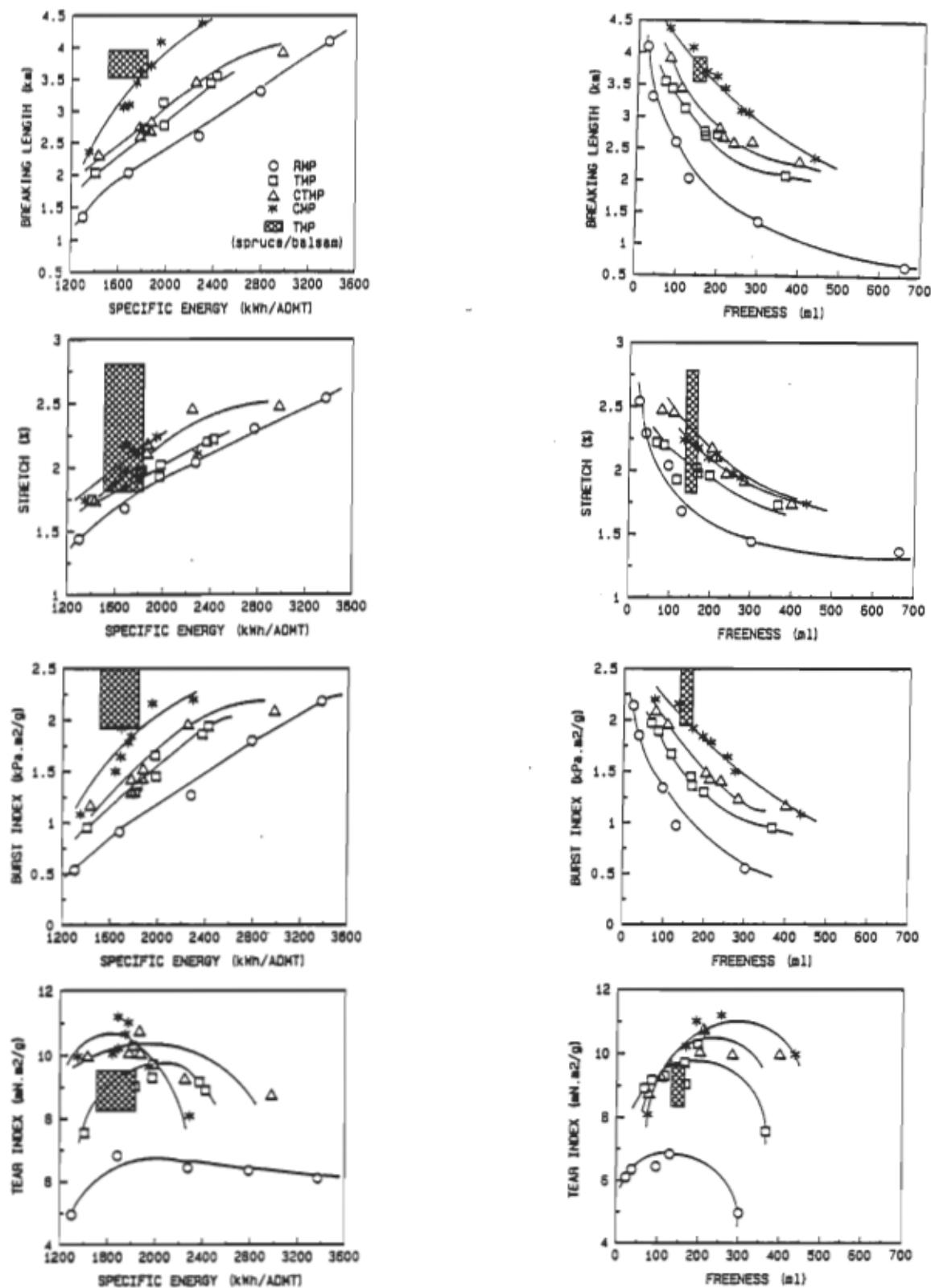


Figure 4. Dry sheet strength properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps as a function of total specific energy and freeness.

