

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

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

PAR
JEAN-FRANÇOIS SAURIOL

IMPACT DE L'IMPRÉGNATION DE COPEAUX DE BOIS
LORS DE LA MISE EN PÂTE À HAUT RENDEMENT

MARS 1993

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.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vii
RÉSUMÉ	viii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xix
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
2.1 Structure physique du bois	6
2.1.1 Résineux	8
2.1.2 Feuillus	10
2.1.3 Pourcentages d'air, de liquide et de solides pour quelques essences de bois	13
2.2 Structure chimique du bois	18
2.3 Comportement mécanique du bois	24
2.3.1 Propriétés mécaniques du bois et de ses composants	25

2.3.1.1	Effet de la température	28
2.4	Pénétration et diffusion	33
2.4.1	Imprégnation des feuillus	34
2.4.2	Imprégnation des résineux	39
2.5	Caractéristiques des copeaux	40
2.5.1	Teneur en humidité	40
2.5.2	Densité en vrac	41
2.5.3	Taux de délaminage	42
2.6	Équipement d'alimentation de système d'imprégnation et de délaminage de copeaux	46
2.6.1	Vanne rotative	46
2.6.2	Déchiqueteur	48
2.6.3	Impressafiner	50
2.6.4	Bi-vis	51
2.6.5	Alimentateur à bouchon	54
2.6.5.1	Stress impliqués dans les alimen- tateurs à bouchon	63
2.7	Procédés de mise en pâte	66
2.7.1	Pâte mécanique de raffineur atmosphérique (PMR)	66
2.7.2	Pâte thermomécanique (PTM)	67

2.7.3	Pâte chimico-mécanique de raffineur (PCMR)	69
2.7.4	Pâte mécanique alcaline au peroxyde (APMP ^{MD})	71
3.0	EXPÉRIMENTATION	75
3.1	Approvisionnement en bois	75
3.2	Classification des copeaux	76
3.3	Lavage des copeaux	76
3.4	Observation des copeaux au microscope	77
3.5	Compression statique de copeaux	78
3.6	Mise en pâte	79
3.6.1	Imprégnation à l'échelle pilote	81
3.6.2	Imprégnation chimique en laboratoire	84
3.6.3	Mise en pâte à l'holocellulose	86
3.7	Évaluation des propriétés	87
3.7.1	Mesure du taux de délaminage des copeaux	88
3.7.2	Propriétés des pâtes et papiers pour les mises en pâte à l'échelle pilote	89
3.7.3	Propriétés des pâtes et papiers pour les pâtes produites en laboratoire	92
3.7.4	Propriétés des pâtes et papiers pour les pâtes à l'holocellulose	93

4.0	RÉSULTATS ET DISCUSSION	94
4.1	Effets primaires sur les fibres et sur les copeaux	94
4.1.1	Compression statique des copeaux	95
4.1.2	Compression dynamique des copeaux	99
4.2	Effets primaires sur les fibres	105
4.3	Impact sur le produit final	113
4.3.1	Mises en pâte PMR et PTM	114
4.3.1.1	Mises en pâte PMR	114
4.3.1.2	Mises en pâte PTM	123
4.3.2	Mise en pâte chimico-mécanique de raffineur (PCMR)	131
4.3.2.1	Interrelations entre le taux de délaminage des copeaux, le temps de rétention et les charges de produits chimiques	132
4.3.2.2	Impact du taux de délaminage des copeaux sur les propriétés des pâtes PCMR produites en usine pilote	144
4.3.3	Mise en pâte mécanique alcaline au peroxyde (APMP ^{MD})	168

4.3.3.1	Interrelation entre le taux de délaminage et les charges de produits chimiques	169
4.3.3.2	Impact du taux de délaminage sur les propriétés des pâtes APMP ^{MD} produites en usine pilote	178
5.0	CONCLUSION	190
	ANNEXE A	194
	ANNEXE B	195
	BIBLIOGRAPHIE	196

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a impliqué la participation de plusieurs personnes que je désire remercier. Premièrement, je remercie mon directeur, le Docteur Michel C. Barbe, pour son aide au niveau de l'analyse et de l'interprétation des résultats. Sa direction et ses conseils ont également été appréciés.

Je désire aussi remercier Sophie Janknecht, qui m'a aidé constamment à planifier, effectuer et interpréter. De plus, plusieurs personnes ont participé aux travaux de laboratoire : Daniel Bergeron, Stéphan Lafrenière, Robert Lanouette, Gaston Michaud, Christian Viel, Luc Beaudoin et Chantal Hooper. Ils méritent tous un gros merci!

Finalement, mes remerciements à la compagnie Kvaerner Hymac Inc. pour les bourses d'études qu'elle m'a données au cours de ma maîtrise.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACPP	Association Canadienne des Pâtes et Papiers
APMP ^{MD*}	Mise en pâte mécanique alcaline au peroxyde d'hydrogène
CRPP	Centre de Recherche en Pâtes et Papiers
DCO	Demande chimique en oxygène
DTPA	Diéthylène triamine penta acétique acide
kgSF	kg séché au four
PCM	Pâte chimico-mécanique
PCMR	Pâte chimico-mécanique de raffineur
PCTM	Pâte chimico-thermomécanique
PGW	Pâte de meule pressurisée
PMR	Pâte mécanique de raffineur
PTM	Pâte thermomécanique
P100, P200	Fraction inférieure à l'ouverture Tyler 100 ou 200
R14	Fraction supérieure à l'ouverture Tyler 14
TD	Taux de délaminage
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
\$CAN	Dollar canadien

* Marque déposée de la compagnie Andritz Sprout-Bauer

RÉSUMÉ

La mise en pâte à haut rendement a connu une progression importante au cours des dernières années. Le but principal de cette étude est d'évaluer le potentiel d'amélioration des usines à haut rendement existantes et futures, par le biais de l'augmentation du traitement mécanique en début de procédé. Ce traitement mécanique est situé avant l'imprégnation chimique, s'il y a lieu, ou avant le traitement thermique principal.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'influence de ce traitement mécanique (avant l'imprégnation chimique) sur la qualité de l'imprégnation et sur la qualité des pâtes PMR, PTM, PCMR et APMP^{MD}. Les objectifs secondaires sont de déterminer l'effet du même traitement mécanique sur les copeaux, les fibres, les propriétés des pâtes (mécaniques, optiques et considérations environnementales) ainsi que sur les conditions d'opération des usines.

Ce traitement mécanique peut être effectué par différents appareils : déchiqueteur, Impressafiner, bi-vis et alimentateur à bouchon. Dans le cadre de ce travail, un alimentateur à bouchon avec un ratio de compression de 2:1 a été utilisé.

Ce type d'appareil retire de l'air et du liquide des copeaux, en plus de faire subir une compression et du cisaillement à la matière ligneuse. Ces dernières actions produisent un délaminage des copeaux qui se traduit par une augmentation de leur surface spécifique.

La définition d'un paramètre, le taux de délaminage, a permis de caractériser facilement le changement morphologique subi par les copeaux, après leur passage dans l'alimentateur à bouchon. Des passages successifs dans l'appareil ont donné des échantillons de copeaux à différents taux de délaminage. Certains de ces échantillons ont été mis en pâte selon divers procédés, afin d'atteindre les objectifs cités précédemment.

Des mises en pâte à l'holocellulose (mise en pâte chimique) ont permis d'établir que le délaminage par compression diminue la longueur moyenne des fibres.

Dans le cas de la mise en pâte PMR, il se produit une diminution de l'énergie spécifique de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage, lorsque l'on augmente le TD (taux de délaminage), mais les propriétés mécaniques des pâtes et papiers diminuent. Les propriétés optiques ne sont pas affectées. Les résultats

pour la mise en pâte PTM ne varient pas en fonction du TD, pour les valeurs étudiées.

L'ensemble des résultats démontre que l'augmentation de la surface spécifique des copeaux par compressions successives dans un alimentateur à bouchon améliore la qualité et l'efficacité de l'imprégnation chimique. En effet, lorsque le TD augmente, les propriétés physiques des pâtes PCMR et APMP^{MD} s'en trouvent améliorées et l'énergie spécifique de raffinage diminue. Les propriétés optiques tendent à diminuer, en général, à l'exception de la blancheur pour la mise en pâte APMP^{MD}, qui augmente. Ceci est vrai pour des charges de produits chimiques différentes (avec des temps d'imprégnation constants) et pour des charges de produits chimiques identiques.

Dépendant des objectifs poursuivis, les modifications présentées dans ce mémoire peuvent se traduire par une diminution des coûts d'immobilisation pour les nouvelles usines et une diminution des coûts en énergie spécifiques de raffinage et/ou en produits chimiques, pour les usines existantes dont la mise en pâte comporte un traitement chimique. L'augmentation du délaminage des copeaux peut toutefois augmenter les coûts pour le traitement des effluents et l'utilisation de la matière première.

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Capacité canadienne de production, par catégories [1]	2
Figure 2-1. Coupe transversale d'un arbre [21]	7
Figure 2-2. Structure microscopique des bois résineux [22]	9
Figure 2-3. Structure de la trachéide [23]	9
Figure 2-4. Structure microscopique des bois feuillus [22]	11
Figure 2-5. Structure moléculaire de la cellulose [24]	20
Figure 2-6. Structures prédominantes dans la lignine de résineux, par Alder [24]	21
Figure 2-7. Proportions des constituants chimiques du bois [21]	24
Figure 2-8. Courbes contrainte-déformation du pin (sens longitudinal) [27]	27
Figure 2-9. Montage de traction [32]	29
Figure 2-10. Variation de l'énergie de séparation et de l'élongation d'une fibre d'épinette, en fonction de la température [32]	30
Figure 2-11. Fibres partiellement libérées et brisées, en fonction de la température [32]	31
Figure 2-12. Proportions de copeaux, de fibres et de fibres brisées en fonction de l'énergie spécifique [33]	32

Figure 2-13. Essence à zone poreuse (A) et essence à pores diffus (B) [24]	37
Figure 2-14. Distribution du soufre dans les copeaux [19]	43
Figure 2-15. Gradient de température dans les copeaux vs différents paramètres (simulation) [39]	45
Figure 2-16. Vanne rotative [23]	47
Figure 2-17. Déchiqueteur [41]	49
Figure 2-18. L'Impressafiner [42]	51
Figure 2-19. La bi-vis [12, 29]	53
Figure 2-20. Alimentateur à bouchon [29 et Kvaerner Hymac 1992]	55
Figure 2-21. Ratio de compression pour quelques types d'alimentateurs à bouchon (source : Kvaerner Hymac 1992)	56
Figure 2-22. Pénétration et absorption vs ratio de compression (simulation) [39]	58
Figure 2-23. Énergie spécifique en fonction du taux de sulfonation [47]	59
Figure 2-24. Compression des copeaux dans un alimentateur à bouchon [28]	60
Figure 2-25. Influence de la densité en vrac à l'entrée de l'alimentateur à bouchon sur la compression	61
Figure 2-26. Effets sur les copeaux de la compression dans un alimentateur à bouchon moderne	65

Figure 2-27. Région de rupture en fonction de la température [25]	69
Figure 3-1. Copeau pour observation au microscope stéréoscopique	78
Figure 3-2. Piston pour la compression des copeaux	79
Figure 3-3. Presse de laboratoire CARVER	80
Figure 3-4. Unité pilote d'imprégnation, de cuisson et de raffinage Sunds- Defibrator	83
Figure 3-5. Système pour l'égouttage des copeaux	85
Figure 4-1. Pression en fonction du ratio de compression	96
Figure 4-2. Liquide enlevé en fonction de la pression	97
Figure 4-3. Liquide enlevé en fonction du ratio de compression	98
Figure 4-4. Copeaux passés zéro, une, deux et trois fois dans l'alimentateur à bouchon	100
Figure 4-5. Distribution de grosseur de copeaux (tremble frais)	101
Figure 4-6. Taux de délaminage pour le tremble	103
Figure 4-7. Distributions originales des copeaux de tremble	103
Figure 4-8. Taux de délaminage pour le mélange sapin/épinette	104
Figure 4-9. Indice d'égouttage en fonction du nombre de révolutions, PFI (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)	106
Figure 4-10. Longueur des fibres et distributions des longueurs de fibres (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)	107

Figure 4-11. Densités des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)	108
Figure 4-12. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)	110
Figure 4-13. Propriétés mécaniques exprimées les unes par rapport aux autres (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)	112
Figure 4-14. Indice d'égouttage (après réfrigération) en fonction de l'énergie spécifique de raffinage (pâtes PMR)	115
Figure 4-15. Densité des papiers en fonction de l'indice d'égouttage CSF (pâtes PMR)	116
Figure 4-16. Propriétés de pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)	118
Figure 4-17. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)	121
Figure 4-18. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)	122
Figure 4-19. Indice d'égouttage (après raffinage) en fonction de l'énergie de raffinage (pâtes PTM)	125
Figure 4-20. Indice d'égouttage (après réfrigération) en fonction de l'énergie de raffinage (pâtes PTM)	125
Figure 4-21. Densité en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)	126

Figure 4-22. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)	127
Figure 4-23. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)	128
Figure 4-24. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)	130
Figure 4-25. Schématisation de la relation existant entre les différentes propriétés optiques [53]	131
Figure 4-26. Teinture pénétrant et diffusant dans des copeaux	133
Figure 4-27. Blancheur pour des pâtes imprégnées au Na_2SO_3 et NaOH . . .	134
Figure 4-28. Résultats pour pâtes et copeaux en fonction des charges de produits chimiques (PCMR échelle laboratoire)	136
Figure 4-29. Blancheur en fonction du contenu ionique (PCMR échelle laboratoire)	137
Figure 4-30. Résultats en fonction du temps de rétention (PCMR échelle laboratoire)	139
Figure 4-31. Prix des trémies de réaction en fonction du temps de résidence	141
Figure 4-32. Blancheur en fonction du contenu ionique (PCMR échelle laboratoire)	143

Figure 4-33. Indice d'égouttage après raffinage en fonction de l'énergie spécifique (PCMR échelle pilote, chimiques différents)	145
Figure 4-34. Indice d'égouttage après réfrigération en fonction de l'énergie spécifique (PCMR échelle pilote, chimiques différents)	146
Figure 4-35. Densité des feuilles en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)	147
Figure 4-36. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)	149
Figure 4-37. Propriétés mécaniques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)	150
Figure 4-38. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)	152
Figure 4-39. Indice d'égouttage en fonction de l'énergie spécifique (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	155
Figure 4-40. Densité en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	156
Figure 4-41. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	157
Figure 4-42. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	159

Figure 4-43. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	160
Figure 4-44. Absorption d'eau en fonction du taux de délaminage	170
Figure 4-45. Absorption de liqueur en fonction des charges de NaOH et H_2O_2	171
Figure 4-46. Blancheur en fonction de la concentration de H_2O_2 et du taux de délaminage (pâtes APMP ^{MD} échelle laboratoire)	173
Figure 4-47. Blancheur des pâtes en fonction du peroxyde ajouté et consommé (pâtes mécaniques blanchies)	173
Figure 4-48. Blancheur en fonction de la concentration de H_2O_2 pour des copeaux frais et âgés (pâtes APMP ^{MD} , échelle laboratoire)	174
Figure 4-49. Blancheur en fonction du taux de délaminage, copeaux frais et âgés (pâtes APMP ^{MD} échelle laboratoire)	175
Figure 4-50. Taux de délaminage en fonction du contenu ionique (pâtes APMP ^{MD} échelle laboratoire)	177
Figure 4-51a. Blancheur en fonction du contenu ionique (pâtes APMP ^{MD} échelle laboratoire)	177
Figure 4-51. Indice d'égouttage après raffinage en fonction de l'énergie spécifique (pâtes APMP ^{MD} échelle pilote)	179
Figure 4-52. Densité des feuilles en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP ^{MD} échelle pilote)	180

Figure 4-53. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP ^{MD} échelle pilote)	182
Figure 4-54. Propriétés mécaniques des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP ^{MD} échelle pilote)	184
Figure 4-55. Propriétés optiques des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP ^{MD})	185

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1. Caractéristiques morphologiques des fibres et trachéides de différentes essences [21]	12
Tableau 2-2. Pourcentages d'air, de liquide et de solide pour des résineux	14
Tableau 2-3. Pourcentages d'air, de liquide et de solide pour des feuillus . .	16
Tableau 2-4. Densités des essences étudiées provenant de plusieurs publications	17
Tableau 2-5. Caractéristiques moyennes* de bois résineux et feuillus [27] . .	26
Tableau 2-6. Comparaison de la pénétration et de la diffusion [34]	38
Tableau 2-7. Grandeur, capacité et consommation d'énergie des vannes rotatives vendues par Andritz Sprout-Bauer [40]	48
Tableau 2-8. Résultats d'usine, bi-vis (pin du sud des É-U) [14]	54
Tableau 3-1. Normes standards pour les pâtes	90
Tableau 3-2. Normes standards pour les papiers	91
Tableau 4-1. Contenus ioniques pour les deux taux de délaminage (PCMR échelle pilote, chimiques différents)	146
Tableau 4-2. DCO, solides dissous et rendement (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)	153

Tableau 4-3. Contenus ioniques pour les deux taux de délaminage (PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	154
Tableau 4-4. DCO, solides dissous et rendement (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)	161
Tableau 4-5. Calcul du coût en énergie spécifique pour PCMR à un indice d'éclatement de 2.0 kPa*m ² /g	163
Tableau 4-6. Calcul du coût en énergie spécifique pour PCMR à un indice d'égouttage de 150 ml	164
Tableau 4-7. Calcul des coûts pour des mises en pâte PCMR à un indice d'égouttage de 150 ml et un indice d'éclatement de 2 kPa*m ² /g.	166
Tableau 4-8. Prix des produits chimiques et référence	167
Tableau 4-9. Consommation de peroxyde pour une blancheur finale de 80% ISO	174
Tableau 4-10. Calcul du coût en énergie pour des mises en pâte APMP ^{MD} à un indice de déchirure de 2.5 mN*m ² /g	186
Tableau 4-11. Calcul du coût en énergie pour des mises en pâte APMP ^{MD} à un indice d'égouttage de 150 ml	188
Tableau 4-12. DCO, solides dissous et rendement (pâtes APMP ^{MD} échelle pilote)	189

1.0 INTRODUCTION

La mise en pâte à haut rendement a connu un essor considérable au cours des dernières années, comme on peut le voir à la figure 1-1. Elle est donc devenue une composante importante de l'industrie canadienne des pâtes et papiers, même si on remarque un essoufflement de la croissance au début des années 90. Le coût du bois de plus en plus élevé a contribué à rendre la mise en pâte à haut rendement attrayante. Les études cherchant à améliorer la rentabilité et l'efficacité des usines PCTM, APMP^{MD} et autres sont donc bienvenues.