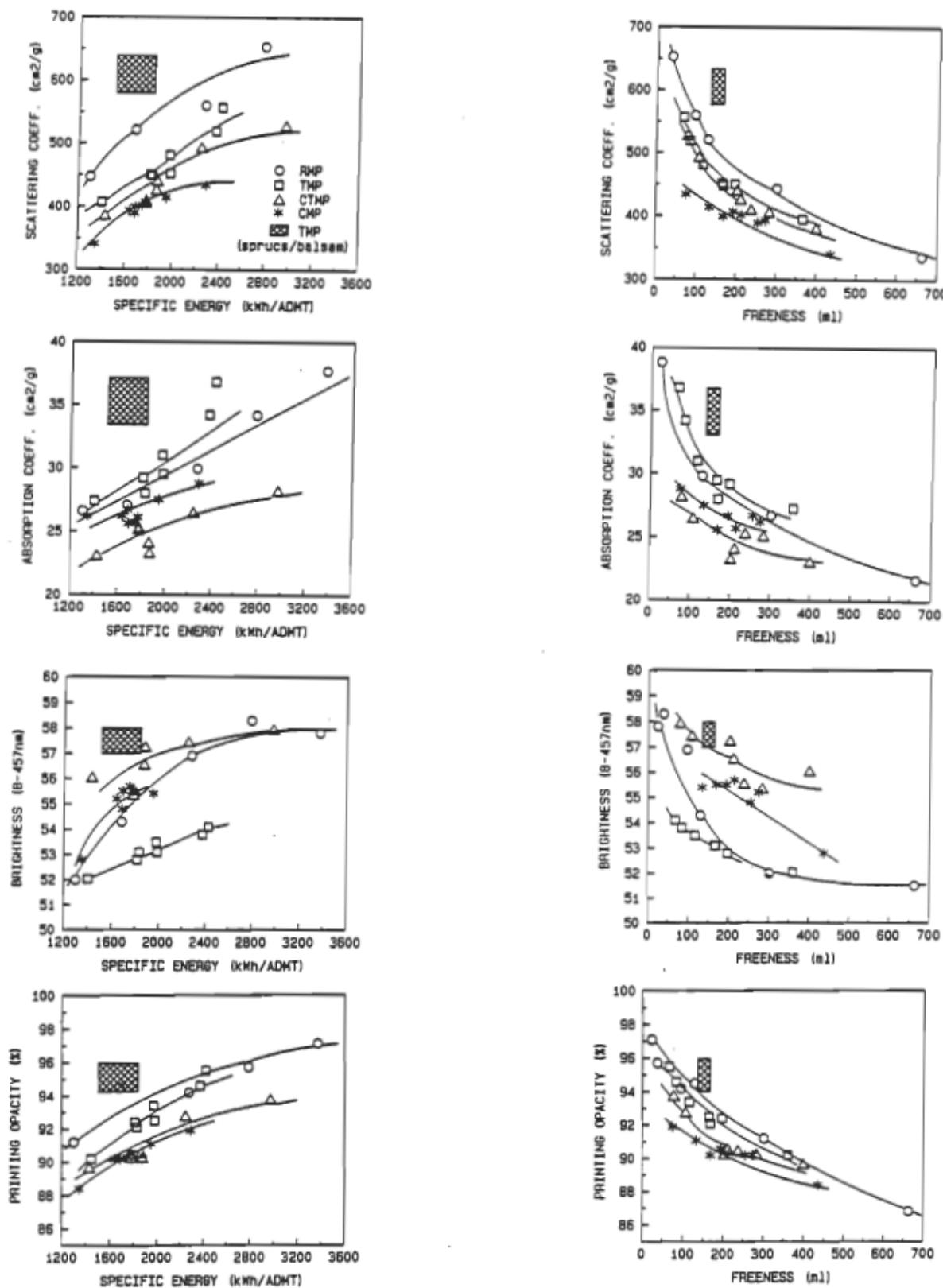


Figure 5. Optical properties of RMP, TMP, CTMP and SCMP loblolly pine pulps as a function of total specific energy and freeness. (standard sheets of 60 g/m²)

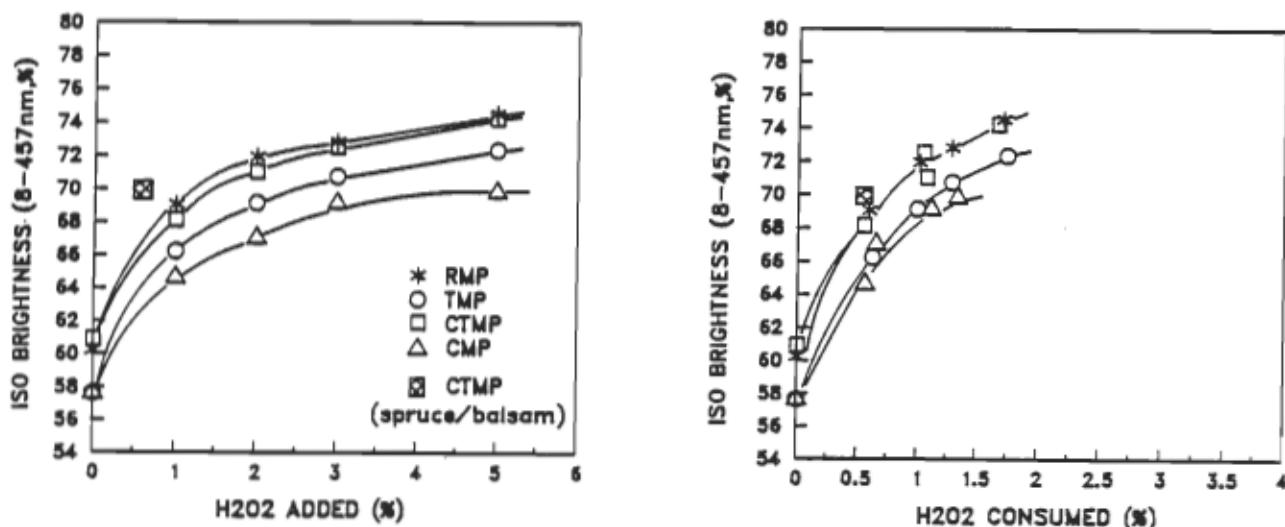


Figure 6. Bleaching response of mechanical and chemi-mechanical loblolly pine pulps.

peroxide bleach plant with recovery of the residual peroxide with a counter-current washing strategy is shown in Figure 10. In this process, the bleaching reaction proceeds at a medium consistency of 10-12% and at a temperature of 70°C in a 90 minutes retention time tower. The press at the inlet of the plant removes dissolved solids, some of the extractives that are appreciable in loblolly pine as well as the sodium sulfite and metal ions coming down stream from the refiner pulping plant. The press at the outlet of the bleach plant allows for the recovery of some of the residual peroxide which contains, however, saponified extractives that are produced upon oxidative reactions at high pH levels. With the counter-current washing approach, the filtrate from the presses is sent upstream to react with the sodium sulfite from the refiner plant as well as with the extractives. The white-water of the plant is ultimately sent to the effluent treatment plant from the chip washing system or from the interstage washing presses. The bleach plant, therefore, constitutes a system which allows for removal of pitch and extractives of loblolly pine in the paper mill and insures that product quality is met. This white water recirculation strategy will prevent pitch, linting/dusting problems, and potential paper machine runnability problems as well as avoid the decrease in pulp brightness associated with the use of alum in the white water circuit of the machine as demonstrated in a previous study. (6)

Special features have also been introduced in all pulping processes in view of the special characteristics of pine, i.e. the high fiber coarseness, cell wall thickness and high extractives content.

As pine refiner pulping requires more refining energy than other softwood species, such as black spruce and balsam fir, it is preferable to apply this total energy over multiple refining stages and at high consistency, so as to maintain an adequate plate gap and preserve the fiber length. A high reject rate (50%) composed of non fibrillated long fibers sent to the rejects refiner is, therefore, a good strategy to improve the pine pulp quality. With the high reject rate involved in pine pulping, reject refining is, therefore, of capital importance. It is essential to keep the reject refining uninterrupted. The proposed flowsheets for each process alternatives are such that one of the secondary refiners may be converted to a reject refiner when the actual reject refiner is shut down for maintenance. To facilitate the operation of the system it is, therefore, desirable to pressurize the reject refining stage. This flexibility ensures the production of a constant and uniform pulp quality. As heat recovery is required to reduce the pulp production cost, the whole refiner plant is pressurized.

Figures 11 to 14 illustrate the main components of the mechanical and chemi-mechanical process flow diagrams evaluated in the present study.

Pressurized refiner mechanical pulping process (PRMP)

Figure 11 represents the flowsheet of a PRMP process. After washing, the chips are heated to 90°C in the surge bin. The steam addition is sufficient to bring the temperature of the chips to nearly the glass

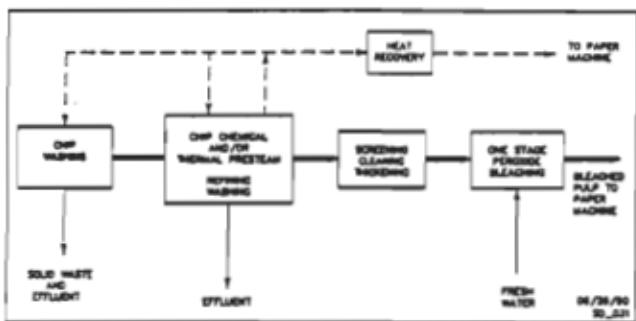


Figure 7. Schematic representation of the mechanical and chemi-mechanical pulping processes. Each block represents a sub-system.

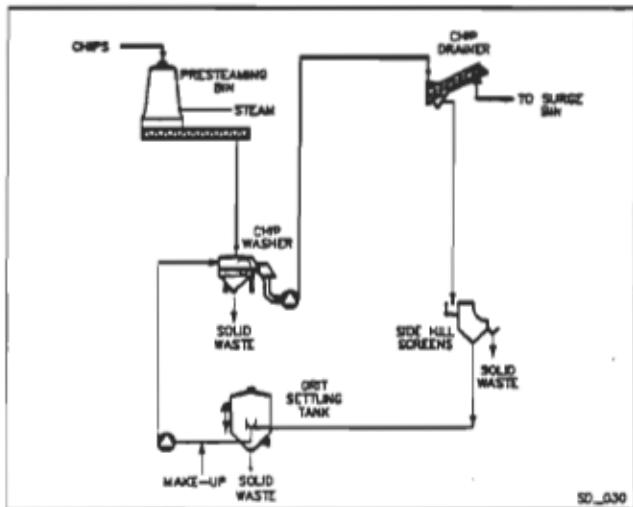


Figure 8. Process flow diagram for the chip washing system.

transition temperature of the moist lignin. This step also prevents the damage of chips in the plug screw feeder while the chips are compressed. The unit removes some extractives, metal ions and dissolved solids, prior to the primary refiner, as well as allowing for pressurized refining for recovery of the steam. After the primary refiner, the pulp is blown to the secondary refiner. This tandem refining allows for optimum heat recovery of the system. From the secondary refiner, the pulp is blown to a pressurized cyclone where the steam is recovered prior to discharging to the latency chest.

Thermomechanical pulping process (TMP)

Figure 12 represents the process flow diagram for TMP pulping. A preheater

increases the temperature of the chips prior to refining. The addition of a plug screw feeder, between the preheater and the inlet of the first stage refiner, allows for optimum heat recovery from the refining process, as well as preserving the pulp brightness since the unit isolates the refining operation from the preheating. This is critically important for pines that contain high levels of extractives. The plug screw feeder also removes extractives and dissolved solids. The arrangement shown in Figure 12 ensures adequate pulp quality, as well as low operating cost. High pressure and high consistency refining increases the efficiency of heat recovery.

Chemi-thermomechanical pulping process (CTMP)

Figure 13 shows the process flow diagram of the CTMP pulping system investigated. In a previous study (19), four chemi-thermomechanical pulping process alternatives were compared and it was demonstrated that the CTMP pulp produced, following the process flow diagram of Figure 13, had the lowest production cost with the least amount of extractives in the pulp. The main features of this CTMP process are the addition of sodium sulfite and the interstage washing of the pulp. The CTMP process starts with the impregnation of the wood chips with sodium sulfite liquor, using a high compression plug screw feeder. The unit increases the specific surface area of the chips by effective delamination of the chips along the grain boundaries, while minimizing fiber cutting across the grain. Effective delamination provides ease in squeezing liquid from the chip interior, as well as ease in impregnating replacement chemical solution back into the chip; therefore, increasing reaction rates and sites available for reaction. The sulfite liquor is added at the base of a vertical impregnator that may also serve as a conveyor to transport the chips into the reaction bin. Steam is added at the base of the bin; lignin sulfonation reactions proceed with some resin saponification. The plug screw feeder, between the reaction bin and the preheater, subsequently extracts these saponified resins, as well as other by-products and the residual sulfite. The plug screw between the preheater and the primary refiner extracts more wood by-products while also ensuring a constant volumetric feed and high consistency to the refiner. In addition, it is isolating the refining operation from the chip thermal pretreatment so as to allow for maximum heat recovery and pulp quality. Finally, the pulp from the primary refiner is blown to a pressurized cyclone which discharges into a transfer chest for interstage washing of the pulp. This is done with a screw press.

Sulfite chemi-thermomechanical pulping process (SCMP)

Figure 14 represents the process flow diagram of the SCMP pulping process. In this

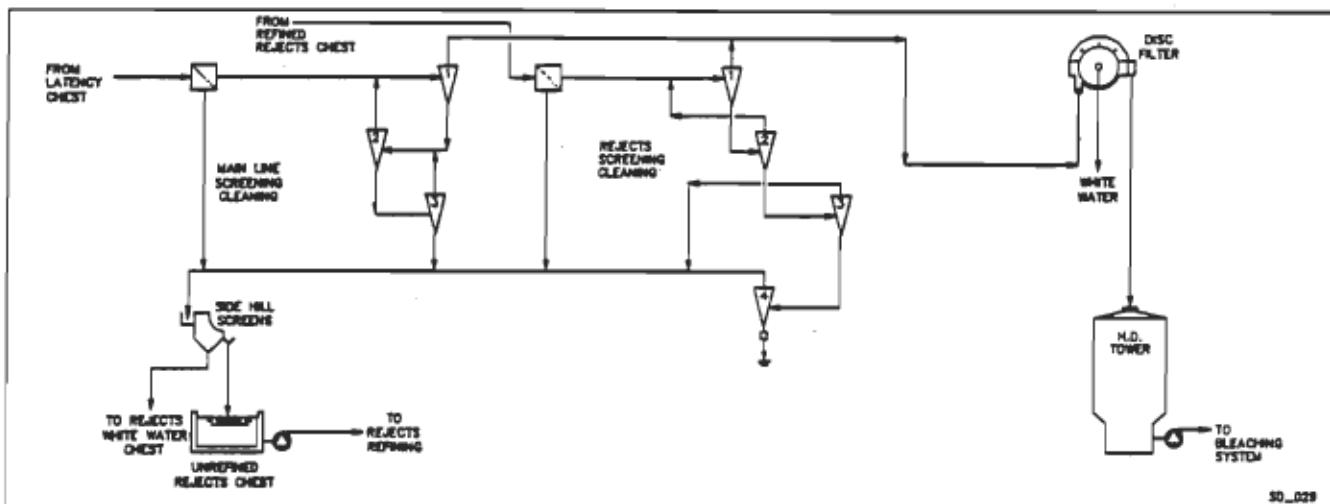


Figure 9. Process flow diagram for pulp screening, cleaning and thickening.