Dans ce type de procédé, le bois peut subir trois sortes de traitement : chimique, thermique et mécanique. Les parties chimique et thermique peuvent être présentes ou non, alors que la partie mécanique l'est toujours. La qualité, l'intensité et la vitesse des traitements chimique et/ou thermique (lorsqu'il y en a) dépendent en partie de la facilité avec laquelle la liqueur est absorbée par les copeaux. Ces derniers subissent généralement un ou plusieurs traitements avant l'imprégnation. Ils peuvent inclure un préchauffage à la vapeur et un traitement mécanique quelconque.

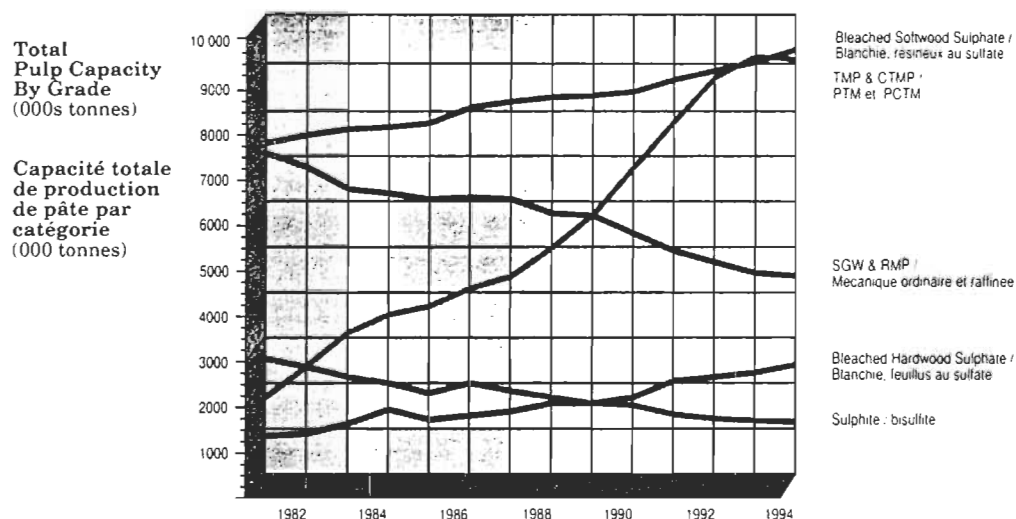


Figure 1-1. Capacité canadienne de production, par catégories [1]

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'influence de ce traitement mécanique (avant l'imprégnation chimique) sur la qualité de l'imprégnation et sur la qualité des pâtes PMR, PTM, PCMR et APMP^{MD}. Les objectifs secondaires sont de déterminer l'effet du même traitement mécanique sur les copeaux, les fibres, les propriétés des pâtes (mécaniques, optiques et considérations environnementales) ainsi que les conditions d'opération des usines.

Ainsi, en augmentant ledit traitement mécanique, on peut espérer réduire les coûts d'investissement lors de la construction d'une nouvelle usine et les coûts d'opération. De plus, on peut espérer améliorer la qualité du produit final.

2.0 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Par le passé, plusieurs chercheurs ont travaillé sur les variables impliquées lors de la sulfonation du bois [2 à 10]. Les travaux ont été faits avec de la poudre de bois la plupart du temps et parfois avec des copeaux. Stone et Nickerson [11] ont étudié l'imprégnation de bois écrasé alors que d'autres ont préféré utiliser la bi-vis, un appareil dans lequel les copeaux subissent un traitement chimique et un traitement mécanique assez intense [12 à 15].

Certains auteurs [16, 17] ont évalué l'importance de l'enlèvement des extractibles lors de la compression du bois. Page et Seth [18] ont pour leur part mis à jour la présence de micro-compressions dans les fibres des pâtes dont les copeaux sont passés dans un alimentateur à bouchon (ainsi que dans d'autres appareils). D'après eux, ces micro-compressions sont positives pour les propriétés physiques du papier.

Dines et Tyminski [19] ont évalué la concentration de soufre à l'intérieur de copeaux et ont montré qu'elle est minimale au centre et maximale à la surface. Il

est donc probable qu'une augmentation de la surface spécifique des copeaux par traitement mécanique améliore l'uniformité de l'imprégnation.

De plus, Heitner, Beatson et Atack [20] ont effectué des imprégnations au sulfite sur des copeaux de résineux compressés à des ratios de 2:2 à 8:1. Leurs résultats sont encourageants.

Plusieurs éléments sont impliqués dans l'atteinte des objectifs mentionnés dans la section précédente; les structures physique et chimique du bois, le comportement mécanique du bois, la pénétration et la diffusion, les caractéristiques des copeaux, l'équipement d'alimentation de système d'imprégnation et de délaminage de copeaux, les procédés de mise en pâte à haut rendement et le blanchiment au peroxyde.

Au cours des travaux de recherche présentés dans ce mémoire, chacun de ces éléments a été analysé attentivement en regard de ses implications au niveau de l'imprégnation des copeaux.

2.1 Structure physique du bois

Sur la coupe transversale d'un arbre, on voit plusieurs structures caractéristiques (figure 2-1). Premièrement, on distingue le bois et l'écorce. Entre les deux, on trouve le cambium où sont produites les cellules du bois et de l'écorce. L'écorce peut être divisée en écorce intérieure vivante et en écorce extérieure morte. Le bois est divisé en bois d'aubier (du côté du cambium) et en bois de coeur, généralement plus foncé. Dans l'aubier, certaines cellules sont vivantes alors que dans le bois de coeur, toutes les cellules sont mortes.

De plus, on peut distinguer les cercles annuels ou cernes d'accroissement qui sont produits par les différences de dimension entre les cellules de printemps et celles d'été. Finalement, on peut aussi observer des traits dessinés dans la direction radiale et que l'on appelle rayons. Ces structures servent à transporter et emmagasiner la "nourriture" produite au niveau des feuilles. Les substances nutritives sont véhiculées par l'écorce vivante avant d'être captées par les rayons.

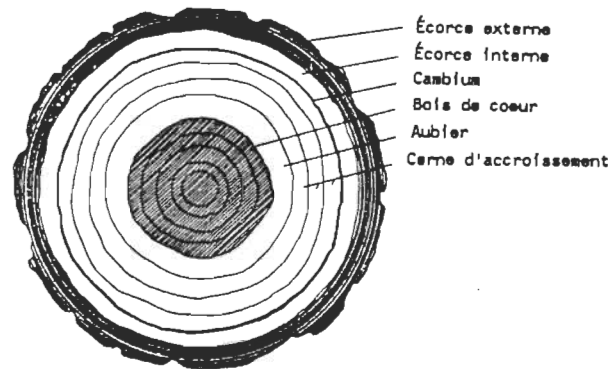


Figure 2-1. Coupe transversale d'un arbre [21]

De façon générale, on divise les espèces de bois en feuillus et en résineux. En plus des différences au niveau de l'apparence extérieure des feuillus et des résineux, leurs structures cellulaires sont passablement différentes.

2.1.1 Résineux

Dans les résineux, on retrouve principalement des trachéides et des cellules de parenchymes (figure 2-2). Les premières servent de support mécanique et transportent, dans le bois d'aubier, l'eau et les éléments nutritifs des racines vers le haut de l'arbre. Les trachéides du bois de coeur n'agissent que comme support mécanique. Les cellules de parenchymes se situent au niveau des canaux résinifères et des rayons. Les canaux résinifères servent aussi à transporter les substances nutritives. Ils peuvent être verticaux ou horizontaux. Dans ce dernier cas, ils sont toujours inclus dans un rayon. Leur paroi est constituée de cellules épithéliales.

Les trachéides longitudinales forment 90% et plus du bois des résineux. À la figure 2-3, une trachéide est représentée avec toutes les couches de sa paroi. La lamelle moyenne, constituée presque seulement de lignine, est située entre les trachéides. C'est elle qui confère sa grande rigidité au bois. La première couche de la trachéide est la paroi primaire. Les autres sont les parois secondaires s_1 , s_2 , et s_3 . La paroi s_2 représente environ 90% de l'épaisseur de la trachéide. L'ouverture au centre de la trachéide se nomme le lumen. Toutes les parois de la trachéide contiennent des microfibrilles dans lesquels se trouve la cellulose.

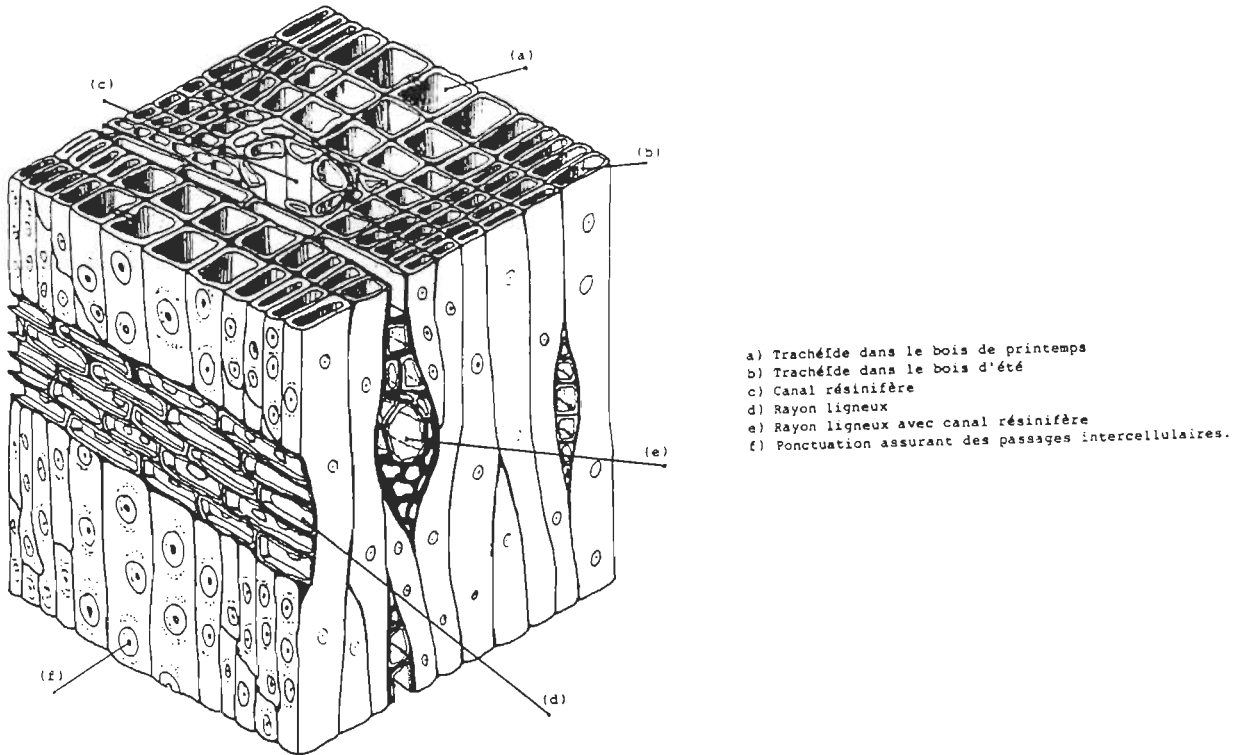


Figure 2-2. Structure microscopique des bois résineux [22]

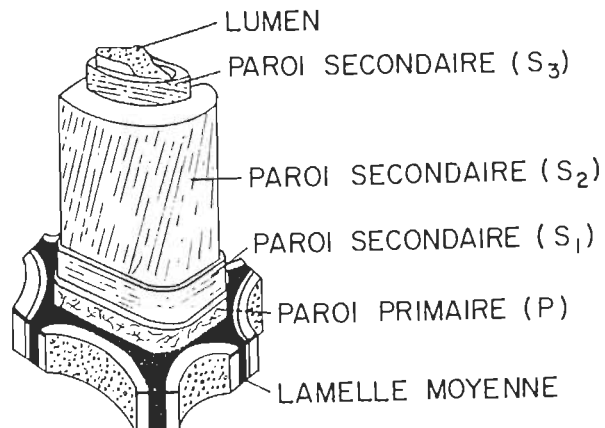


Figure 2-3. Structure de la trachéide [23]

La dimension des trachéides ainsi que l'épaisseur de leur paroi évoluent au cours d'une même année. En effet, au printemps leur "diamètre" est plus grand et leur paroi est moins épaisse. Ceci a comme résultat que le lumen est plus grand. Il permet donc le passage d'une plus grande quantité de liquide pendant une période critique pour la croissance de l'arbre. Cette variation dans les dimensions des trachéides produit les cercles annuels qui permettent de compter l'âge des arbres.

2.1.2 Feuillus

Pour leur part, les feuillus sont constitués de cellules beaucoup plus variées. Leurs principales sont la fibre libriforme, la trachéide vasicentrique, les vaisseaux d'été et de printemps et la cellule de parenchyme [24] (figure 2-4).

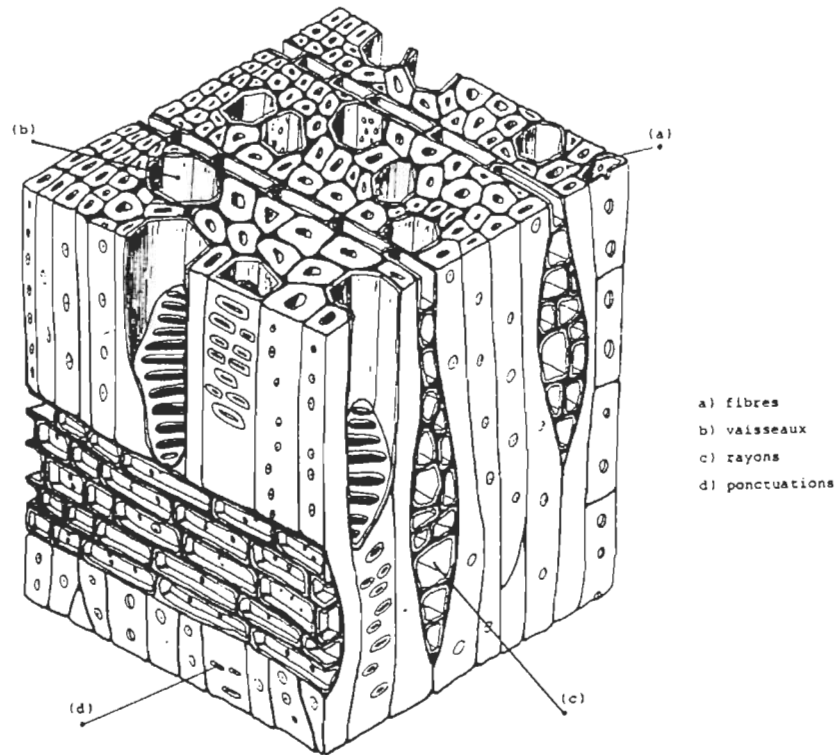


Figure 2-4. Structure microscopique des bois feuillus [22]

Le diamètre des vaisseaux est beaucoup plus grand que celui des fibres. Dans le bois d'aubier, ils servent à transporter les matières nutritives vers le haut de l'arbre, où elles seront transformées (photosynthèse, etc). Les vaisseaux sont particulièrement efficaces, du fait de leur grand diamètre, et cela compense pour la courte période de croissance des feuillus.

La longueur et le diamètre des fibres libriformes des feuillus sont plus petits que ceux de la trachéide des résineux. Le tableau 2-1 présente des valeurs pour différentes essences. De plus, le rapport de la longueur sur l'épaisseur de la paroi (L/\acute{E}) est plus faible pour les feuillus. Une paroi épaisse rend l'aplatissement de la fibre plus difficile et diminue la qualité des liaisons fibre à fibre. Les propriétés mécaniques du papier sont fortement influencées par la longueur des fibres et leur capacité de plier (épaisseur de la paroi faible). Les feuillus sont donc désavantagés à ce titre.

Les différences morphologiques énumérées précédemment ont un impact sur la densité du bois, les pourcentages d'air, de liquide et de solide dans le bois et le comportement mécanique du bois. Ces aspects seront traités dans les sections subséquentes.

Tableau 2-1. Caractéristiques morphologiques des fibres et trachéides de différentes essences [21]

	Longueur des fibres en μm	Diamètre des fibres en μm	Épaisseur de la paroi cellulaire en μm		Rapport L/\acute{E}	Grosseur en $\text{mg}/100\text{m}$
			Bois initial	Bois final		
Bouleau	1,8	de 20 à 36	de 3 à 4		500	de 5 à 8
Copalme d'Amérique	1,7	de 20 à 40	de 5 à 7		300	de 8 à 10
Épinette noire	3,5	de 25 à 30	de 3 à 4 (70 %)	de 6 à 7 (30 %)	700	de 14 à 19
Cèdre rouge	3,5	de 30 à 40	de 2 à 3		1 400	de 15 à 17
Pin du Sud	4,6	de 35 à 45	de 2 à 5 (50 %)	de 8 à 11 (50 %)	700	de 20 à 30
Sapin de Douglas	3,9	de 35 à 45	de 2 à 4 (60 %)	de 7 à 9 (40 %)	700	de 25 à 32
Séquoia	6,1	de 50 à 65	de 3 à 4		1 700	de 25 à 35

2.1.3 Pourcentages d'air, de liquide et de solides pour quelques essences de bois

Franzen [25] a donné des résultats de calcul de pourcentages d'air, d'eau et de solides dans des copeaux, en fonction de la densité ("green") et de la siccité. En s'inspirant de sa méthode, des valeurs ont été calculées pour différentes essences de résineux et de feuillus et les résultats sont donnés aux tableaux 2-2 et 2-3. Pour ce calcul, on suppose que la densité des solides de toutes les essences est 1500 kg/m^3 [25].

Les densités de différentes essences proviennent de la référence [26]. D'autres publications donnent des chiffres différents. Le tableau 2-4 donne des exemples de valeurs trouvées dans d'autres sources.

Tableau 2-2. Pourcentages d'air, de liquide et de solide pour des résineux.
(Note: densité des solides = 1500 kg/m³)

	Pin Ponderosa			Épinette blanche		
DENSITÉ ANHYDRE	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
SICCITÉ (%)	70	50	40	70	50	40
VOLUME AIR (%)	54.00	30.00	9.00	54.00	30.00	9.00
VOLUME LIQUIDE (%)	18.00	42.00	63.00	18.00	42.00	63.00
VOLUME SOLIDE (%)	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
ESSENCE	Épinette noire			Sapin beaumier		
DENSITÉ ANHYDRE	0.45	0.45	0.45	0.37	0.37	0.37
SICCITÉ (%)	70	50	40	70	50	40
VOLUME AIR (%)	50.71	25.00	2.50	59.47	38.33	19.83
VOLUME LIQUIDE (%)	19.29	45.00	67.50	15.86	37.00	55.50
VOLUME SOLIDE (%)	30.00	30.00	30.00	24.67	24.67	24.67

Tableau 2-2 (suite). Pourcentages d'air, de liquide et de solide pour des résineux.
(Note: densité des solides = 1500 kg/m³)

ESSENCE	Pin blanc de l'est			Pin rouge		
DENSITÉ ANHYDRE	0.37	0.37	0.37	0.51	0.51	0.51
SICCITÉ (%)	70	50	40	70	50	43.34
VOLUME AIR (%)	59.47	38.33	19.83	44.14	15.00	0
VOLUME LIQUIDE (%)	15.86	37.00	55.50	21.86	51.00	66.00
VOLUME SOLIDE (%)	24.67	24.67	24.67	34.00	34.00	34.00
ESSENCE	Pin gris			Pin Loblolly		
DENSITÉ ANHYDRE	0.46	0.46	0.46	0.54	0.54	0.54
SICCITÉ (%)	70	50	40	70	50	45.76
VOLUME AIR (%)	49.62	23.33	0.33	40.86	10.00	0
VOLUME LIQUIDE (%)	19.71	46.00	69.00	23.14	54.00	64.00
VOLUME SOLIDE (%)	30.67	30.67	30.67	36.00	36.00	36.00

Tableau 2-4. Densités des essences étudiées provenant de plusieurs publications

ESSENCE	DENSITÉ UTILISÉE [26]	AUTRES VALEURS [27, 28]
Pin Ponderosa	0.42	0.38 [28], 0.44 [28]
Épinette blanche	0.42	0.35 [28], 0.37 [28]
Épinette noire	0.45	0.38 [28], 0.41 [28]
Sapin beaumier	0.37	0.34 [27], 0.34 [28]
Pin blanc	0.37	0.35 [27], 0.36 [28]
Pin rouge	0.51	0.39 [28], 0.41 [28]
Pin gris	0.46	0.40 [28], 0.42 [28]
Pin Loblolly	0.54	0.47 [28]
Tremble	0.40	0.35 [28], 0.37 [28]
Bouleau blanc	0.57	0.48 [28]
Bouleau jaune	0.66	0.55 [28]
Érable à sucre	0.66	0.60 [27], 0.56 [28]

Note: [27] : densité à 12% d'humidité.
 [28] : densité "green"

2.2 Structure chimique du bois

Le bois est un véritable matériau composite naturel. En simplifiant, on peut considérer qu'il est formé de fibres ou de trachéides de cellulose et d'hémicellulose et d'une matrice de lignine [27]. En réalité, les fibres contiennent de la lignine en quantités appréciables.

L'étude que voici porte sur l'imprégnation chimique du bois et implique l'absorption de liquide dans la paroi s_2 des fibres. La structure chimique du bois influence l'imprégnation car la lignine est hydrophobe et les hémicelluloses sont hydrophiles. Donc, plus le pourcentage d'hémicelluloses est élevé et plus celui de la lignine est bas, plus le bois réagit aux agents chimiques gonflants.

La majorité des composants du bois sont des polymères. Les polymères sont de très grosses molécules formées de monomères qui se répètent un grand nombre de fois. On appelle le nombre de monomères d'un polymère le degré de polymérisation. Un polymère peut aussi être composé de plusieurs monomères différents et/ou être ramifié.

Les chaînes de polymères peuvent être orientées de façon organisée dans l'espace. On dit alors que le polymère est cristallisé. Les polymères ne peuvent pas tous s'organiser de la sorte. D'ailleurs, la cristallinité d'un polymère atteint très rarement 100%. Il existe des zones amorphes entre les zones cristallines. Certains polymères sont même complètement amorphes. Ceux qui sont ramifiés et/ou non uniformes ont peu de chance de cristalliser.

La cellulose est un exemple de polymère partiellement cristallisé. Elle est composée de la répétition d'un monomère appelé cellobiose, lui-même constitué de deux motifs de glucose (β -glucopyrannose) inversés (figure 2-5).

De plus, la cristallinité de la cellulose influence les propriétés des fibres. Une plus grande cristallinité donne généralement une fibre plus dense, plus rigide, possédant une résistance intrinsèque à la traction et une stabilité dimensionnelle plus élevées. Cependant, la flexibilité de la fibre est alors plus faible, ainsi que son allongement et sa résistance à la fatigue. Noter que l'eau ou les produits chimiques ne peuvent pénétrer dans les zones cristallines de la cellulose. Il en résulte donc que les fibres possédant un haut degré de cristallinité gonflent moins en présence d'eau ou de produits chimiques [24].

La lignine est aussi un polymère mais son monomère est beaucoup plus complexe que celui de la cellulose et présente des variations au niveau des groupements fonctionnels. La figure 2-6 donne une représentation d'Alder de la lignine de résineux. Comme les monomères de la lignine sont très complexes, ce polymère est amorphe. Elle est également hydrophobe, ce qui rend le raffinage et l'hydratation plus difficiles lorsque le contenu en lignine est élevé [21].

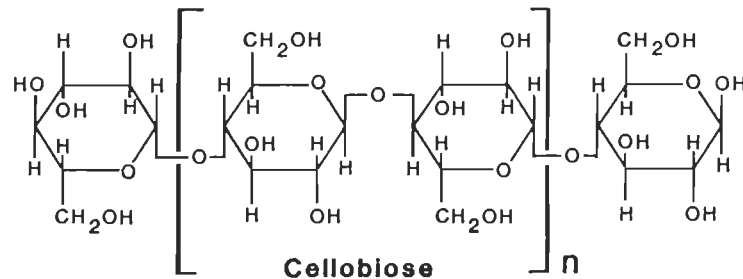


Figure 2-5. Structure moléculaire de la cellulose [24]

La lignine est un polymère thermoplastique. Ses propriétés viscoélastiques changent avec la température. À température élevée (120-130°C), elle devient plus molle et il est alors plus facile de séparer les fibres et de les garder relativement intactes [21]. C'est pourquoi la défibrage mécanique se fait souvent à température élevée (PTM, PGW, PCTM, etc).

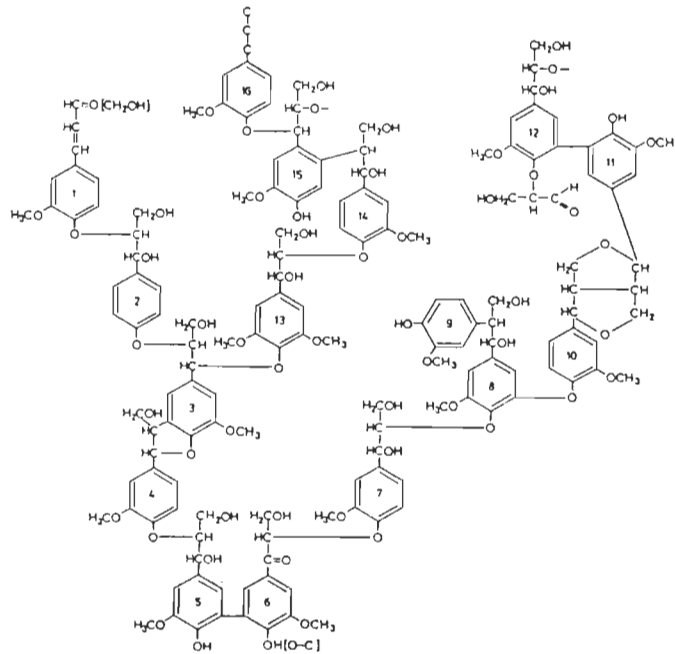


Figure 2-6. Structures prédominantes dans la lignine de résineux, par Alder [24]

Finalement, la lignine contient beaucoup de groupements chromophoriques qui peuvent être responsables d'une couleur indésirable du papier. En effet, la cellulose est fondamentalement blanche [29]. Pour les pâtes à haut rendement, ces groupements chromophoriques sont modifiés à l'aide d'un réducteur (hydrosulfite de sodium) ou d'un oxydant (peroxyde d'hydrogène), de façon à les rendre incolores.

Les hémicelluloses ont une structure semblable à celle de la cellulose mais leurs chaînes sont plus courtes et elles sont souvent ramifiées. De plus, la cellulose est un homopolysaccharide (une seule unité structurale, le motif cellobiose) et les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides. Elles sont constituées d'unités structurales de nature différente, soit des hexoses, des pentoses et des acides uroniques. Les hémicelluloses sont amorphes (à l'exception des celluloses), comme la lignine. Une partie des hémicelluloses est liée à la cellulose alors qu'une autre partie est liée à la lignine [21].

Les hémicelluloses sont importantes lors de l'imprégnation car leur solubilité est grande. En effet, leur degré de polymérisation ne dépasse guère 200 [30]. Aussi, les fonctions réactives des hémicelluloses sont très accessibles. Elles sont donc plus réactives que la cellulose.

D'autre part, les hémicelluloses confèrent à la matrice cellulosique des propriétés hydroplastiques. Cela signifie que la plasticité de la matrice augmente en présence de l'eau. Ceci permet d'obtenir un gonflement une fibrillation plus importants, ce qui favorise le développement de bonnes propriétés physiques [21, 31].

Cependant, un pourcentage trop élevé peut être néfaste car le degré de polymérisation des hémicelluloses est beaucoup plus faible que celui de la cellulose. Ensuite, un taux très élevé d'hémicelluloses peut causer une opacité et un indice de déchirure plus faibles [31].

Les proportions de cellulose, de lignine et d'hémicelluloses varient d'une essence à l'autre et au sein d'un même arbre. Cependant, on peut donner des valeurs moyennes pour les feuillus et les résineux (figure 2-7). En général, les feuillus et les résineux contiennent tous les deux environ 45% de cellulose. Par contre, les feuillus contiennent plus d'hémicelluloses et moins de lignine. Les feuillus réagissent donc plus aux agents gonflants et c'est une des raisons pour lesquelles on utilise de la soude caustique avec le sulfite de sodium, lors de la mise en pâte PCTM des feuillus. Aussi, tel que vu précédemment, le rapport épaisseur de la paroi sur le diamètre de la fibre est plus élevé pour les feuillus. Leurs fibres sont donc plus difficile à écraser mécaniquement, en l'absence d'un traitement chimique adéquat. L'ajout de soude caustique améliore cette situation.

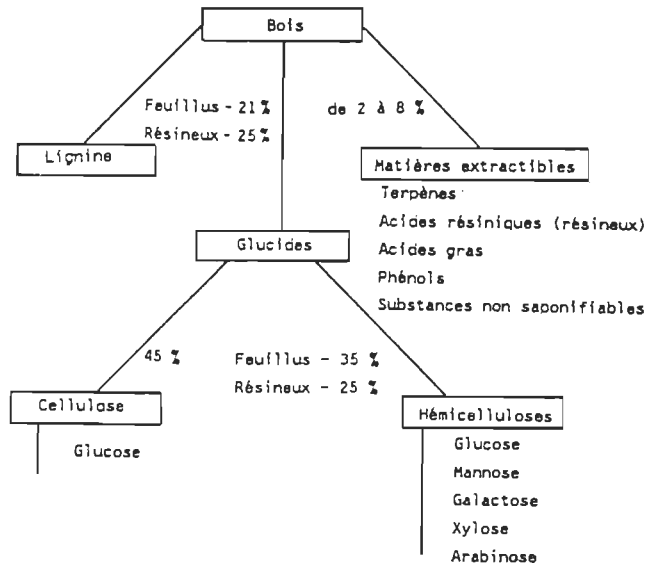


Figure 2-7. Proportions des constituants chimiques du bois [21]

2.3 Comportement mécanique du bois

Avant l'imprégnation chimique, le bois est fréquemment soumis à un traitement mécanique pour extraire l'air et le liquide présents, pour ensuite les remplacer par la solution de produits chimiques. Ce traitement mécanique vise également à augmenter la surface spécifique disponible pour les produits chimiques.

Ce traitement mécanique exerce évidemment des contraintes sur la structure du bois et c'est pourquoi cette section couvre le comportement mécanique du bois.

2.3.1 Propriétés mécaniques du bois et de ses composants

Les propriétés du bois changent énormément en fonction de l'essence, à cause des différences morphologiques (présence ou non de vaisseaux, grosseur et distribution des vaisseaux, canaux résinifères, épaisseur de la paroi des fibres, diamètre des fibres, etc). Elles varient aussi pour une même essence, dépendant du lieu d'origine, ou pour un même arbre, dépendant de l'endroit où on prend l'échantillon. C'est pourquoi les tableaux de propriétés que l'on trouve dans la littérature donnent souvent des valeurs différentes.

Le tableau 2-5 présente certaines caractéristiques moyennes pour quelques essences:

Tableau 2-5. Caractéristiques moyennes de bois résineux et feuillus [27]

Espèces	Masse volumique (t/m ³)	Module d'Young (//) (GPa)	Résistance mécanique					
			tension (//) (MPa)	tension (⊥) (MPa)	flexion (MPa)	compression (//) (MPa)	compression (⊥) (MPa)	cisaillement (//) (MPa)
<i>Résineux</i>								
Cèdre blanc	0,30	4,8	60	1,7	42	28	2,7	6,9
Cèdre rouge	0,31	8,0	65	1,5	54	30	3,4	5,6
Épinette (épicéa)	0,40	10,5	90	2,4	70	38	4,3	8,6
Sapin baumier	0,34	9,6	88	1,2	59	34	3,2	6,3
Pin blanc	0,35	9,4	100	2,1	66	37	3,4	6,1
Pin douglas	0,45	13,6	130	2,6	88	49	6,0	9,5
<i>Feuillus</i>								
Bouleau	0,60	13,9	165	6,4	114	56	6,7	13,0
Chêne blanc	0,64	12,3	150	5,5	108	53	7,4	13,8
Érable à sucre	0,60	12,6	180	4,8	110	54	10,0	16,0
Frêne	0,58	12	175	6,0	105	51	8,5	13,2
Peuplier	0,37	11,5	120	3,5	70	37	2,9	6,1

* Les valeurs sont données pour un taux d'humidité de 12 %. Les valeurs des propriétés mécaniques sont données dans le sens des fibres (//) et dans une direction perpendiculaire aux fibres (⊥).

Le bois est un matériau très anisotrope. Son comportement dépend de la direction dans laquelle on applique la contrainte. Généralement, on étudie les propriétés du bois dans les directions longitudinale et perpendiculaire (radiale ou tangentielle).

Les résistances à la traction et à la compression sont plus élevées dans la direction longitudinale. Pour les résineux, la résistance à la traction peut être vingt à cinquante fois plus élevée dans la direction longitudinale que dans la direction

perpendiculaire. Dans le premier cas, la rupture se produit après une faible déformation plastique [27].

Dans la direction perpendiculaire, cependant, les fibres s'écrasent et il y a une déformation importante. En outre, le module d'élasticité est aussi plus élevé dans la direction longitudinale.

Le bois est beaucoup plus résistant en tension qu'en compression (figure 2-8). Il y a environ un facteur de deux entre les deux résistances. En compression, lorsque la limite élastique est atteinte, les fibres sont soumises au flambage et une déformation plastique importante peut en résulter [27].

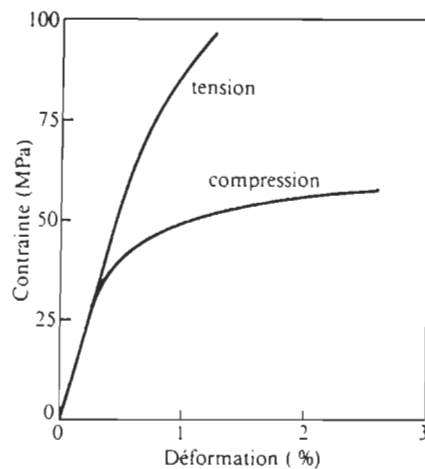


Figure 2-8. Courbes contrainte-déformation du pin (sens longitudinal) [27]

En général, plus la densité d'une essence est grande, plus ses caractéristiques viscoélastiques sont bonnes (elle est plus résistante). Cela implique que les espèces à densité faible demandent moins d'énergie lors du défibrage mécanique, pour un même type de traitement.

Les propriétés mécaniques du bois ne réagissent pas toutes de la même façon lorsque le taux d'humidité augmente. Sous le point de saturation des fibres, la ténacité augmente avec l'humidité alors que les autres propriétés diminuent (module d'Young, résistance mécanique) [27].

2.3.1.1 Effet de la température

Koran a évalué l'énergie nécessaire pour séparer en tension des trachéides d'épinette les unes des autres [32]. Il a pu ainsi obtenir l'énergie moyenne nécessaire pour séparer une trachéide. Cette énergie a également été mesurée en fonction de la température. Le travail a été effectué sur des blocs de bois soumis à une traction perpendiculaire sur un appareil Instron.

La figure 2-9 illustre le montage expérimental. Noter que les trachéides dessinées sont grossies plusieurs fois puisqu'il y en a environ 14 200 sur la surface de séparation. On peut voir le résultat de cette expérimentation à la figure 2-10.

On remarque que la courbe d'énergie est en forme de cloche et que le maximum se trouve à -50°C . À cette température, il faut 4,1 ergs pour libérer en tension une trachéide d'épinette. En se fiant au tableau 2-6, on peut supposer que les énergies requises en cisaillement seraient deux fois plus élevées qu'en tension, pour les feuillus, et trois fois plus élevées pour les résineux.