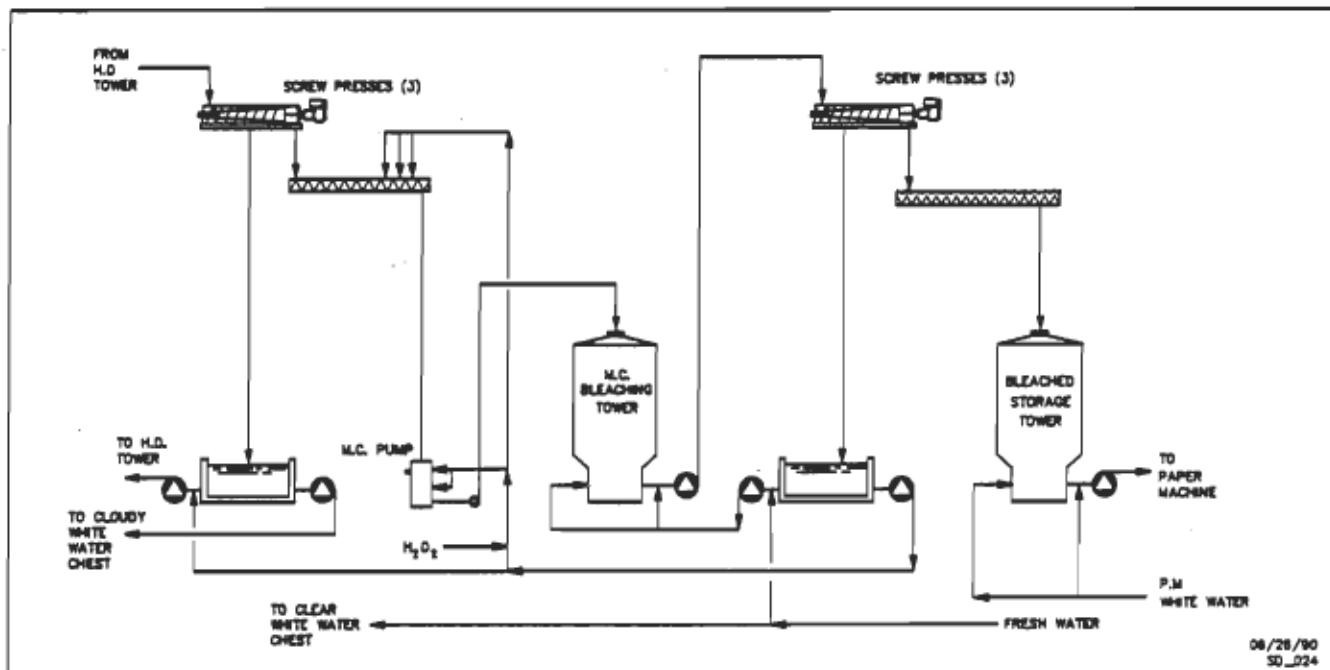


Figure 10. Process flow diagram for the single-stage peroxide bleaching plant with recovery of the residual peroxide and counter-current washing.

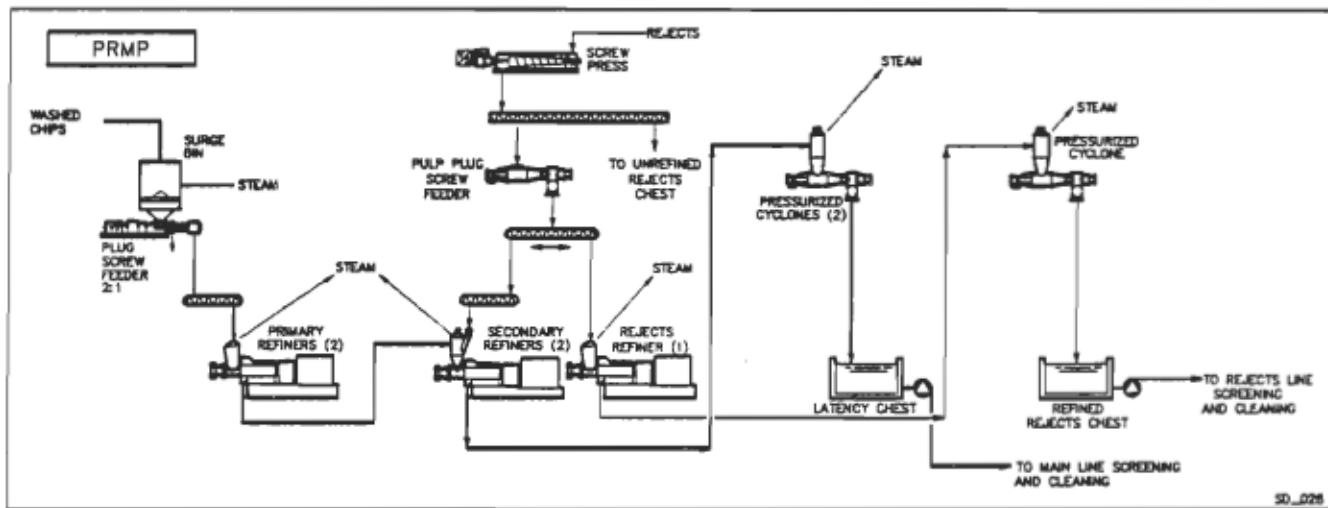


Figure 11. Process flow diagram for the pressurized refiner mechanical pulping (PRMP) process.

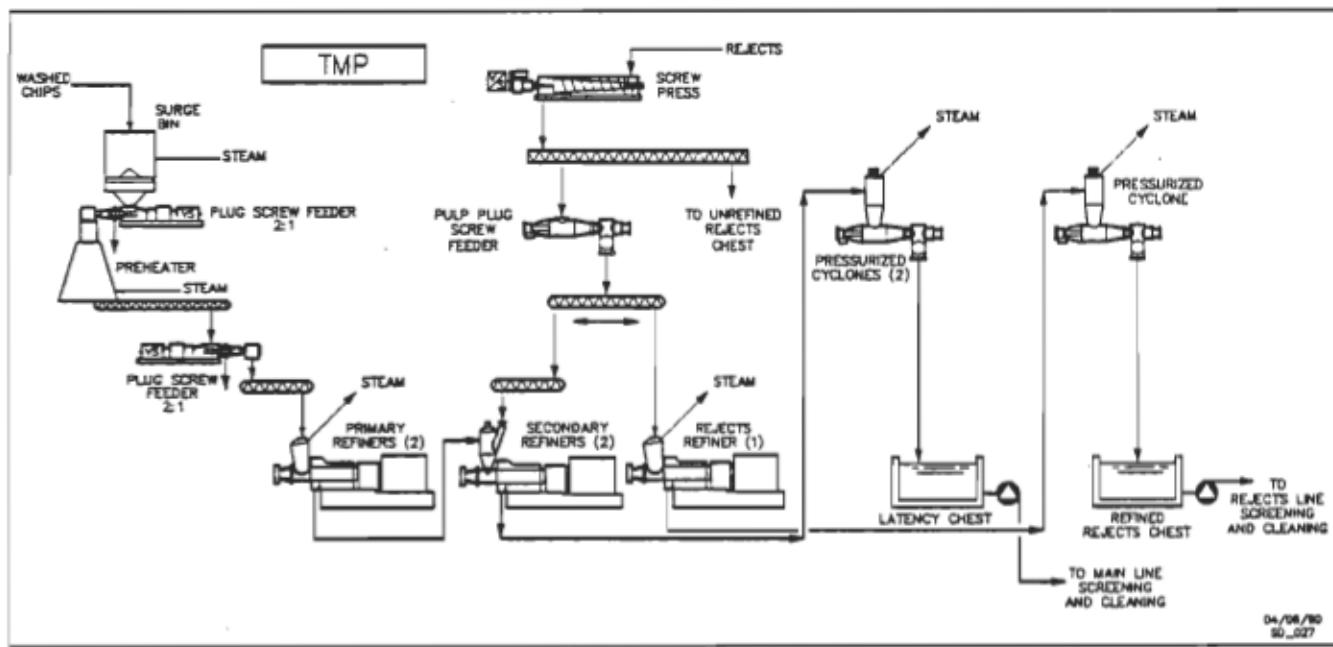


Figure 12. Process flow diagram for the thermomechanical pulping (TMP) process.