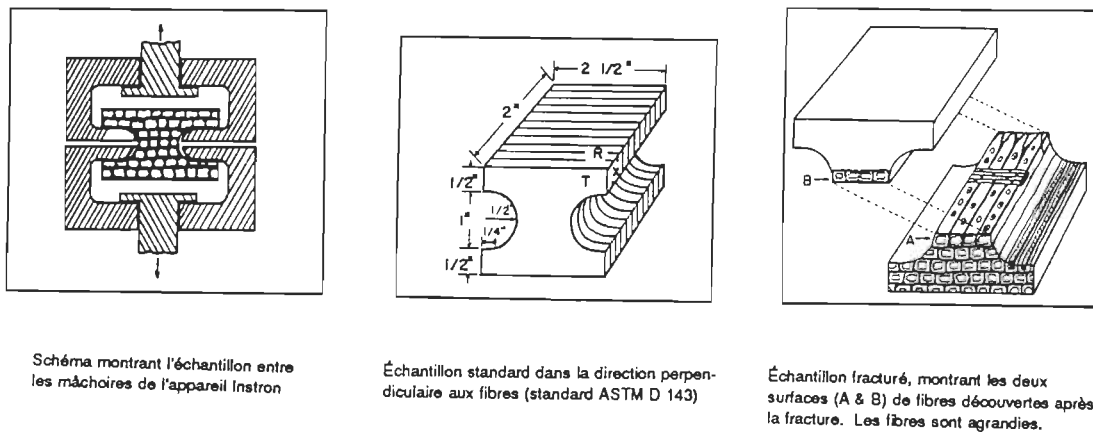


Figure 2-9. Montage de traction [32]

Le nombre de fibres partiellement libérées et le nombre de fibres brisées ont aussi été évalués. Dans un cas comme dans l'autre, une hausse de la température est favorable (figure 2-11).

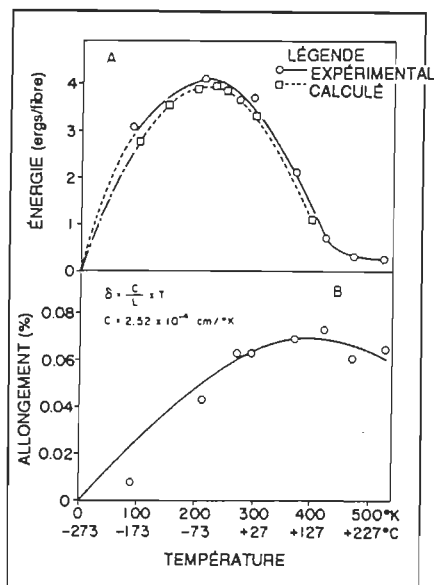


Figure 2-10. Variation de l'énergie de séparation et de l'élongation d'une fibre d'épingle, en fonction de la température [32]

Kano *et al* [33] ont fait des travaux sur les proportions d'énergie utilisées pour la séparation des copeaux en fibres, le raffinage des fibres et le bris des fibres. La figure 2-12 montre l'évolution des fractions de copeaux, de fibres et de morceaux de fibres en fonction de l'énergie de raffinage. Lorsque l'énergie augmente, la

proportion de copeaux diminue, celle des fibres passe par un maximum et celle des fibres brisées augmente. Enfin, d'après Kano *et al* [33], 54% à 82% des fibres cassées le sont lors de la transformation des copeaux en fibres, pour une pâte mécanique d'indice d'égouttage de 150 ml. Évidemment, pour un indice d'égouttage plus bas, ce pourcentage doit diminuer.

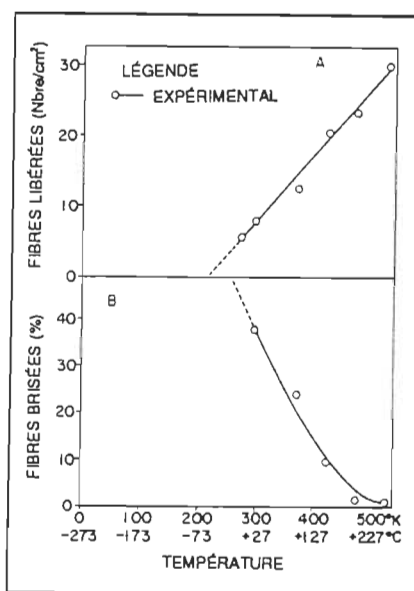
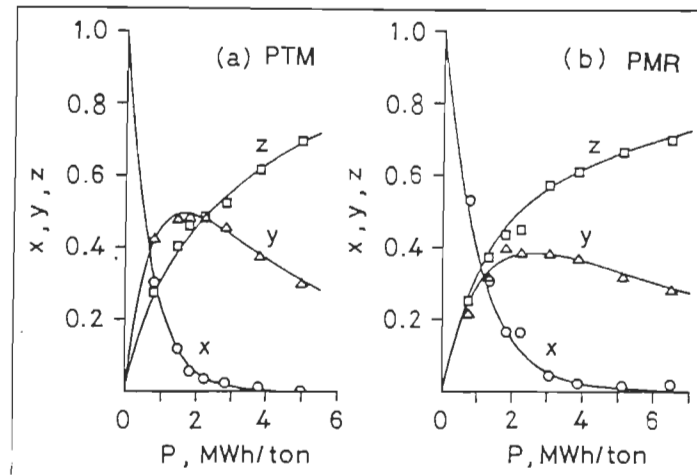


Figure 2-11. Fibres partiellement libérées et brisées, en fonction de la température [32]



Comparaison entre des résultats expérimentaux (○, △, □) et des calculs (—). x, y et z : respectivement fraction massique des copeaux, des fibres entières et des fibres brisées.

Figure 2-12. Proportions de copeaux, de fibres et de fibres brisées en fonction de l'énergie spécifique [33]

L'énergie nécessaire pour séparer les fibres est divisée en trois composantes:

- 1- Travail plastique pendant la déformation du spécimen
- 2- Énergie servant à briser les fibres dans le sens de la longueur
- 3- Énergie servant à créer de nouvelles surfaces libres de fibres

Il ne faut pas oublier que l'énergie de séparation des fibres n'est qu'une composante de la mise en pâte mécanique. Il y a aussi l'énergie utilisée pour raffiner les fibres individuelles, qui est beaucoup plus importante que l'énergie de séparation. En effet, Kano *et al* ont montré que 20-33% de l'énergie pendant le raffinage sert à séparer les fibres [33]. Le reste sert à raffiner les fibres individuelles, pour les rendre assez souples, de façon à ce que la qualité et la quantité des liaisons soient bonnes. Cette évaluation exclut l'énergie produisant de la vapeur.

En conclusion, on peut dire que pour une mise en pâte strictement mécanique, on devrait utiliser une température de 150°C à 170°C pour minimiser l'énergie de séparation et le nombre de fibres brisées et maximiser le nombre de fibres "libérées".

2.4 Pénétration et diffusion

Lors de l'imprégnation chimique des copeaux, du liquide doit forcément être absorbé par le bois. La façon dont cette absorption se produit peut avoir un impact

sur la qualité de l'imprégnation et/ou sur le temps d'imprégnation nécessaire. Le fait de comprendre les phénomènes impliqués permet de chercher des méthodes pour améliorer l'efficacité de cette étape importante des procédés mi-chimiques et chimiques.

2.4.1 Imprégnation des feuillus

D'après Stone et Green [34], il existe deux mécanismes distincts lors de l'imprégnation de copeaux de feuillus: la pénétration et la diffusion.

La pénétration se produirait uniquement dans les vaisseaux. Cette pénétration serait relativement rapide, bien que dépendant de quelques facteurs. Entre autres, on peut mentionner le diamètre des vaisseaux, la température, la pression et le taux d'humidité. Ce phénomène serait bien représenté par l'équation de Hagen-Poiseuille [35], qui donne le débit d'un fluide dans un tuyau (ou un capillaire, en l'occurrence):

$$Q = \frac{\pi DP g_c r^4}{8 DL MU}$$

où: Q = débit dans le capillaire
 DP = différence de pression entre les deux points observés
 g_c = constante de proportionnalité
 r = rayon du capillaire
 DL = longueur de la section de capillaire observée
 MU = viscosité du fluide

Cette équation vaut pour un seul capillaire, avec un écoulement laminaire. Comme on peut difficilement avoir un écoulement turbulent dans un capillaire, cette équation s'applique. S'il y a n capillaires dans un copeau, on la multiplie par n.

Comme le rayon est à la puissance 4, son influence est très grande. Des essences possédant des vaisseaux de diamètres différents auront donc des taux de pénétration différents. La pression environnante est un facteur déterminant puisqu'elle a un impact direct sur DP. Comme la viscosité des fluides diminue lorsque la température augmente, une hausse de cette dernière augmentera la pénétration.

La pénétration est optimale dans des copeaux secs. En effet, la liqueur peut difficilement pénétrer dans des vaisseaux saturés d'eau. Dans ce cas, au lieu de pénétrer, les produits chimiques diffusent.

De plus, les vaisseaux de certaines espèces sont souvent bouchés par des tyloses, surtout dans le bois de coeur [34]. La présence ou non de ces tyloses sera déterminante sur le taux de pénétration. Comme ces tyloses ne se retrouvent pas dans les mêmes proportions chez tous les feuillus, on observera de grandes différences de pénétration entre les essences.

La diffusion, quant à elle, serait responsable du transport des agents chimiques des vaisseaux vers les fibres. La diffusion a lieu partout où il y a de l'eau et peut même traverser la paroi des fibres et les membranes des ponctuations. Un gonflement à l'alcali favorise ce phénomène. Il dépend également de la surface perpendiculaire à travers laquelle la diffusion peut avoir lieu. Une faible densité du bois est aussi bénéfique.

MacGregor *et al* [36] ont montré que le coefficient de diffusion est maximal dans le sens des fibres et minimal dans la direction perpendiculaire aux fibres. Ce résultat a été vérifié pour des feuillus et des résineux.

La diffusion étant un phénomène relativement lent, la distance à parcourir est déterminante. Ainsi, une essence à zone poreuse est désavantagée par rapport à une essence à pores diffus. En effet, dans ce dernier cas, la plus longue distance

à parcourir à partir d'un vaisseau vers une fibre est moins grande que pour une essence à zone poreuse (figure 2-13).

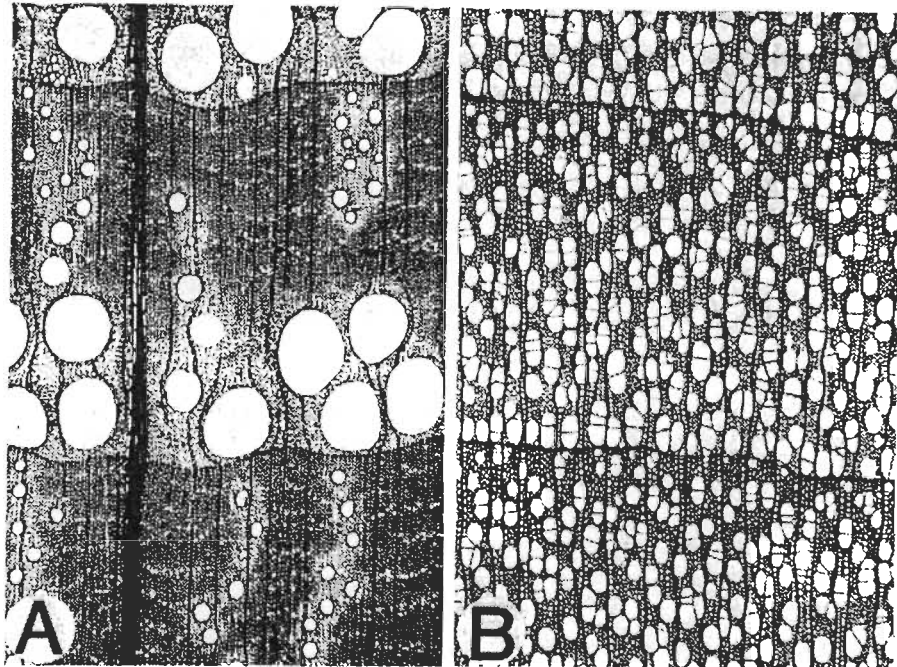


Figure 2-13. Essence à zone poreuse (A) et essence à pores diffus (B) [24]

Le tableau comparatif suivant résume les facteurs influençant le mouvement des produits chimiques dans les copeaux de feuillus:

Tableau 2-6. Comparaison de la pénétration et de la diffusion [34]

PÉNÉTRATION	DIFFUSION
Se produit dans les vaisseaux, les ouvertures et les microcraques	Se produit dans toute région chargée d'eau
Optimale dans le bois sec	Optimale dans le bois saturé d'eau
Efficace sur de longues distances dans la direction des fibres	Efficace seulement sur de courtes distances
Non efficace dans la direction perpendiculaire aux fibres	Efficace dans la direction perpendiculaire aux fibres
Très grandes différences de pénétration observées entre : a) bois d'aubier et bois de coeur b) différentes essences de feuillus c) résineux et feuillus	Petites différences entre différentes essences
Pas affectée par la densité du bois	Affectée par la densité du bois
Composition de la liqueur peu importante	Grandement affectée par la composition de la liqueur

On note que la pénétration est optimale lorsque les vaisseaux sont vides et que la diffusion est optimale lorsque les fibres sont saturées d'eau. Il est évidemment difficile de réunir ces deux conditions. On peut cependant créer des ouvertures et des dislocations pour favoriser la pénétration dans un premier temps. La diffusion peut alors avoir lieu dans un deuxième temps.

Robertsen *et al* [37, 38] ont aussi montré que la diffusion dépend de la température, selon une équation du type Arrhenius. La diffusion augmente donc avec la température.

2.4.2 Imprégnation des résineux

Les résineux possèdent une structure microscopique très différente des feuillus. La principale différence est qu'ils n'ont pas de vaisseaux. Cependant, les ponctuations sont beaucoup plus nombreuses que chez les feuillus et constituent un véritable "réseau de communication" entre les trachéides (figure 2-2). De plus, les rayons comportant un canal résinifère constituent des canaux par lesquels la liqueur peut vraisemblablement pénétrer.

Il est donc probable que l'on retrouve la pénétration et la diffusion chez les résineux. L'importance relative de chacune serait due, entre autres, au taux d'humidité. Aussi, dans certaines conditions, les ponctuations peuvent se fermer et la pénétration en est alors limitée.

D'après Franzen [25], l'imprégnation est assez facile avec des copeaux ayant une densité et un taux d'humidité faibles. Dans ce cas, la pénétration joue un rôle important. Par contre, dans des conditions inverses, l'imprégnation est plus lente car le phénomène qui contrôle est la diffusion.

Dans un autre ordre d'idées, comme la majorité des ponctuations se retrouvent sur la coupe radiale, on aurait avantage à exposer cette surface en coupant les copeaux, ou à ouvrir la structure des copeaux.

2.5 Caractéristiques des copeaux

2.5.1 Teneur en humidité

La teneur en humidité des copeaux détermine la quantité d'énergie requise pour élever leur température jusqu'au niveau requis lors du prétraitement thermique. En effet, la capacité thermique (C_p) de l'eau est supérieure à celle du bois. Il faut

donc plus d'énergie pour des copeaux humides. L'air, quant à lui, agit comme un isolant. Il augmente le temps nécessaire pour atteindre une certaine température [24].

2.5.2 Densité en vrac

La densité en vrac est une mesure de la densité d'un ensemble de copeaux qui tient compte de l'air situé entre ces derniers. Autrement dit, c'est la masse sèche de copeaux divisée par leur volume et celui de l'air compris entre les copeaux.

$$\rho_{\text{vrac}} = \frac{\text{masse sèche de bois}}{\text{volume occupé par copeaux et air}}$$

Ainsi, des copeaux bien tassés auront une densité en vrac plus grande que les mêmes copeaux non tassés.

2.5.3 Taux de délaminage

Le passage des copeaux dans certains équipements provoque un délaminage ou une augmentation de la surface spécifique du bois. Certains copeaux, sans être complètement déchirés dans le sens des fibres, peuvent être étirés comme des accordéons.

Il existe une méthode pour mesurer la surface spécifique des fibres mais elle nécessite un équipement spécialisé (TAPPI T 226 cm-82). Pour les besoins des présents travaux de recherche, un nouveau paramètre facilement mesurable en laboratoire a été défini: le taux de délaminage. Il est fonction de la dimension moyenne des copeaux avant et après leur passage dans l'appareil:

$$TD = (1 - D1/D2) * 100\%$$

où : TD = taux de délaminage (%)
D1 = dimension moyenne des copeaux après (cm)
D2 = dimension moyenne des copeaux avant (cm)

La grosseur des copeaux a une influence directe sur la qualité de l'imprégnation ou, à tout le moins, sur le temps nécessaire pour obtenir une bonne imprégnation. Il a en effet été démontré que les petits copeaux s'imprègnent de façon plus uniforme, pour de courtes durées d'imprégnation [19] (figure 2-14). Cependant, des copeaux très petits impliquent une longueur de fibre plus courte, car les fibres sont coupées à l'extrémité des copeaux et endommagées par la compression provoquée par le couteau [30].

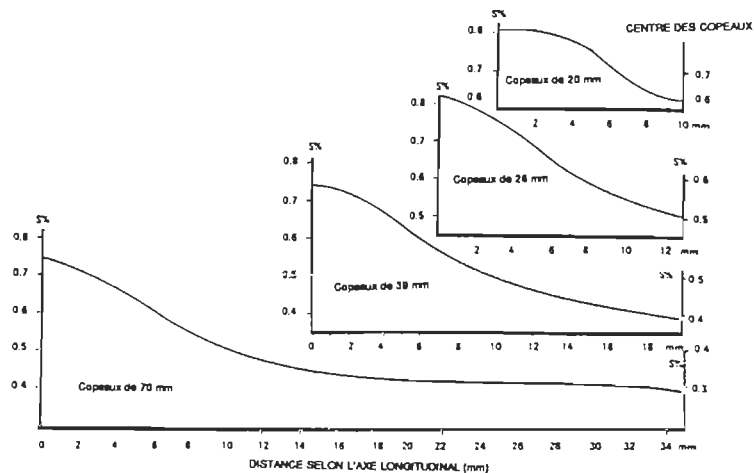


Figure 2-14. Distribution du soufre dans les copeaux [19]

Le délaminage des copeaux, donc l'augmentation de leur surface spécifique, favorise une bonne imprégnation. Les produits chimiques agissent de façon plus uniforme. Il faut cependant faire attention de ne pas endommager les fibres au point de diminuer les propriétés mécaniques des pâtes.

Finalement, il faut réaliser qu'un taux de délaminage en lui-même ne dit pas tout. Il faut en effet spécifier la dimension moyenne initiale des copeaux. De plus, le même taux de délaminage obtenu avec des appareils différents ne donnera pas les mêmes propriétés physiques et la même qualité d'imprégnation (exemple : déchiqueteur et alimentateur à bouchon).