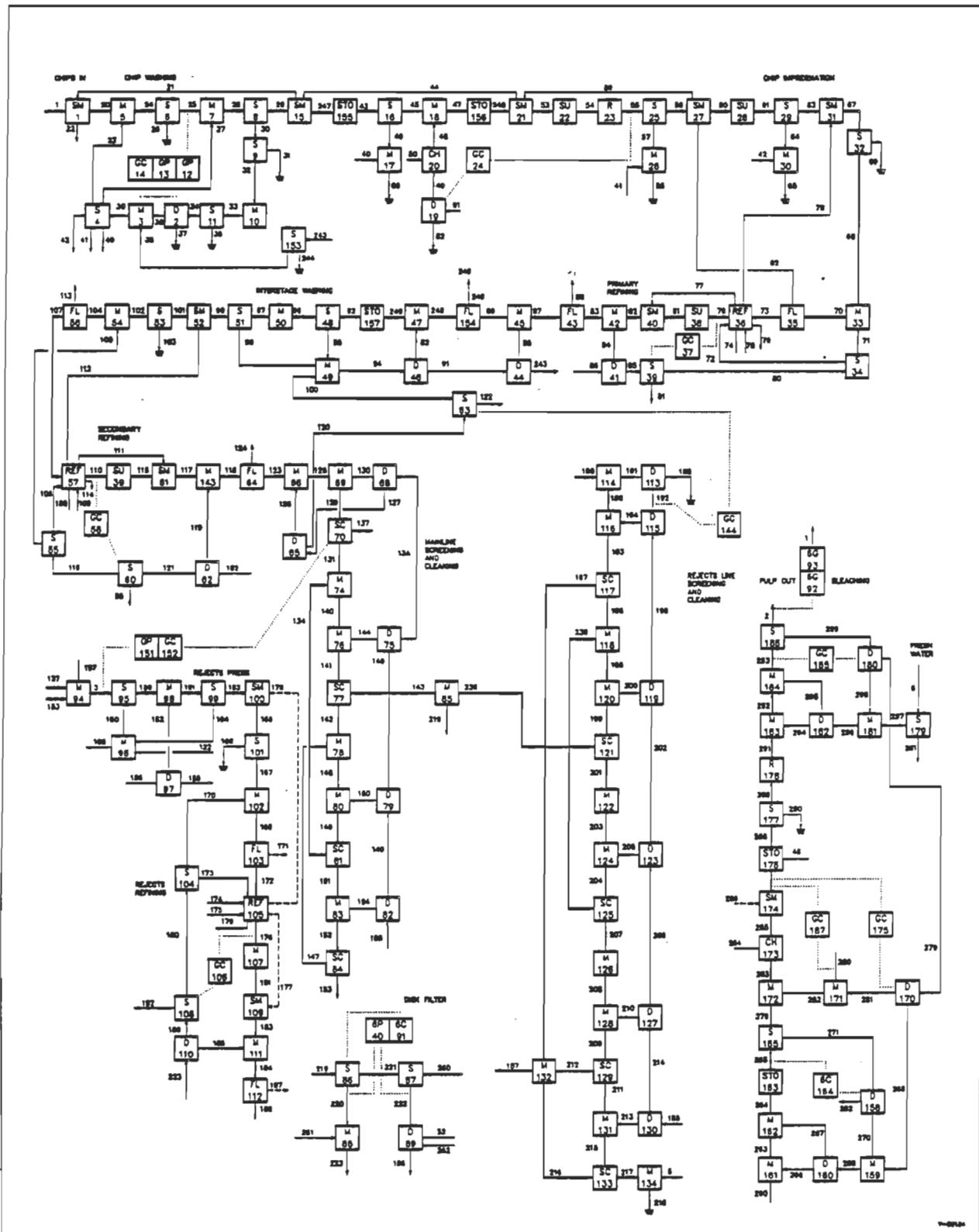


Figure 15. GEMS block diagram for the chemi-thermomechanical pulping (CTMP) process alternative.

TABLE 3. OPERATING CONDITIONS FOR EACH PROCESS ALTERNATIVE EVALUATED

	SPRUCE/BALSAM		LOBLOLLY PINE			
	TMP	CTMP	PRNP	TMP	CTMP	SCNP
Reaction Bin						
Temperature (°C)	-	95	-	-	95	140
Retention Time (min)	-	30	-	-	30	30
Preheater						
Temperature (°C)	115	115	-	115	115	-
Retention Time (min)	3	3	-	3	3	-
Pulping and Bleaching						
Chemicals (70% Iso)						
Sodium Sulfite (%)	-	3.0	-	-	4.0	18.0
DTPA (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Peroxide (%)	1.18	0.61	1.17	2.39	1.45	3.61
Sodium Hydroxide (%)	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
Silicate (%)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Epsom Salt (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Specific Energy (MMh/ODT)	1.92	2.28	2.19	2.38	2.62	2.30
Freeness (ml)	150	150	100	100	100	100
Production (ODT/day)						
Bleached Pulp	605	485	560	500	425	510
Fresh Water (m³/ODT)	15	15	15	15	15	15

TABLE 4. END-PRODUCT QUALITY
(PULP IN BLEACHED STORAGE TOWER)

	SPRUCE/BALSAM		LOBLOLLY PINE			
	TMP	CTMP	PRNP	TMP	CTMP	SCNP
Production (ODT/day)						
Bleached pulp	605	485	560	500	425	510
Fresh Water (m³/ODT)	15	15	15	15	15	15
Sulfonate Content (% 5)	-	0.20	-	-	0.23	0.45
DCM Extractives (%) *	0.26	0.05	0.68	0.58	0.10	0.09
Residual Peroxide (%)	0.07	0.01	0.08	0.24	0.13	0.41
Total Dissolved Solids (%)	1.17	0.78	1.64	1.68	0.98	1.28
Brightness (% Iso)	70	70	70	70	70	70

* DCM Extractives of 4% in wood for loblolly pine and 1.8% for spruce/balsam mixture

TABLE 5. ENVIRONMENTAL DATA

	SPRUCE/BALSAM		LOBLOLLY PINE			
	TMP	CTMP	PRMP	TMP	CTMP	SCMP
Yield (%)	94.7	92.0	95.6	94.7	92.2	91.4
Yield (%) (Including Fibre loss)	92.4	88.5	93.2	92.0	88.3	87.8
Pulp Production (ODT/day)	605	485	560	500	425	510
Bleached Pulp						
Fresh Water (m³/ODT)	-	15	15	15	15	15
Total Mill Effluent						
Temperature (°C)	55	76	56	57	77	78
Volume (m³/ODT)	13.5	13.7	13.2	13.2	13.5	15.6
Suspended Solids (kg/ODT)	17.8	31.4	18.5	21.8	35.3	33.6
COD (kg/ODT)	81	142	87	103	172	195
BOD, (kg/ODT)	36	64	39	46	77	88
Plug Screw Feeder Effluent						
Volume (m³/ODT)	0.8	2.5	0.4	0.9	2.6	2.5
Suspended Solids (kg/ODT)	6.7	10.7	3.3	6.6	10.7	7.1
COD (kg/ODT)	13	53	8	20	77	82
BOD, (kg/ODT)	5	23	4	10	34	37

TABLE 6. ESTIMATED PULP PRODUCTION COSTS (US\$/OUT)

	SPRUCE/BALSAM		LOBLOLLY PINE			
	TMP	CTMP	PRMP	TMP	CTMP	SCMP
Wood	119.03	124.24	64.36	65.24	67.96	68.37
Chemicals						
Impregnation	-	9.18	-	-	12.26	55.68
Bleaching	31.39	26.25	30.62	40.04	32.17	50.64
Total	31.39	35.44	30.62	40.04	44.43	106.32
Electricity						
Refiners	43.07	51.76	111.133	121.06	133.85	118.48
Heat Recovery	(19.60)	(20.55)	(53.70)	(60.11)	(57.73)	(40.82)
Total	23.47	31.21	57.43	60.95	76.12	77.57
Effluent Treatment	7.26	12.79	7.82	9.23	15.45	17.51
Labour	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Supplies	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Adm./Overhead	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
Capital Cost *	85.92	126.05	90.13	103.10	144.40	129.09
TOTAL	334.06	396.72	317.35	345.56	415.36	465.95

* Based on 10% interest rate and amortized on 8 years.

process, the whole impregnation system has been pressurized. Sodium sulfite liquor is added in a pressurized impregnator. A charge of 18% on wood was applied. Sulfonation reaction proceeds in the pressurized reaction bin at a temperature of 140°C for 30 minutes retention time. In this process there are two plug screw feeders prior to refining. Therefore, in the SCMP process, interstage washing becomes critical for removing resinous materials and residual sodium sulfite, as well as dissolved organics in the pulp.

THE COMPUTER SIMULATION SYSTEM

The "General Energy and Material Balance System (GEMS)" (20) was used to compare the process alternatives. Material and energy balance calculations were made for the four processes. GEMS is a modular computer system that entails an executive program linked with a set of process subroutines which model the individual unit operation within the process alternative.

The subroutine to simulate sulfonation reactions is applicable to either chip sulfonation or fiber sulfonation (21-22). The effects of time, temperature, pH, and sulfite concentration on sulfonation and the pulp yield are included in the model.

As an example, we show in Figure 15 the block diagram built for the simulation of the CTMP process alternative. As can be seen, sulfonation reactions were taken into consideration at all stages of the refining process.

The operation conditions for each process alternative evaluated are given in Table 3. For each process alternative, we have used typical retention times, temperatures and sulfite charges. Peroxide bleaching data have been obtained from lab data. Pulp production rates were calculated from the specific energy figures reported in the Table 2 and a constant installed power of 60 MW, a 50% rejects rate (30% for a spruce/balsam mixture) and a 55%, 45% split between the primary and secondary refiners in the main production line. For all processes 15 m³/odt of fresh water was used with a counter-current washing strategy. Fresh water is added in the bleaching system and in the clear white water chest of the disc filter. The sewer points to the effluent treatment plant are at the quaternary cleaner of the rejects screening and cleaning plant, the interstage washing chest and the chip washing system.

COMPUTER SIMULATION RESULTS

End-product quality

Table 4 gives a comparison of end-product quality of bleached pulp to 70% iso at the outlet of the bleaching plant for spruce/balsam TMP and CTMP pulps and the

various pulp types produced with loblolly pine (PRMP, TMP,...). The pulp and white water characteristics reported are: (a) the sulfonate content giving an indication of the potential pulp strength, (b) DCM extractives in pulp which is of importance for sheet strength, brightness, reversion and surface strength, (c) residual peroxide which is of importance for brightness reversion, (d) total dissolved solids which is of importance in the effectiveness of wet-end additives, pulp drainage, wet-web strength and paper machine runnability. (23)

The following conclusions can be derived from the results:

- 1- For a given installed power, the pulp production rate is lower with loblolly pine compared to spruce/balsam (17% for TMP and 12% for CTMP).
- 2- Under chosen typical operating conditions, the SCMP pulp would have a higher sulfonate content than a CTMP loblolly pine pulp is slightly higher than for the spruce/balsam CTMP pulp. We believe that higher charges of sodium sulfite are to be added to loblolly pine chips due to the high coarseness of the fibers. The higher sulfonation, however, does not necessarily lead to superior pulp properties.
- 3- The chemi-mechanical pulping processes (CTMP and SCMP) produce pulps with lower amounts of extractives compared to mechanical pulps (PRMP and TMP).
- 4- The residual peroxide in the pulp in the bleach storage tower is the highest for TMP and SCMP pulps. This indicates that peroxide bleaching plants at higher consistency would be preferred with those processes.
5. Chemi-mechanical bleached pulps (CTMP and SCMP) have a lower dissolved solids content than mechanical pulps (PRMP and TMP). This is mainly due to the presence of interstage washing in these processes.
6. For each process alternative evaluated, lower values of DCM extractives and total dissolved solids would be obtained in the final product, if a greater amount of fresh water was used.

Environmental data

Table 5 gives a comparison of the environmental data for the various pulp types produced with loblolly pine and for TMP and CTMP spruce/balsam pulps.

The following conclusions can be derived from the results:

- 1- The yields reported are those calculated with the GEMS block for the sulfonation of chips, for which the parameters have been set using laboratory and mill results (25). When the fibers that are lost, because of the white water recirculation strategy and selection of the equipment that has been made, are

- incorporated, appreciably lower yields are obtained for each pulping system.
- 2- The temperature of the effluent from a chemi-mechanical process is higher by about 20°C compared to a mechanical process. This is due to the interstage washing of the pulp in the former systems. With moderns aerobic and anaerobic treatment plants, it is common practice to have a heat exchanger to cool the effluent.
 - 3- The suspended solids in the effluent are higher for a chemi-mechanical process mainly because of the presence of an interstage washing stage with screw presses and also because of the presence of a third plug screw feeder for the CTMP process.
 - 4- The BOD and COD load is higher by 75% for spruce/balsam and by 67% for loblolly pine for the CTMP process compared to the TMP process. This is mainly due to the lower yield of the CTMP process.
 - 5- The BOD and COD load for the SCMP process is about 15% higher compared to the CTMP process. This is because a higher charge of sodium sulfite is added (18% compared to 4% for CTMP) and a more severe chip thermal treatment (140°C) is used.
 - 6- In view of more stringent pollution regulations, it has been proposed to treat separately the highly concentrated filtrate from the plug screw feeders. It can be observed from the results of Table 5 that this can be done with the greatest benefit for the chemi-mechanical processes (CTMP and SCMP).