Lin et Hsieh ont simulé l'effet de certains paramètres sur la température des copeaux dans un système PCTM [39]. On retrouve leurs résultats à la figure 2-15. Les conditions utilisées pour la simulation sont des températures de 50°C pour les copeaux et de 135°C pour la vapeur, un temps de rétention de 2 minutes, une épaisseur de copeaux de 0,25", une densité du bois de 0,47 et un contenu en humidité de 50%. On remarque que la distribution de température est plus uniforme pour des copeaux minces, un temps d'étuvage long, un contenu en humidité et une gravité spécifique du bois faibles.

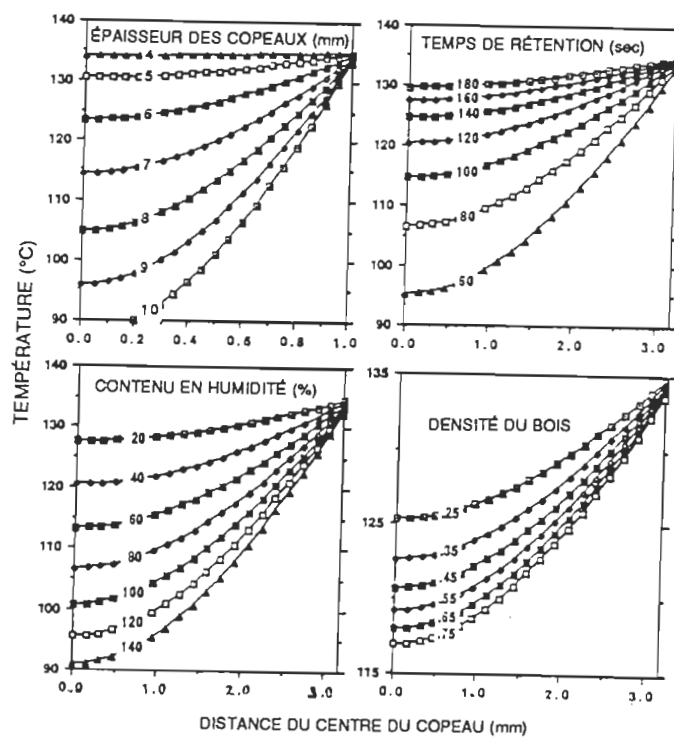


Figure 2-15. Gradient de température dans les copeaux vs différents paramètres (simulation) [39]

2.6 Équipement d'alimentation de système d'imprégnation et de délaminage de copeaux

2.6.1 Vanne rotative

La vanne rotative sert à alimenter les systèmes d'imprégnation et assure l'étanchéité des lessiveurs sous pression. Elle est constituée d'un ensemble de pochettes en rotation, qui se remplissent du haut et se vident vers le bas (figure 2-16).

Comme la vanne rotative est insensible à la densité en vrac du produit alimenté, elle requière la présence d'un système de mesure de débit [23]. En effet, les pochettes ne peuvent être complètement remplies sans endommager l'appareil. Après étalonnage, elle permet l'utilisation de copeaux, de sciure et autres débris.

Étant donné que les copeaux ne sont pas compressés, les vannes rotatives introduisent beaucoup d'air dans le système [23]. En conséquence, un système d'évacuation très important doit être installé. Aussi, les copeaux sont peu endommagés mais leur surface spécifique est faible.

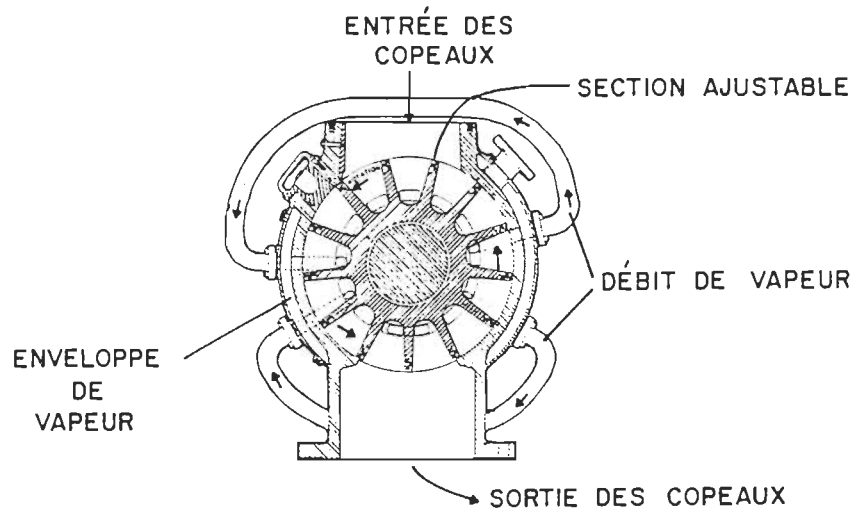


Figure 2-16. Vanne rotative [23]

L'énergie consommée dans les vannes rotatives est relativement basse, comparée à celle consommée dans les alimentateurs à bouchon, par exemple. En effet, l'absence de compression fait la différence à ce niveau.

Les vannes rotatives doivent être construites très solidement. Après une certaine période d'utilisation, elles perdent leur étanchéité et doivent être rebâties. Les plus fragiles ont tendance à briser rapidement [23].

Le tableau suivant donne des informations sur les vannes rotatives vendues par la société Andritz Sprout-Bauer :

Tableau 2-7. Grandeur, capacité et consommation d'énergie des vannes rotatives vendues par Andritz Sprout-Bauer [40]

GRANDEUR DE VALVE*	CAPACITÉ (pi ³ /jour)	ÉNERGIE NÉCESSAIRE (HP)
18" x 20" x 33" - 71	80 000 à 155 000	30
18" x 20" x 33" - 77	100 000 à 210 000	50
18" x 26" - 30" - 2000	160 000 à 310 000	50

* La première dimension correspond au diamètre de la bride côté alimentation
 La deuxième dimension correspond au diamètre de la bride côté sortie
 La dernière dimension correspond au diamètre moyen du rotor

2.6.2 Déchiqueteur

Comme son nom l'indique, le déchiqueteur sert à déchiqueter les copeaux. Il y a un exemple de ce type d'appareil à la figure 2-17. Celui-là est utilisé pour le déchiquetage de l'écorce mais les modèles pour les copeaux sont en tous points semblables.

Le déchiqueteur est construit simplement. Son action mécanique se fait par le biais de côûteaux mobiles et d'enclumes stationnaires. Les copeaux sont emprisonnés entre ces deux structures. Le résultat est assez grossier mais permet la réduction de la dimension moyenne des copeaux et l'augmentation de leur surface spécifique.

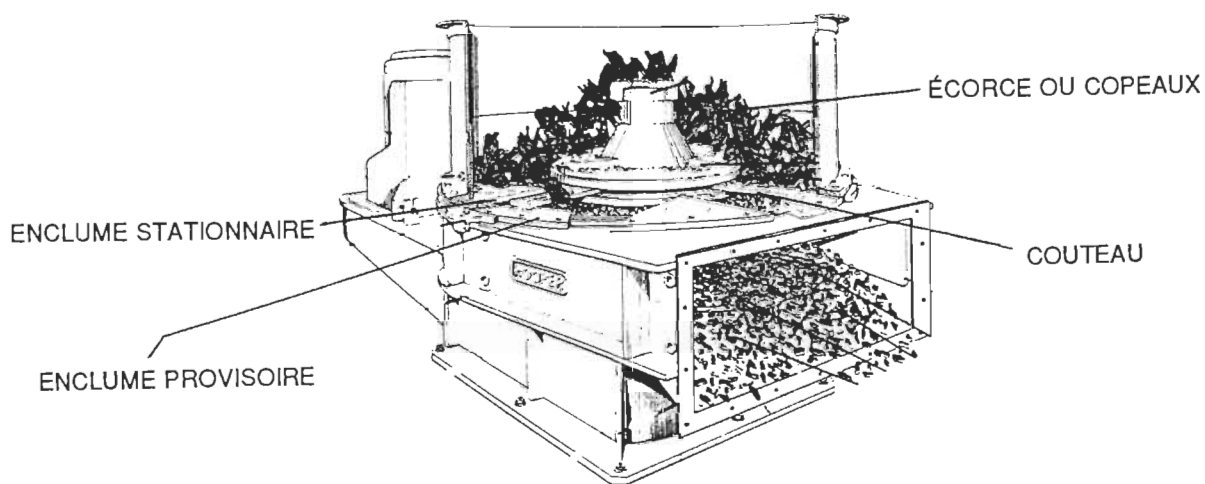


Figure 2-17. Déchiqueteur [41]

2.6.3 Impressafiner

L'Impressafiner est utilisé dans les systèmes de mise en pâte à haut rendement avec imprégnation chimique. Cet équipement est vendu par la société Andritz Sprout-Bauer.

Avant leur passage dans l'appareil, les copeaux sont habituellement chauffés atmosphériquement à la vapeur. Dans l'Impressafiner comme tel, les copeaux sont compressés par une vis sans fin et soumis à des forces de cisaillement avant d'être décompressés dans une chambre d'expansion pleine de liqueur d'imprégnation (figure 2-18). L'Impressafiner comporte aussi des barres verticales qui obligent les copeaux à modifier leur trajectoire.

Le ratio de compression varie de 2:1 à 8:1. La structure des copeaux est donc ouverte, ce qui augmente leur surface spécifique disponible pour l'imprégnation chimique. La haute compression a aussi pour but de retirer de l'eau, de l'air et des matières organiques des copeaux, comme dans les alimentateurs à bouchon. Les matières organiques les plus indésirables sont les matières colorantes et les substances responsables de la poix.

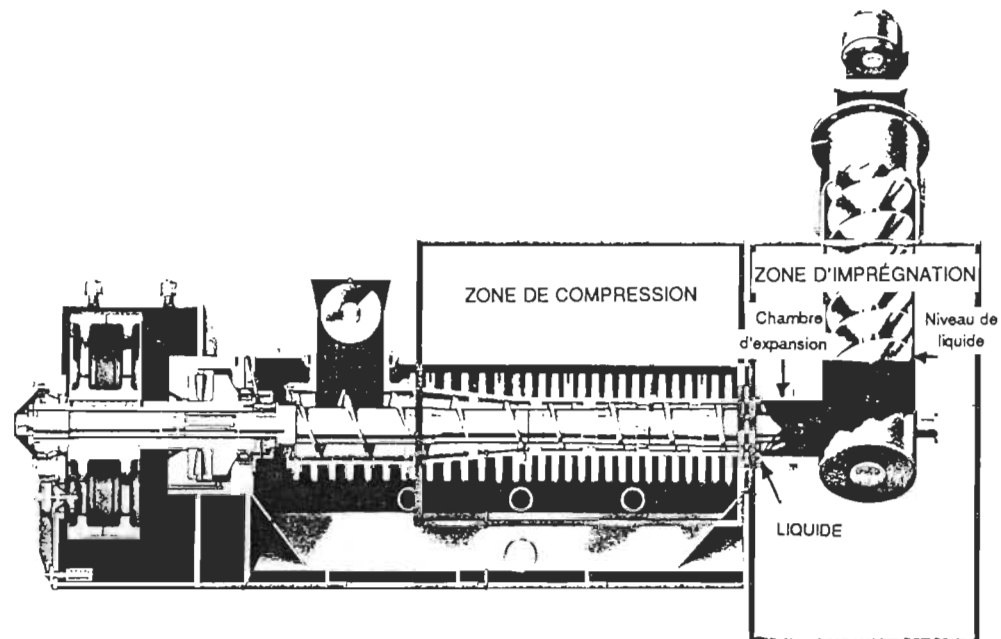


Figure 2-18. L'Impressafiner [42]

2.6.4 Bi-vis

La bi-vis a été mise au point en France, par le Centre Technique du Papier et la Société Creusot-Loire. En fait, il s'agit d'un transfert de technologie puisque un appareil du même genre est utilisé dans d'autres secteurs manufacturiers, entre autres les industries de l'alimentation et des plastiques [12, 15].

La bi-vis est constituée de deux vis horizontales qui tournent dans le même sens (figure 2-19). Les filets des vis s'entrecroisent et sont arrangés en modules de convoyage et de défibrage (la direction des filets change) [12]. Dans les modules de défibrage, les filets de l'une des vis sont munis de fenêtres, à travers lesquelles les copeaux doivent passer, ce qui provoque le défibrage. Il est possible d'ajouter des produits chimiques dans les zones de convoyage.

Pour la mise en pâte, la méthode préconisée par Kurdin et Tantaló [14] est un défibrage primaire dans la bi-vis et un traitement final dans un raffineur. D'après eux, le traitement de la bi-vis correspond à peu près à un premier stade de raffinage, mais réalisé différemment. Les fibres y subissent une torsion favorisant le déroulement en rubans des parois des fibres. Les fibres seraient aussi moins coupées [12].

L'intérêt principal de la bi-vis est sa faible consommation d'énergie, comparée à celle du raffineur. On rapporte des diminutions de consommation d'énergie de l'ordre de 25-30% autant à l'échelle pilote qu'à grande échelle, par rapport à la mise en pâte PTM [12, 14, 15]. Le tableau 2-8 donne des résultats d'usine obtenus avec un pin du sud des États-Unis.

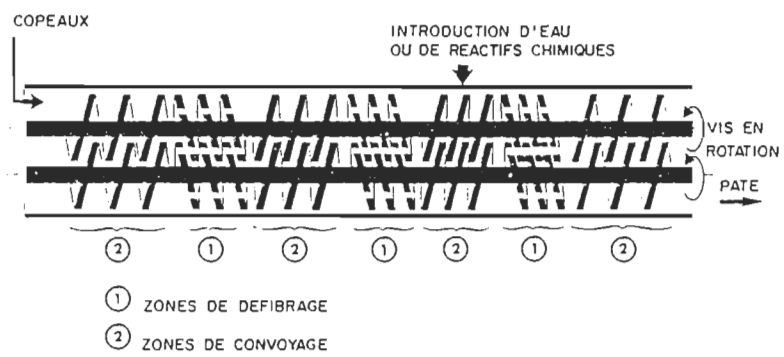
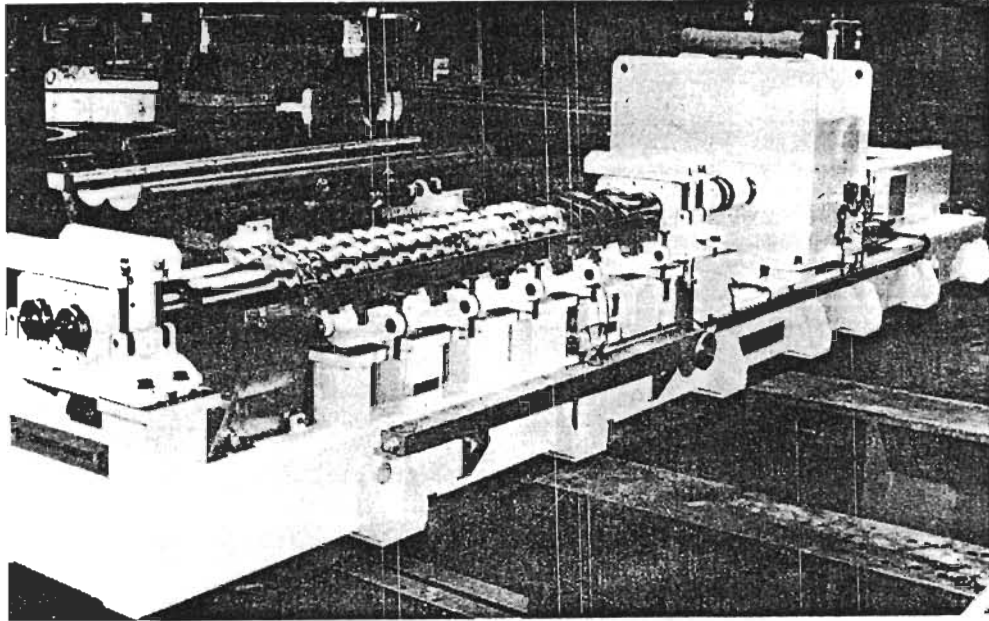


Figure 2-19. La bi-vis [12, 29]

Tableau 2-8. Résultats d'usine, bi-vis (pin du sud des É-U) [14]

	CSF (ml)	ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/tmsa)	LONGUEUR DE RUPTURE (km)
BI-VIS USINE	250	1 108	1 901
PTM USINE	292	1 700	1 999
BI-VIS PILOTE	250	1 306	1 800

2.6.5 Alimentateur à bouchon

Deux exemples d'alimentateurs à bouchon sont donnés à la figure 2-20. La caractéristique principale de cet appareil est la vis sans fin dont l'espace disponible pour les copeaux diminue de l'entrée vers la sortie. On peut définir un paramètre, appelé ratio de compression, qui est donné par le volume à l'entrée sur celui de la sortie. La compression effective des copeaux varie en fonction de la position dans l'appareil et du design de ce dernier (figure 2-21).