Pulp production costs

Table 6 compares the pulp production costs for spruce/balsam TMP and CTMP pulps of 150 ml CSF and the other pulp types made of loblolly pine at 100 ml CSF. In these calculations, we have used typical North American cost figures for chemicals, effluent treatment, labour, supplies and administration/overhead (24). These are given in Table 7. The wood and electricity costs for Eastern Canada have been used for spruce/balsam pulps while Southern United States costs were used for loblolly pine. We have also incorporated in the calculation, the total capital cost of a greenfield mill. For this, we have calculated the cost of the equipment of each process (as per Figures 6 to 12), and incorporated a factor to include the other costs involved. The total cost was then amortized over an eight-year period at a 10% interest rate.

The following conclusions can be derived from the results of table 6:

- 1- The production cost of PRMP loblolly pine pulp can be inferior to TMP spruce/balsam. The extent of which it is inferior is set by the difference in price between loblolly pine and spruce/balsam chips and the local

- electricity cost in specific regions. It is more expensive to produce a TMP pulp from loblolly pine in the Southern United States than to produce a TMP from spruce/balsam in Eastern Canada. The same observation is also valid for the comparison of CTMP pulp. The major reasons are as follows: (a) the fresh peroxide consumption is higher for loblolly pine than for spruce/balsam, (b) the electricity cost which is higher in Southern United States compared to Eastern Canada, (c) the capital cost per ton of pulp produced is higher for loblolly pine although almost the same equipment is involved. The plant capacity with spruce/balsam chips is higher, (d) the cost of loblolly pine wood chips is lower than spruce/balsam chips.
- 2- The difference in producing SCMP pulps compared to CTMP pulps from loblolly pine is projected to be about \$50./odt. It takes less refining energy for the SCMP process compared to CTMP, and the capital cost per ton of pulp produced is lower, due to the higher production achieved with the SCMP process. The major difference, however, is in the chemical consumption; 18% sodium sulfite for SCMP and 4% for CTMP. Also, 3.6% peroxide is required for SCMP and only 1.5% for CTMP. This represents a difference of -\$62./odt in chemicals between both processes or 23% of the total cost for SCMP and 11% for CTMP. (Figure 16)

TABLE 7. ESTIMATED UNIT COSTS

	<u>Eastern Canada</u>	<u>Southern USA</u>
	<u>Spruce/Balsam</u>	<u>Loblolly Pine</u>
Wood (\$/ODT)	110	60
Pulping and Bleaching Chemicals (\$/kg)		
Sodium Sulfite	0.27	0.27
Peroxide	1.433	1.433
Caustic	0.573	0.573
Silicate	0.154	0.154
Epsom Salt	0.331	0.331
DTPA	1.125	1.125
Electricity (\$/kWh)	0.022	0.05
Effluent Treatment		
(\$/kg BOD)	0.20	0.20
Labour (\$/ODT)	14.00	14.00
Supplies (\$/ODT)	30.00	30.00
Adm./Overhead (\$/ODT)	23.00	23.00

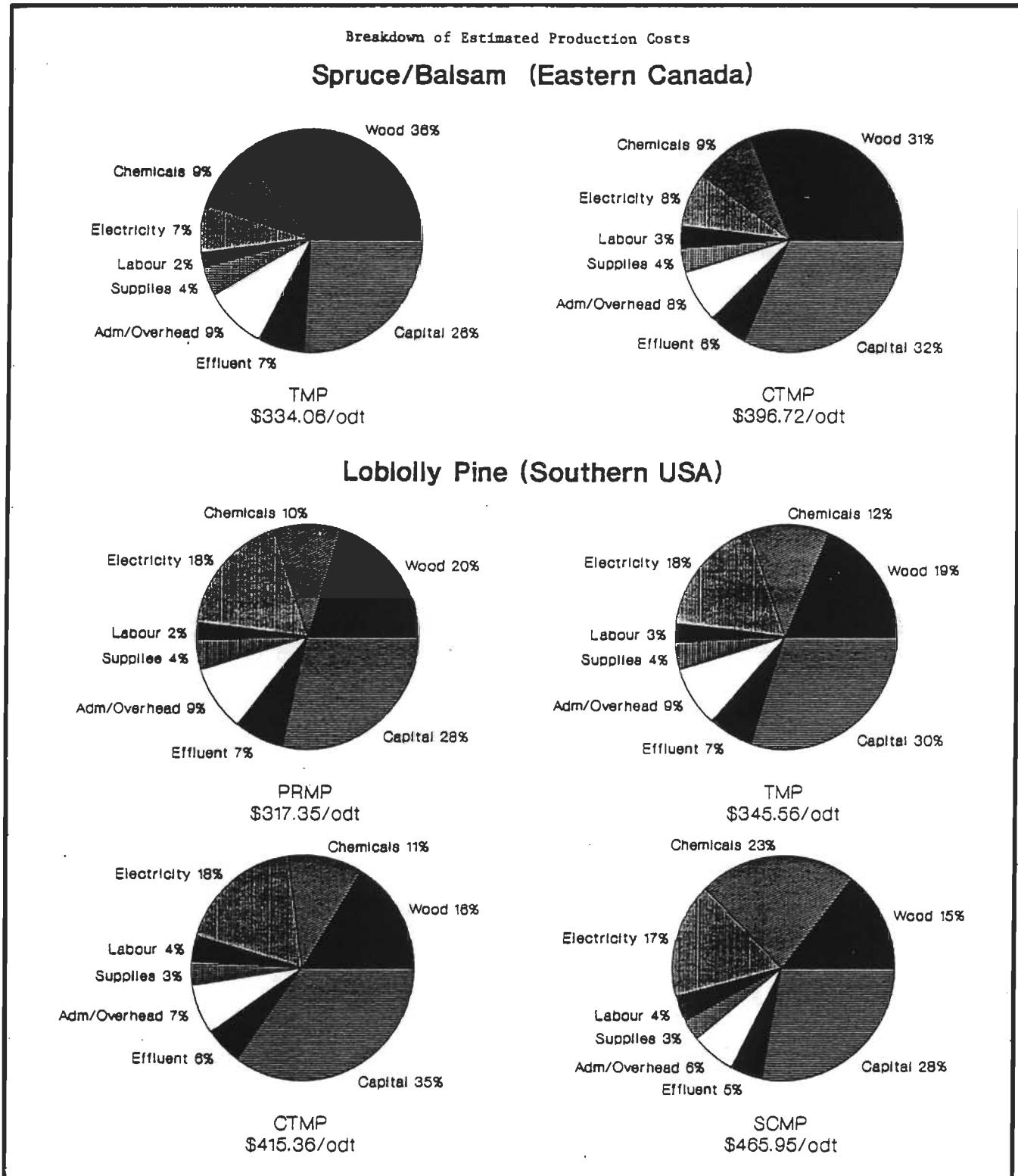


Figure 16. Production cost breakdown for each process alternative evaluated (spruce/balsam and loblolly pine species).