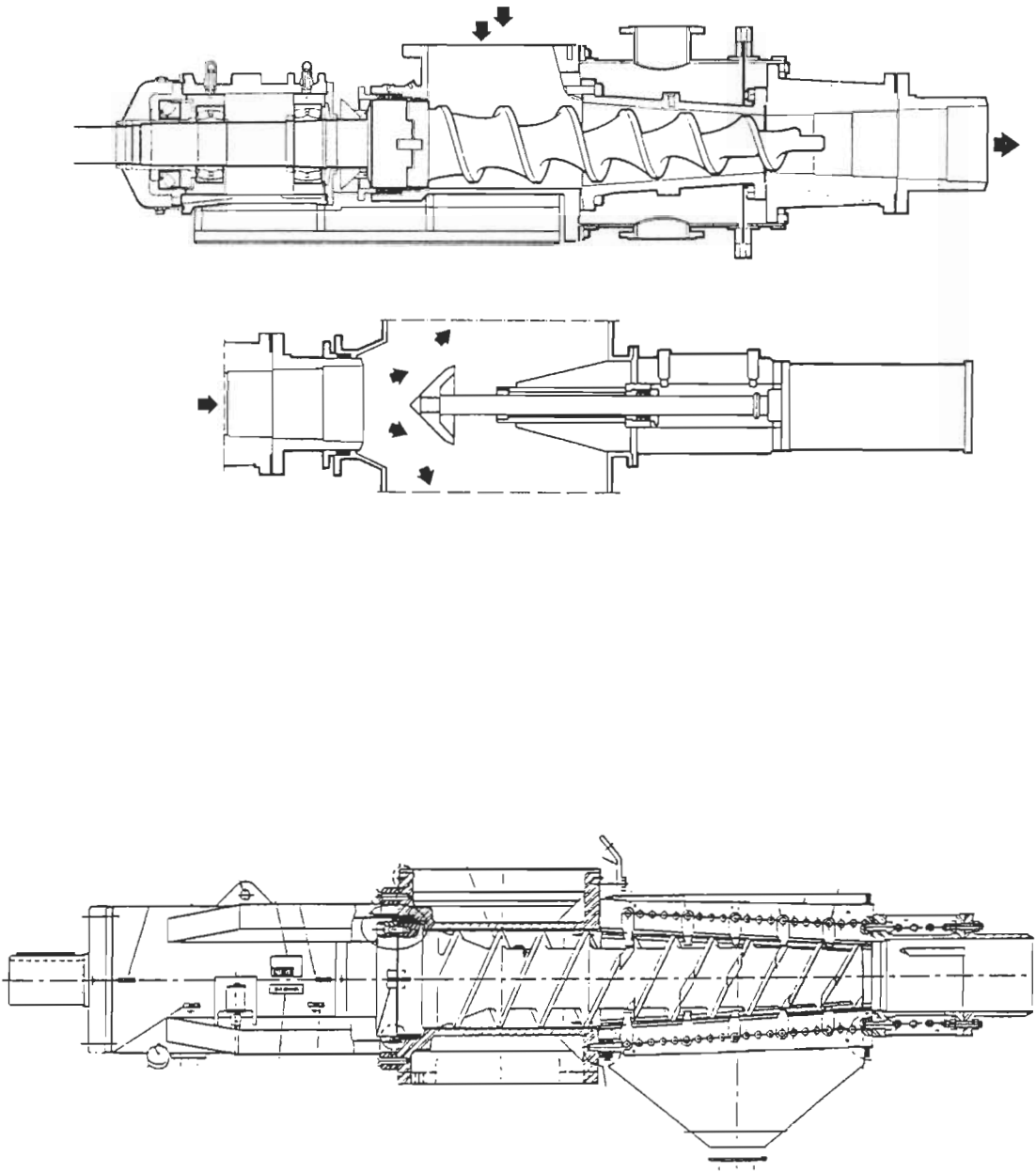


Figure 2-20. Alimentateur à bouchon [29 et Kvaerner Hymac 1992]

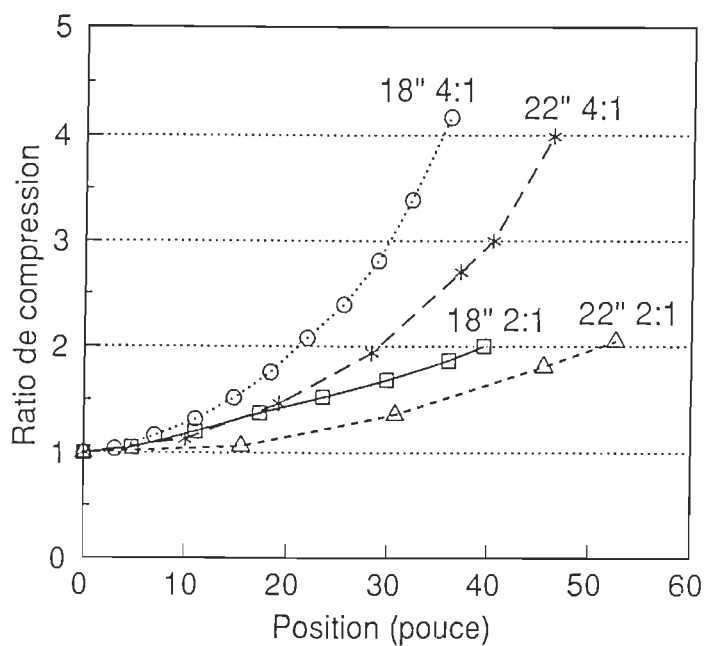


Figure 2-21. Ratio de compression pour quelques types d'alimentateurs à bouchon (source : Kvaerner Hymac 1992)

Les alimentateurs à bouchon sont utilisés pour compresser les copeaux avant l'imprégnation chimique, pour retirer l'air et le liquide. Par le fait même, ils contribuent à retirer une partie des extractibles de la matière ligneuse [16, 17]. Ces extractibles causent des problèmes de poix qui adhère aux toiles, feutres, tamis, pièces d'équipement, etc. Les résines peuvent aussi être dispersées en grosses particules et coller aux fibres. Dans ce cas, les particules se retrouvent dans le

papier et constituent des défauts [43]. Certains des produits sont néfastes pour les propriétés optiques de la pâte [29].

Lorsque les copeaux compressés sont relâchés dans la solution d'imprégnation, ils absorbent le liquide d'autant plus rapidement que le ratio de compression est grand. Lin et Hsieh [39] ont fait une simulation par ordinateur à ce sujet et ont obtenu le graphique de la figure 2-22. Les alimentateurs à bouchon servent aussi à augmenter la surface spécifique disponible pour les produits chimiques et/ou la vapeur. Finalement, ils sont parfois utilisés pour enlever la liqueur d'imprégnation résiduaire après la cuisson.

Plusieurs auteurs ont montré, en se basant sur l'expérimentation, que la compression des copeaux avant le raffinage (sous différentes formes) diminue l'énergie consommée [13, 20, 44 à 46]. Il faut cependant faire attention à l'ensemble des conditions de raffinage puisque l'énergie spécifique dépend de plusieurs facteurs. Entre autres, pour une mise en pâte de résineux au sulfite de sodium, la courbe de l'énergie spécifique en fonction du niveau de sulfonation passe par un maximum (figure 2-23). L'énergie nécessaire augmente donc pour de faibles taux de sulfonation et diminue dans la région de la PCM. Si les ratios d'absorption sont modifiés par une plus grande compression, le taux de sulfonation augmentera et influencera à la hausse ou à la baisse l'énergie spécifique, dépendant du type de

mise en pâte (PMR ou PTM, PCTM ou PCM). Par contre, pour les feuillus, l'énergie descend en fonction du contenu ionique [47].

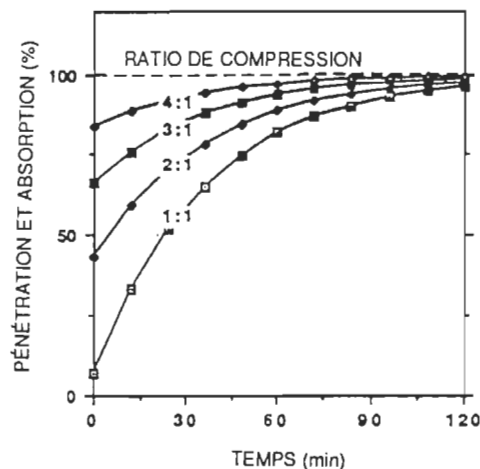


Figure 2-22. Pénétration et absorption vs ratio de compression (simulation) [39]

D'après Franzen [25], il faut un ratio de compression entre 2.2:1 et 2.8:1 pour obtenir la densité du bois. La figure 2-24 montre la progression des pourcentages d'air, d'eau et de solides dans les copeaux, pendant leur passage dans un alimentateur à bouchon. Le volume d'air diminue beaucoup avec un 2:1 mais on n'enlève que l'air situé entre les copeaux, avec les conditions spécifiées. D'après cette figure, il faut au moins un alimentateur 6:1 pour retirer tout l'air dans les conditions spécifiées. Cependant, ces résultats dépendent de la gravité spécifique

du bois, de la siccité de départ et de la densité en vrac des copeaux. Le ratio de compression nécessaire pour atteindre la densité du bois (environ 1530 kg/m^3) dépend des pourcentages d'air, de liquide et de solides dans le bois avant la compression.

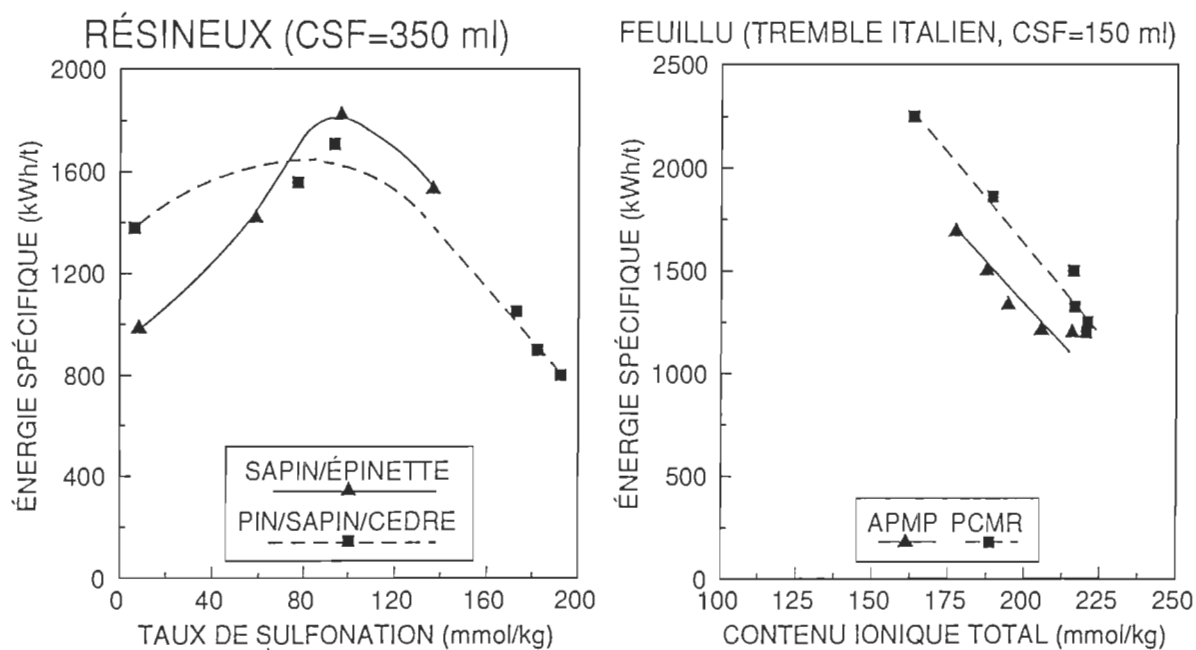


Figure 2-23. Énergie spécifique en fonction du taux de sulfonation [47]

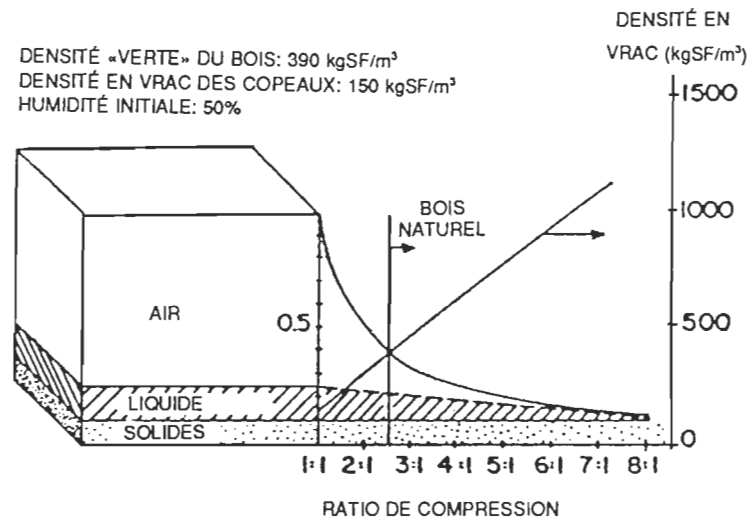


Figure 2-24. Compression des copeaux dans un alimentateur à bouchon [28]

En effet, la densité en vrac doit être assez importante à l'entrée, puisque l'air situé entre les copeaux doit être enlevé avant que ceux-ci puissent vraiment être compressés. La figure 2-25 montre des graphiques faits par l'auteur de ce mémoire pour différentes densités en vrac à l'entrée de l'alimentateur à bouchon. On voit que pour une densité de 100 kg/m³, on enlève surtout de l'air, même avec une haute compression. Cependant, avec une densité de 200 kg/m³, il serait possible d'atteindre la densité de la paroi cellulaire (donc enlever tout l'air et tout le liquide) avec un ratio de compression d'environ 7,6:1.

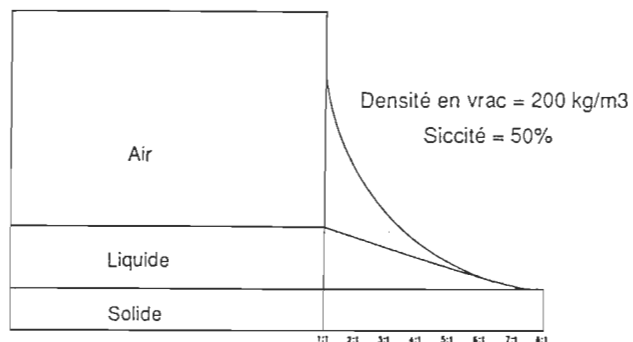
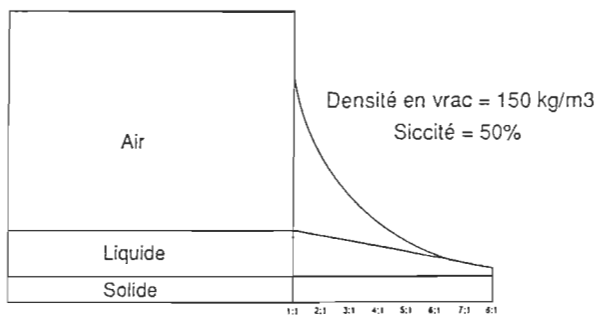
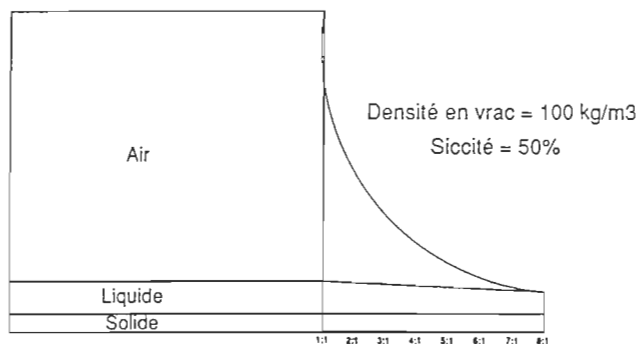


Figure 2-25. Influence de la densité en vrac à l'entrée de l'alimentateur à bouchon sur la compression

Cependant, cette illustration limite n'est que théorique puisque pour obtenir un tel résultat, il faudrait vraisemblablement augmenter la pression jusqu'à des valeurs trop élevées pour l'équipement et la matrice ligneuse. À cause de la friction trop grande, on produirait probablement de la farine de bois. Il reste qu'une augmentation de la densité en vrac à l'entrée de l'alimentateur à bouchon est positive puisqu'elle permet d'utiliser une plus grande portion de l'appareil pour la compression de la matrice ligneuse.

De plus, pour créer des changements permanents dans la paroi cellulaire, il semble qu'il faille utiliser au moins un ratio de compression 3.5:1 [25]. À des ratios plus élevés, la haute pression permet de retirer une partie de l'humidité. À ces ratios, la compression et les forces de cisaillement créent des «microcraques» [25, 44 et 45] et des «microcompressions» [18] dans la structure ligneuse. Les microcraques agissent plus tard comme sites d'activation de la séparation des fibres. Elles servent en outre à la pénétration de la liqueur de cuisson, rendant l'imprégnation plus efficace (section 2.4). Cependant, les microcraques ou microcompressions présentes en trop grand nombre risquent de diminuer les propriétés physiques de la pâte, s'il en résulte une coupure des fibres lors du raffinage.

Tel que mentionné précédemment, les microcompressions ont déjà été présentées comme un élément positif pour les propriétés en tension du papier [18]. Les microcompressions ont d'abord été identifiées dans les fibres des pâtes chimiques. Elles ont été attribuées à l'action mécanique intense lors du pompage et du mélange à haute consistance de la pâte. Les pâtes mécaniques contiendraient également des microcompressions et, d'après Page et Seth [18], elles joueraient un rôle important au niveau de la qualité des pâtes. Ces microcompressions pourraient être étirées comme des ressorts lorsque le papier est soumis à une contrainte en tension et ceci améliorerait l'allongement, réduirait le module d'élasticité et augmenterait la résistance à la fracture. Les microcompressions seraient produites également lors des opérations à haute consistance, lors du raffinage et dans les alimentateurs à bouchon et les presses à vis [17, 18].

2.6.5.1 Stress impliqués dans les alimentateurs à bouchon

La figure 2-26 présente les effets de la compression dynamique dans un alimentateur à bouchon sur les copeaux. Plusieurs types de forces sont impliqués.

Premièrement, la compression axiale provoque du flambage («buckling») ou une déformation de la structure ligneuse. La contrainte axiale a les mêmes effets, en plus d'une délamination plus prononcée. Par le passé, plusieurs auteurs ont travaillé sur l'effet de la compression sur la structure des fibres. Lorsque le bois est compressé de façon longitudinale, on assiste à la formation de plans de glissements («slip planes») [48 à 51] et de microcompressions [18].

La compression radiale et la contrainte radiale donnent l'extraction d'air et de liquide, qui favorise par la suite l'absorption et la pénétration de la liqueur dans les copeaux, lors de l'imprégnation.

Enfin, la contrainte radiale et les torsions axiale et radiale provoquent la délamination de la structure ligneuse.

Toutes les actions décrites précédemment conduisent finalement à la délamination, à la diminution de la grosseur moyenne des copeaux et à l'augmentation de la surface spécifique.

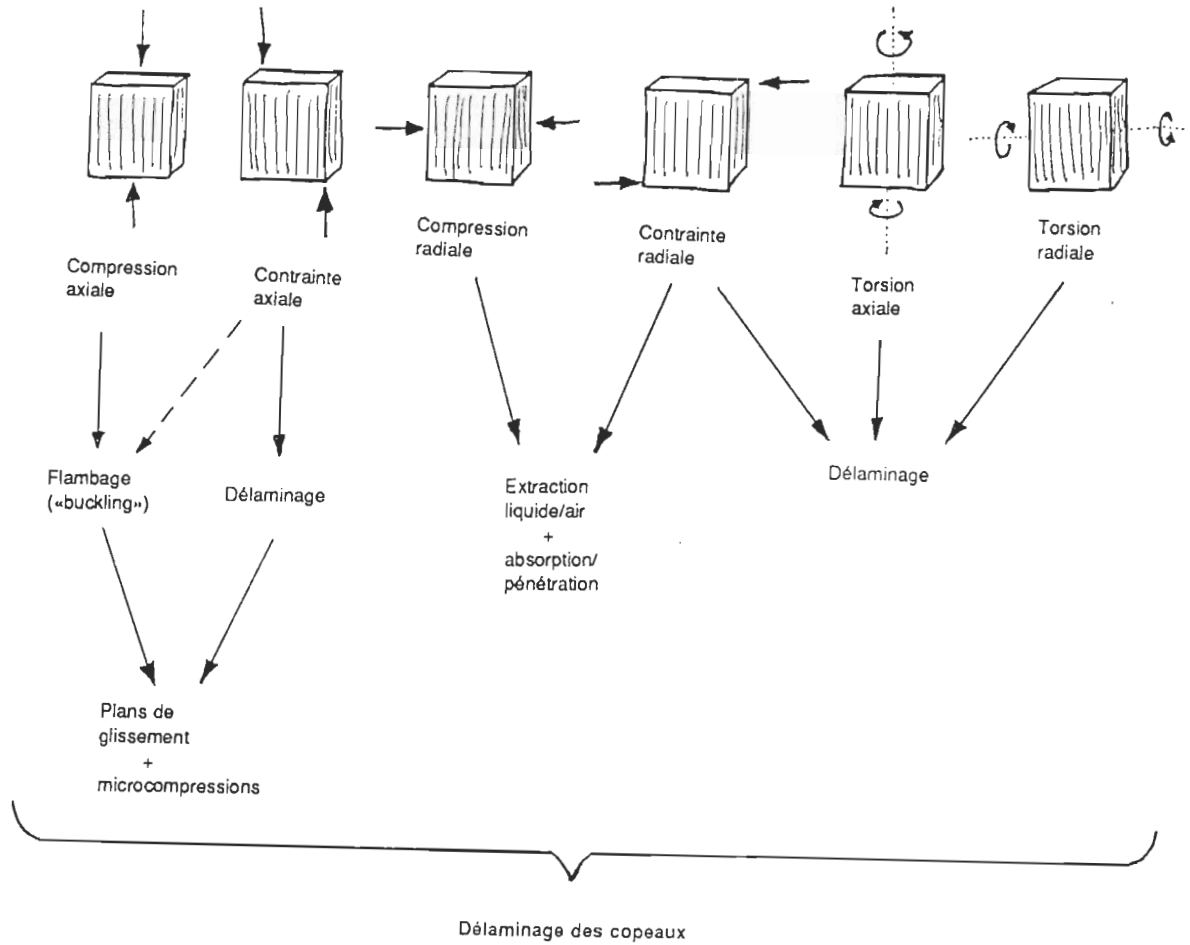


Figure 2-26. Effets sur les copeaux de la compression dans un alimentateur à bouchon moderne

2.7 Procédés de mise en pâte

Dans cette section, les procédés de mise en pâte utilisés sont passés en revue.

2.7.1 Pâte mécanique de raffineur atmosphérique (PMR)

Les pâtes mécaniques de raffineur sont produites par des compressions et décompressions successives des fibres entre les barres des plaques de raffineur. Ce traitement mécanique s'effectue à la pression atmosphérique, habituellement en deux stades de raffinage. Ceci donne une pâte de qualité supérieure à la pâte de meule, en termes de propriétés mécaniques [29]. Cependant, le bouffant (main) et le taux de bûchettes ont tendance à être élevés.

La plus grande qualité de la pâte PMR par rapport à la pâte de meule permet l'utilisation de sciures, planures, fines [52] et feuillus. D'ailleurs, la possibilité

d'utiliser les sciures avec le procédé PMR fut un des facteurs importants dans son évolution au cours des années 1960 [29].

Les variables les plus importantes au niveau du contrôle du procédé de mise en pâte PMR sont le débit d'alimentation en matière ligneuse (bois, pâte), le débit d'eau de dilution au raffineur et la distance entre les plaques [53]. Comme le débit de bois peut subir des variations relativement importantes, il en résultera une variation de l'énergie spécifique et des propriétés. Des variations de densité et de teneur en humidité des copeaux auront aussi un impact.

2.7.2 Pâte thermomécanique (PTM)

La mise en pâte thermomécanique est une modification du procédé de mise en pâte mécanique de raffineur. En effet, il y a ajout d'un traitement thermique qui dure quelques minutes, à une pression de 70 à 375 kPa [53]. Le raffinage se fait généralement en deux stades, le premier étant pressurisé et le second atmosphérique. Il existe cependant des variantes à ce niveau, incluant des systèmes à un stade ou deux stades sous pression.

Le traitement thermique a pour effet d'amener la lignine à une température supérieure à sa température de transition vitreuse. Ceci facilite la séparation des fibres [25], pour des teneurs en humidité supérieures à 25%. La séparation se fait aussi dans des conditions favorisant la conservation de la longueur des fibres, donc de meilleures propriétés mécaniques que pour la mise en pâte PMR [29].

À des températures plus élevées, la séparation des fibres peut s'effectuer dans la lamelle mitoyenne, laissant une couche de lignine sur la surface des fibres. Cette situation n'est pas souhaitable puisque la fibrillation, dont dépendent les liens inter-fibres, est alors plus difficile [29]. La température de traitement des copeaux détermine l'endroit de rupture dans la structure ligneuse (figure 2-27) [25]. Pour la mise en pâte PTM, cette séparation se fait en grande partie aux limites de la couche externe de la paroi secondaire s1/s2. Comme cette séparation est plus ordonnée que pour les mise en pâte de meule et PMR, la teneur en bûchettes est moins grande. Par contre, l'énergie spécifique nécessaire pour obtenir un certain indice d'égouttage est plus élevé [29].

D'autres facteurs influençant la qualité de la pâte PTM obtenue sont la consistance de raffinage et la distance entre les plaques. En effet, ces deux paramètres ont un impact direct sur le niveau de friction entre les fibres elles-mêmes et entre les fibres et les barres.

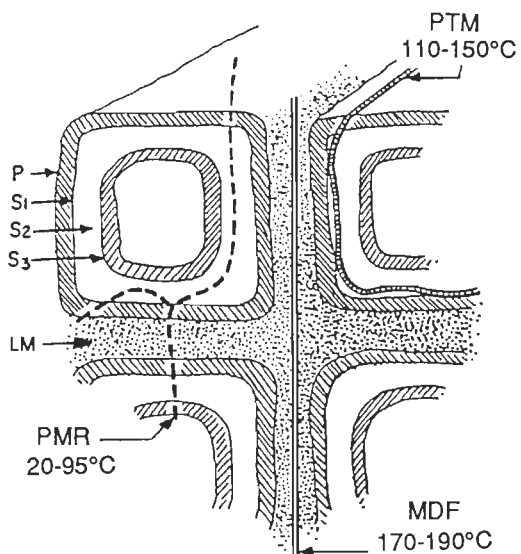


Figure 2-27. Région de rupture en fonction de la température [25]

2.7.3 Pâte chimico-mécanique de raffineur (PCMR)

La mise en pâte chimico-mécanique de raffineur implique un traitement chimique et un raffinage à la pression atmosphérique (en un ou deux stades).

Le traitement chimique peut prendre différentes formes : soude caustique (NaOH) à froid ou sulfite de sodium (Na_2SO_3) à chaud pour les résineux, ou les deux produits à chaud pour les feuillus [29]. L'ajout d'un traitement chimique par rapport à la mise en pâte PMR a un impact important sur les propriétés obtenues et la réduction d'énergie spécifique de raffinage [25, 29 et 54].

La densité du bois a un impact important sur l'intensité du traitement chimique nécessaire pour obtenir les propriétés désirées [29]. En effet, les essences à densité plus élevée nécessiteront un traitement chimique plus intense. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle on utilise la soude caustique et le sulfite de sodium pour les feuillus, qui sont plus denses que les résineux. D'après Leask [29], au moins 1.6% de soude caustique est nécessaire avec les feuillus pour obtenir une amélioration des propriétés mécaniques et une diminution de l'énergie de raffinage. Dans ce cas, l'utilité du sulfite est surtout de minimiser la perte de blancheur due à la soude.

Comme le traitement thermique de la mise en pâte PTM, le traitement chimique de la mise en pâte PCMR conduit également à une réduction du taux de bûchettes, par rapport à la mise en pâte PMR [29]. Le ramollissement créé par le traitement chimique favorise la séparation des fibres entre les lamelles s1 et s2,

comme pour la mise en pâte PTM. Les fibres de feuillus sont alors plus facilement fibrillées [30].

Aussi, la sulfonation de la lignine rend les fibres plus flexibles, tout en conservant un rendement relativement élevé [29]. Ceci se traduit par une diminution du bouffant et, tel que mentionné auparavant, une augmentation des propriétés.

2.7.4 Pâte mécanique alcaline au peroxyde (APMP^{MD})

Les feuillus sont fréquemment traités chimiquement avec de la soude caustique et du peroxyde d'hydrogène. L'imprégnation se fait habituellement en deux ou trois stades. Il est alors possible de retirer des matières extractibles du bois avant le traitement au peroxyde. Dans le premier stade, on en profite aussi pour traiter la matière ligneuse avec des produits chélatants qui limitent la décomposition du peroxyde par les ions métalliques.

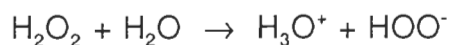
Le traitement thermique est assez doux, de l'ordre de 40°C-60°C pour 30 à 90 minutes. Le raffinage peut se faire en deux stades atmosphériques mais il arrive

que le premier soit pressurisé. Le traitement thermique est alors plus intense et se rapproche de celui de la mise en pâte PCTM [55, 56].

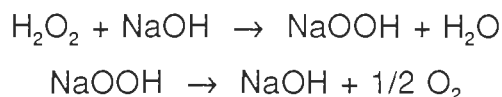
Les propriétés mécaniques et la consommation d'énergie obtenues dépendent surtout de la charge de NaOH et les propriétés optiques de la charge de H₂O₂ [57]. On peut penser qu'une partie de la soude est consommée par la réaction de blanchiment et une autre partie par les réactions physico-chimiques de ramolissement des fibres. Il serait intéressant de faire d'autres expériences pour confirmer cette observation faite à plusieurs reprises. Lorsque ce type de mise en pâte est possible, le blanchiment avant le raffinage permet d'éviter la construction d'une usine de blanchiment séparée.

Le peroxyde d'hydrogène, dont la formule chimique est H₂O₂, oxyde les groupements chromophoriques de la lignine, plus spécifiquement les quinones et les carbonyles. Il se produit donc un blanchiment au cours de la mise en pâte APMP^{MD}.

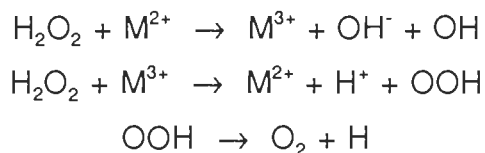
L'agent actif de ce type de blanchiment est l'ion perhydroxyl, HOO⁻, qui provient de la dissociation du peroxyde en milieu aqueux :



Cette dissociation est favorisée par un milieu alcalin. Cependant, un pH trop élevé provoque la décomposition du peroxyde en NaOH et en oxygène:



Cette décomposition indésirable est favorisée par la présence d'ions métalliques. L'effet catalytique de ces ions est plus important à de fortes alcalinités. L'oxygène produit par la réaction de décomposition réagit avec la lignine pour former des chromophores. Les ions métalliques peuvent aussi provoquer la décomposition du peroxyde par le mécanisme illustré avec le manganèse :



Donc, les ions métalliques présents dans la pâte et dans l'eau doivent être enlevés le plus possible. Pour ce faire, on utilise des produits chélatants comme le DTPA (acide diéthylène triamine pentaacétique). Celui-ci forme un complexe soluble avec les ions métalliques. Ils peuvent donc être éliminés par lavage. On ajoute aussi souvent du sel d'Epsom (MgSO_4) et du silicate de sodium (Na_2SiO_3). Les

deux produits réagissent pour former un colloïde de silicate de magnésium, qui chélate les ions métalliques.

Le silicate de sodium contribue à l'alcalinité de la solution de blanchiment. Le reste de l'alcalinité est fournie par un ajout de soude caustique (NaOH). La charge en alcalinité doit être optimisée car la courbe blancheur/alcalinité est généralement en forme de cloche. Le silicate agit aussi comme agent tamponnant en aidant à maintenir un pH approprié. Dans la mise en pâte APMP^{MP}, le NaOH contribue également à l'obtention de bonnes propriétés physiques.

D'autres variables jouent sur l'efficacité du blanchiment au peroxyde. Entre autres, il y a la propreté de la matière ligneuse, l'efficacité de mélange bois/produits chimiques, la consistance, la température, le temps de rétention, la neutralisation après blanchiment s'il y a lieu, etc.

3.0 EXPÉRIMENTATION

3.1 Approvisionnement en bois

Des billes de tremble italien ont été mises en copeaux à la station Forestière Duchesnay, Québec. Les copeaux de sapin/épinette ont été obtenus de la société Kruger à Trois-Rivières. Les copeaux de tremble provenaient de l'est du Canada. Finalement, de petites quantités de copeaux de bouleau blanc et de pin gris en provenance de l'est du Canada ont été utilisées pour des observations au microscope stéréoscopique.

3.2 Classification des copeaux

Afin d'uniformiser la distribution des copeaux, ces derniers ont été classifiés à l'aide du classificateur à disques rotatifs de RADER, modèle M-2215. Ce dernier classifie les copeaux selon leur épaisseur et 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 plus épais causeraient des problèmes au niveau de l'alimentation de l'usine pilote.

3.3 Lavage des copeaux

Le lavage des copeaux est nécessaire afin d'éliminer les particules indésirables (sable, pierres, bouts de métal, etc). Ces dernières peuvent causer des

bris d'équipement. Le lavage se fait dans un bassin qui permet la déposition des particules plus denses que le bois.

3.4 Observation des copeaux au microscope

La progression de teinture à partir d'un trou carré dans un copeau (figure 3-1) a été observée à l'aide d'un microscope stéréoscopique à zoom WILD M8, muni d'un appareil photographique.

Les trous carrés ont été faits à l'aide d'un couteau OLFA. L'Ériochrome-black-T a été utilisé comme teinture.

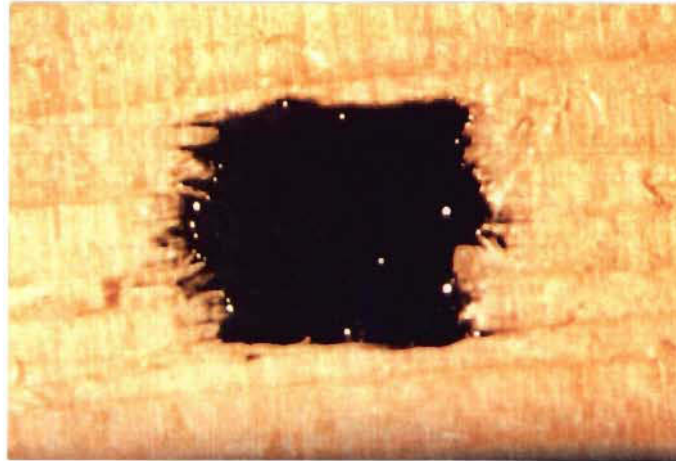


Figure 3-1. Copeau pour observation au microscope stéréoscopique

3.5 Compression statique de copeaux

Des compressions ont été effectuées dans un piston cylindrique de 15,1 cm de diamètre et 12 cm de haut. Ce piston est muni d'un grillage, au fond, ce qui permet de récupérer le liquide extrait des copeaux (figure 3-2). Une presse de

laboratoire CARVER (figure 3-3) a été utilisée de concert avec le piston, pour la compression.

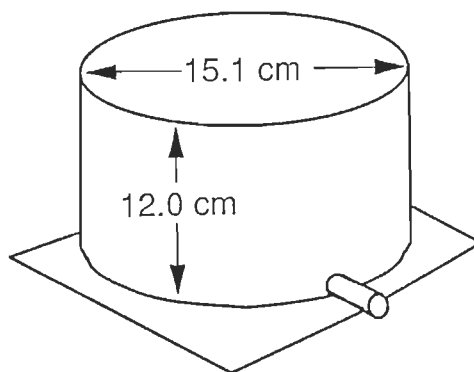


Figure 3-2. Piston pour la compression des copeaux

3.6 Mise en pâte

Une partie de l'expérimentation s'est déroulée à l'échelle laboratoire et l'autre à l'échelle pilote. Cependant, dans tous les cas, le délaminage des copeaux a été fait à l'échelle pilote dans un alimentateur à bouchon Sunds PR-4 faisant partie

intégrante de l'unité pilote du Centre de Recherche en Pâtes et Papiers, Université du Québec à Trois-Rivières. Le ratio de compression de cet alimentateur à bouchon est 2:1. Avant leur passage dans l'alimentateur à bouchon, les copeaux ont été prétraités à la vapeur pendant 10 à 15 minutes.

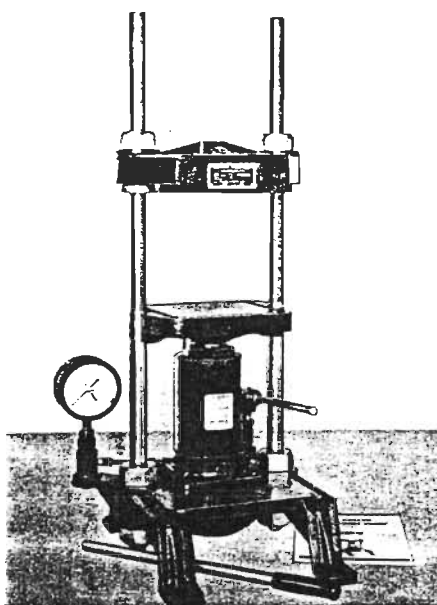


Figure 3-3. Presse de laboratoire CARVER

À l'échelle pilote, on retrouve les mises en pâte PMR, PTM, PCMR et APMP^{MD}. Les PMR et PTM ont été faites pour évaluer l'effet du taux de délaminage sans prétraitement chimique. Au niveau laboratoire, des mises en pâte PCMR et APMP^{MD} ont été effectuées.

3.6.1 Imprégnation à l'échelle pilote

L'imprégnation et la mise en pâte à l'échelle pilote ont été effectuées dans l'usine pilote Sunds du CRPP, UQTR (figure 3-4). Cet appareillage comprend quatre parties principales : le système d'alimentation, l'imprégnateur, le lessiveur et le raffineur.