- 4- The itemized cost for the production of TMP and CTMP pulps given for Eastern Canada and Southern USA, is shown in Figure 16. It can be observed that for Eastern Canada, the total production cost for CTMP pulps is approximately equally divided between the capital cost of the project (32%), the wood cost (31%) and other costs (37%) in which the cost of electricity is a minor component (8%). The percentage for electricity is 18% and for wood it is 16% in the Southern USA because the cost of electricity is higher, and the wood chips are less expensive. (Table 7)

CONCLUDING REMARKS

It is obvious, from this work, that all aspects in the choice of a refiner pulping installation should be considered prior to the final decision on the choice of the right pulping process; pulp quality, environmental considerations and pulp production costs being some of the most important factors. In addition to these, the other furnishes used in a mill need also to be considered in view of the final end-paper-product to be manufactured. These considerations are site specific and have not been considered in the present analysis. This work nevertheless will have given guidance to papermakers on the merit of each pulping process to produce at potential low cost optimum pine mechanical and chemi-mechanical pulps for a given application.

EXPERIMENTAL

Complete details on the experimental procedures used for pulping and bleaching trials can be obtained from reference 25.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to thank Hilda Howell, Mavi Pizzolitto, Robert Lanouette and Paulette Gauvin for their assistance in the preparation of this manuscript.

REFERENCES

1. BARBE, M.C., "The future of aspen BCTMP". Preprints, 24th Eucepa Conference, Stockholm, May 8-11 (1990). Print, Paper and Board Products for printing in the nineties, p342-365
2. JOSSART, D., BARBE, M.C., LAPOINTE, M. and LAW, K.N. "Properties of mechanical jack pine pulps, Part I. Thermomechanical pulps". Pulp and Paper Can 89(4):T115-122(April 1988).
3. REMILLARD, B., BARBE, M.C., JOSSART, D. and LAPOINTE, M., LAW K.N. "Properties of mechanical and chemimechanical jack pine pulps. Part II, chemi-thermomechanical pulps", Preprints TAPPI Annual Meeting 1987, Washington, DC.
4. BARBE, M.C., REMILLARD, B. et LAPOINTE, M., "Mise en pâte mécanique et chimico-mécanique de pin gris". Pulp and Paper Can 90(12): T476-488 (Dec. 1989)
5. BARBE, M.C., JANKNECHT, S., REMILLARD, B. and LAPOINTE, M. "Properties of mechanical and chemimechanical jack pine pulps. Part III, Interstage sulfonated pulps", Preprints 1989 TAPPI Pulping Conference, Seattle.
6. GAGNE, C., BARBE, M.C., REMILLARD, B. and LAPOINTE, M. "Properties of mechanical and chemi-mechanical jack pine pulps. Part IV, Bleaching studies", Pulp and Paper Can 91(6): T221-230 (June 1990)
7. BARBE, M.C., DESSUREAULT, S. and JANKNECHT S., "Review of Mechanical and Chemimechanical pine pulping." Preprints TAPPSSA Conference, Johannesburg, p-345, (June 1990)
8. GAYTAN, P., JANKNECHT, S., BARBE, M.C., VALADE, J.L. "Comparacion de la propiedades de las pastas provenientes: Pinus Caribaea var. Hondurensis de una plantacion y una mezcla de especies de bosque natural". ATCP, V. XXIX, No 4, p15-36 July-August (1989).
9. GAYTAN, P., JANKNECHT, S., BARBE, M.C., VALADE, J.L. "Propiedades de pastas químico-mecánicas de Pinus Caribaea var. Hondurensis Part II". ATCP Conference 1990, Mexico, May (1990)
10. GAYTAN, P., LEDUC, C., JANKNECHT, S., BARBE, M.C. "Bleaching of mechanical and chemimechanical pulps of Pinus Caribaea var. Hondurensis Part III". ATCP Conference 1990, Mexico, May (1990)
11. SIMARD, R., MORISSETTE, L. AND BARBE M.C., "Screw press washing of southern pine CTMP". Preprints, Tappi Pulping Conference, New Orleans, p381-390, November 1988.
12. ISENBERG, I.H., "Pulpwood of United States and Canada Vol.I, Conifers, Vol.II, Hardwoods". 3rd ed., "Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisc., (1980)
13. BERZINS, V., "Chemical composition of woods", Pulp and Paper Research Inst. of Canada, Research notes no.61, (1966)
14. SCALLAN, A.M., GREEN, H.V. "A technique for determining the transverse dimensions of the fibre in wood", Wood and Fibre, 5(4), p 323-333, Winter 1974.
15. BRIT, K.W., "Determination of Fibre Coarseness in Wood samples". Tappi 48(1): 7-10, January (1965).

16. KOCH, P., "Utilization of the Southern Pines. II Processing". U.S. Department of Agriculture Forest Service, Handbook no.420: volume 1, p.189-234, Washington, 1972.
17. COWN, D.J. "Wood Density of *Pinus Caribaea* var *Handurenses* Grown in FIJI", N.Z.J. Forestry Sci. 11 (3): 244-253 (1981).
18. WORRAL, J., BURLY, J., PALMER, E.R. and HUGHES, J.F. "The properties of some Caribbean Pine Pulps and their Relationship to Wood Specific Gravity Variables", Commonwealth Forestry Institute, South Park Road, Oxford, United Kingdom, January (1977).
19. DESSUREAULT, S. and BARBE, M.C., "Comparison of different CTMP pulping processes", Preprints 76th Annual Meeting CPPA, p.A245-253.
20. EDWARDS, L.L., ABBOT, R., AHLENIUS, L., HAYNES, J., "PCGEMS Reference Manual", Idaho Research Foundation, Moscow, Idaho, (1987).
21. ENGSTRAND, P., HAMMER, L.A., HTUN, M., "The Kinetics of Sulphonation Reaction on Norwegian Spruce", International Symposium on Wood and Pulping Chemistry 1985, Vancouver, September 1985.
22. FRANZEN, R.G., "LFCMP for High Grading of Mechanical Pulps", 1983 International Mechanical Pulping Conference, June 1983.
23. WEARING, J.T., BARBE, M.C. and OUCHI, M.D. "The effect of white-water contamination on newsprint properties", Journal of Pulp and Paper Science, Vol II (4), J113-121 (July 1985)
24. HARRIS, M., JAN, R., MICHIE, C., IONIDES, G., "Market Bleached CTMP: Interregional Comparison of Manufacturing Costs and Future Prospects. Temanex Consulting Inc., Vancouver, (January 1990)
25. JANKNECHT, S., "Mise en pâte mécanique et chimico-mécanique des pins", mémoire de thèse de Maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, septembre 1990