A) Le système d'alimentation

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

B) L'imprégnateur PREX

L'imprégnateur est situé à l'intérieur du lessiveur. Lors de la production de la pâte chimico-mécanique, la liqueur de produits chimiques est ajoutée à cet endroit.

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. Le temps de rétention peut varier de 5 à 30 minutes et est ajusté en réglant la vitesse de rotation de la vis de décharge du lessiveur.

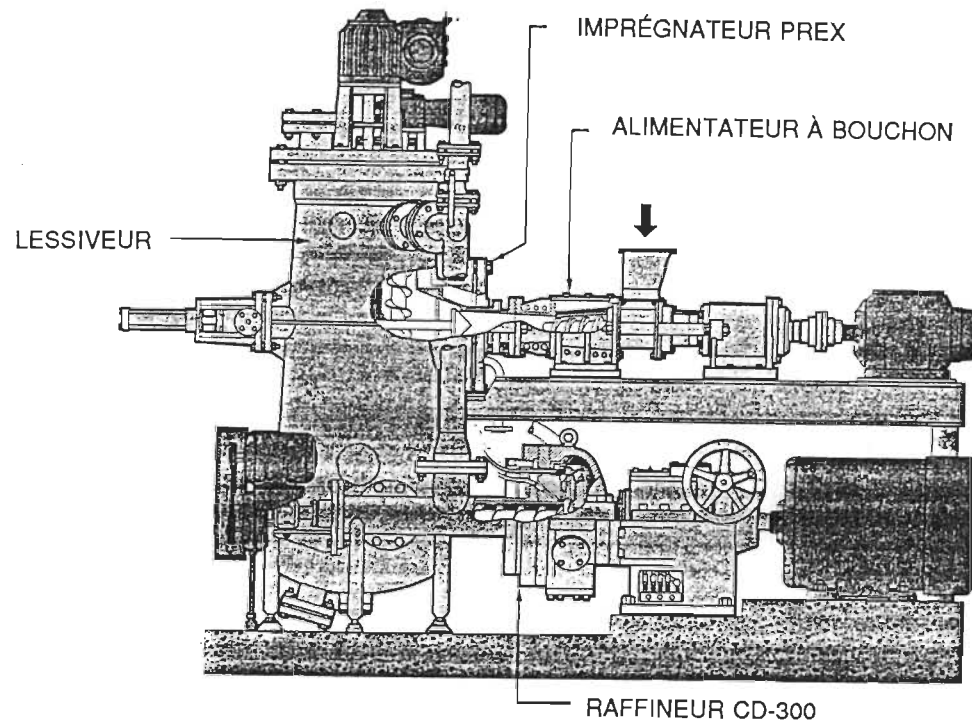


Figure 3-4. Unité pilote d'imprégnation, de cuisson et de raffinage Sunds-Defibrator

D) Le raffineur

Après traitement dans le lessiveur, les copeaux sont alimentés au raffineur par deux vis de transfert. Le raffineur de type CD300 est constitué de deux disques plats de 300 mm de diamètre dont l'un est fixe (le stator) et l'autre est mobile (le

rotor). Le rotor tourne à une vitesse maximale de 3600 tours par minute. À la périphérie des disques plats se trouve la partie conique de 50 mm de largeur. 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 se fait par l'ajout d'eau de dilution dans les zones des disques plats et des disques coniques.

L'absorption de liqueur a été évaluée en prélevant des échantillons de copeaux avant et après l'imprégnation et en mesurant leur contenu en humidité.

3.6.2 Imprégnation chimique en laboratoire

Au niveau laboratoire, l'imprégnation chimique se fait dans des chaudières de plastique, avec un temps de trempage d'une minute. Le ratio liqueur/bois utilisé est grand, variant entre 15 et 30. La quantité de bois utilisée est toujours 20 g secs.

Suite au trempage, l'excédent de liqueur est retiré à l'aide d'un filtre Buchner ou, lors des derniers essais, d'un système de tamisage pour les poudres (figure 3-5). La procédure a été modifiée car le filtre à vide avait tendance à retirer trop de liquide des copeaux lorsqu'ils étaient très délamérés. Lorsque l'absorption de liqueur a été mesurée, ce fut par pesée avant et après l'imprégnation.

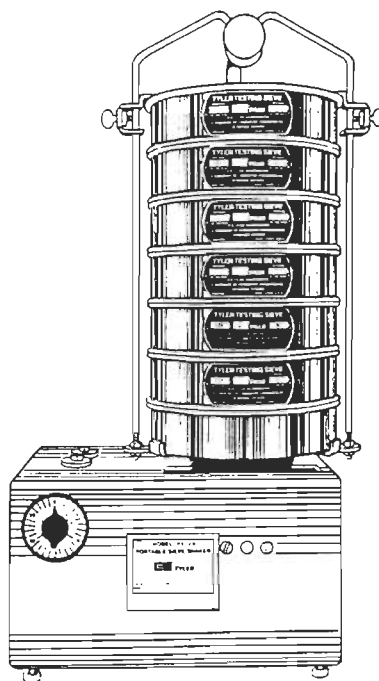


Figure 3-5. Système pour l'égouttage des copeaux

Le traitement thermique s'effectue dans un bain d'eau à contrôle thermostatique, pour une durée variant entre 15 et 45 minutes, à une température de 60°C ou 70°C.

Suite au traitement thermique, les copeaux sont «dilués» dans l'eau déminéralisée à une consistance de 1%, pour arrêter la réaction. Ils sont ensuite filtrés.

3.6.3 Mise en pâte à l'holocellulose

L'objectif de cette mise en pâte est de séparer les fibres des copeaux plus ou moins délaminés, de façon à pouvoir évaluer la longueur des fibres et les propriétés des pâtes et papiers avec des fibres non raffinées. Alors, la seule coupe des fibres subie par les fibres peut être imputée au traitement mécanique dans l'alimentateur à bouchon, pour les pâtes non battues.

La mise en pâte à l'holocellulose a été utilisée par Bonin [58] dans le cadre de ses recherches sur les résidus du bois.

La mise en pâte est faite avec 25 g secs de copeaux, 300 ml d'acide acétique glacial et 300 ml de peroxyde d'hydrogène à 40%. Le tout est amené à une température de $90^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ pour une période de 55 minutes. La pâte ainsi produite est lavée trois fois avec 1500 ml d'eau déminéralisée. Ensuite, elle est tamisée à l'aide de l'appareil Sommerville, pour enlever les incuits et les bûchettes.

Finalement, des pâtes à différents indices d'égouttage sont obtenues par battage dans la pile PFI (méthode TAPPI T248 cm-85).

3.7 Évaluation des propriétés

Les feuilles ont été produites d'après la méthode TAPPI T205 om-88 pour l'évaluation des propriétés physiques. Lorsque seules les propriétés de réflexion

(blancheur et coordonnées de couleur) devaient être évaluées, les feuilles ont été produites d'après la méthode TAPPI T218 om-83.

3.7.1 Mesure du taux de délaminage des copeaux

La distribution de la grosseur des copeaux est évaluée à l'aide d'un tamis William. Les copeaux sont déposés sur le tamis supérieur d'un ensemble de tamis qu'on fait vibrer pendant 15 minutes. Les échantillons de tous les tamis sont ensuite pesés, ce qui permet de calculer la distribution de grosseur des copeaux. Les ouvertures des différents tamis sont respectivement 1+1/8", 7/8", 5/8", 3/8" et 3/16". La méthode standard ACPP D.27H ressemble beaucoup à la procédure utilisée. La distribution de grosseurs de copeaux permet de calculer le taux de délaminage avec la formule présentée à la section 2.5.3.

3.7.2 Propriétés des pâtes et papiers pour les mises en pâte à l'échelle pilote

Un échantillon de chaque pâte produite selon des conditions de mise en pâte et des niveaux d'énergie spécifique différents a été prélevé pendant une durée de 60 secondes. Ainsi, une quantité suffisante de pâte a été récupérée, permettant l'évaluation des propriétés des pâtes et papiers. L'évaluation du taux de production nécessaire pour le calcul de l'énergie spécifique s'est faite à partir de cet échantillon. Les différentes pâtes ont ensuite été désintégrées à chaud pendant deux minutes, à l'aide d'un désintégrateur Domtar (méthode ACPP C.8P). Cette étape permet d'éliminer la latence des fibres produite par le raffinage.

Par la suite, les pâtes ont été testées selon les normes de l'ACPP ou de TAPPI présentées au tableau 3-1. Les feuilles sont formées selon la méthode C.4 de l'ACPP. Les papiers ont ensuite été entreposés pendant 24 heures dans une chambre à atmosphère contrôlée où la température était maintenue à 23°C et 50% d'humidité relative. Finalement, elles ont été testées d'après les méthodes du tableau 3-2.

Tableau 3-1. Normes standard pour les pâtes

ESSAIS PHYSIQUES	Norme ACPP	Norme TAPPI
Enlèvement de la latence	C.8P	-
Concentration de la pâte	D.16	-
Indice d'égouttage	C.1	T227 om-85
Taux de rejets Pulmac	-	-
Classification Bauer-McNett	-	T233 cm-82

La longueur moyenne des fibres et les distributions de longueurs de fibres ont été déterminées à partir de la classification Bauer-McNett des pâtes (norme TAPPI T233 cm-82) [59].

Tableau 3-2. Normes standard pour les papiers

ESSAIS PHYSIQUES	Norme ACPP	Norme TAPPI
Fabrication des feuilles	C.4	-
Conditionnement du papier	A.4	-
Grammage du papier	D.3	-
Essais physiques des feuilles	D.12	-
Épaisseur	D.4	-
Longueur de rupture	-	T494 om-88
Indice d'éclatement	-	T403 om-85
Indice de déchirure	-	T414 om-88
Blancheur Technibrite TB-1C	-	T452 om-87
Opacité	-	T425 om-86
Coefficient de diffusion de la lumière	-	T425 om-86
Coefficient d'absorption de la lumière	-	T425 om-86

3.7.3 Propriétés des pâtes et papiers pour les pâtes produites en laboratoire

Les copeaux traités chimiquement en la boratoire ont été mis en pâte dans un mélangeur domestique Osterizer B-8814 de Sunbeam. Noter que seules les propriétés optiques, des propriétés des effluents et les contenus ioniques ont été mesurés pour ces pâtes.

Pour les propriétés optiques, les mêmes méthodes que pour les pâtes produites à l'échelle pilote ont été utilisées (section 3.9.2). Pour ce qui est des effluents, la DCO et les solides dissous ont été évalués dans certains cas, avec les méthodes standards H.1 et H.3 de l'ACPP. De plus, les contenus ioniques ont été mesurés avec la méthode de Katz *et al* décrite dans la référence [60].

3.7.4 Propriétés des pâtes et papiers pour les pâtes à l'holocellulose

La longueur des fibres a été mesurée à l'aide d'un appareil Kaajani FS-100, d'après la méthode TAPPI T271 pm-91. Les viscosités ont été évaluées avec la méthode TAPPI T254 cm-85.

Les méthodes énumérées à la section 3.9.2 pour les pâtes produites à l'échelle laboratoire ont été utilisées pour évaluer les propriétés physiques.

4.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Conformément aux objectifs définis à la section 1.0, la section 4.1 traite des effets primaires de la compression et du délaminage des copeaux sur la morphologie des copeaux eux-mêmes. La section 4.2 présente l'effet de ce même traitement mécanique sur les fibres. Enfin, la partie 4.3 traite de l'impact du délaminage sur le produit final (pâtes et papiers).

4.1 Effets primaires sur les fibres et sur les copeaux

La compression des copeaux change la morphologie des copeaux eux-mêmes (et des fibres) et il faut trouver une façon de caractériser l'effet de cette action mécanique. Ceci permet par la suite d'exprimer l'effet du délaminage sur d'autres paramètres. C'est ainsi que, dans le cadre de ce travail, le taux de délaminage (section 2.5.3) a été défini. La compression extrait aussi de l'air et du

liquide des copeaux et a un impact sur le niveau d'absorption lors de l'imprégnation. Ces sujets seront donc traités aux sections 4.1.1 et 4.1.2.

4.1.1 Compression statique des copeaux

Cette «compression statique» est effectuée à l'aide d'un piston et d'une presse de laboratoire (section 3.6), sur des copeaux de sapin/épinette. On dit que la compression est statique car il y a très peu de mouvement relatif entre les copeaux, donc peu de cisaillement. Pendant la compression, la pression augmente et du liquide est évacué par le fond du piston. Toutefois, les copeaux ne subissent pas réellement de délaminage puisqu'ils conservent sensiblement les mêmes dimensions après décompression.

Les expériences avec des pistons statiques fournissent des données pour le design des équipements qui compressent la matière ligneuse, entre autres la pression nécessaire pour obtenir un certain ratio de compression.

D'après la figure 4-1, la pression appliquée sur le piston augmente avec des ratios de compression élevés. En effet, avec le piston et un mélange de sapin/épinette à 40% de siccité, il faut appliquer 600 psi pour atteindre un ratio de compression de 3,73.

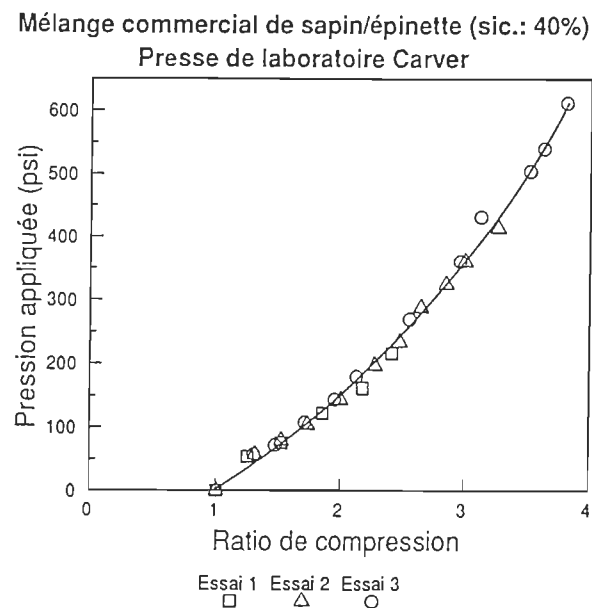


Figure 4-1. Pression en fonction du ratio de compression

La quantité de liquide enlevé est faible jusqu'à une pression de 250 psi (figure 4-2). Cependant, une partie du liquide se retrouve au-dessus du piston métallique et est réabsorbée après le relâchement de la pression. Cette liqueur serait vraisemblablement évacuée dans un système dynamique. Une partie de l'eau

contenue dans les fibres est liée à la cellulose et est difficile à retirer par compression. L'autre partie se situe dans les ouvertures et est considérée comme étant libre. Mais même si on enlevait toute l'eau présente, on atteindrait éventuellement un plateau en augmentant la pression. Celui observé au cours de cette expérimentation est bas puisqu'il se situe environ au quart du liquide présent. La quantité de liquide évacué est aussi représentée en fonction du ratio de compression, à la figure 4-3.

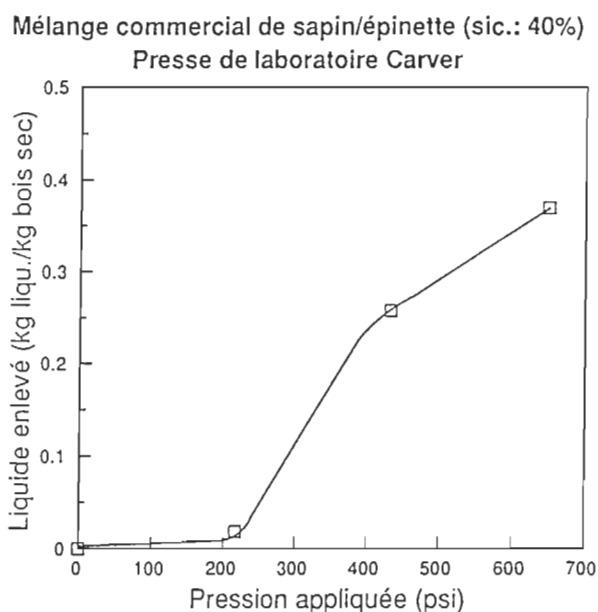


Figure 4-2. Liquide enlevé en fonction de la pression

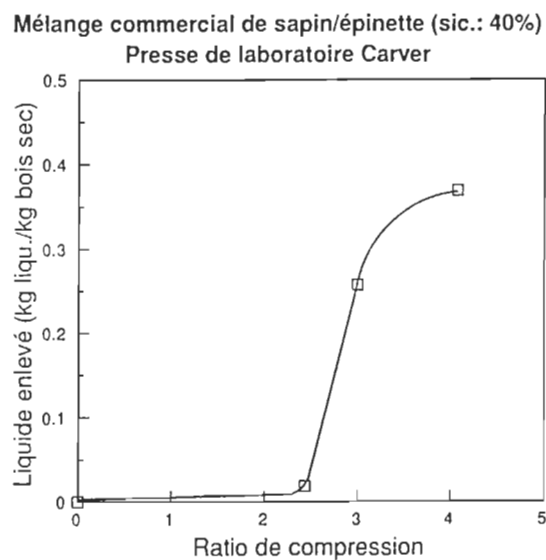


Figure 4-3. Liquide enlevé en fonction du ratio de compression

Il faut aussi réaliser que le piston est petit (15,1 cm de diamètre et 12 cm de profondeur) et qu'il y a certainement des effets de bouts. Il est donc nécessaire de poursuivre l'expérimentation à une échelle plus importante, avec un appareil dynamique.

4.1.2 Compression dynamique des copeaux

Dans un alimentateur à bouchon, les copeaux subissent des forces de compression et de cisaillement entre le métal et le bois et entre les copeaux eux-mêmes. Du liquide est aussi extrait des copeaux, au fur et à mesure que la compression a lieu (tangentielllement à l'axe de l'appareil). C'est pourquoi on parle de «compression dynamique». Lors de cette étude, la compression dynamique a été effectuée dans l'alimentateur à bouchon de l'usine pilote du CRPP, UQTR.

Avec ce type d'appareil, les copeaux subissent un délaminage et une augmentation de leur surface spécifique. En effet, on remarque à la figure 4-4 que les copeaux de tremble n'ayant passé aucune fois dans l'alimentateur à bouchon sont plus gros que ceux ayant passé trois fois. De plus, d'après la figure 4-4, il semble que le délaminage se produise principalement dans le sens des fibres. Finalement, on peut voir que plusieurs copeaux sont étirés comme des accordéons, ce qui augmente la surface disponible pour la liqueur de produits chimiques. Donc, l'imprégnation se fera de façon plus rapide et plus uniforme.

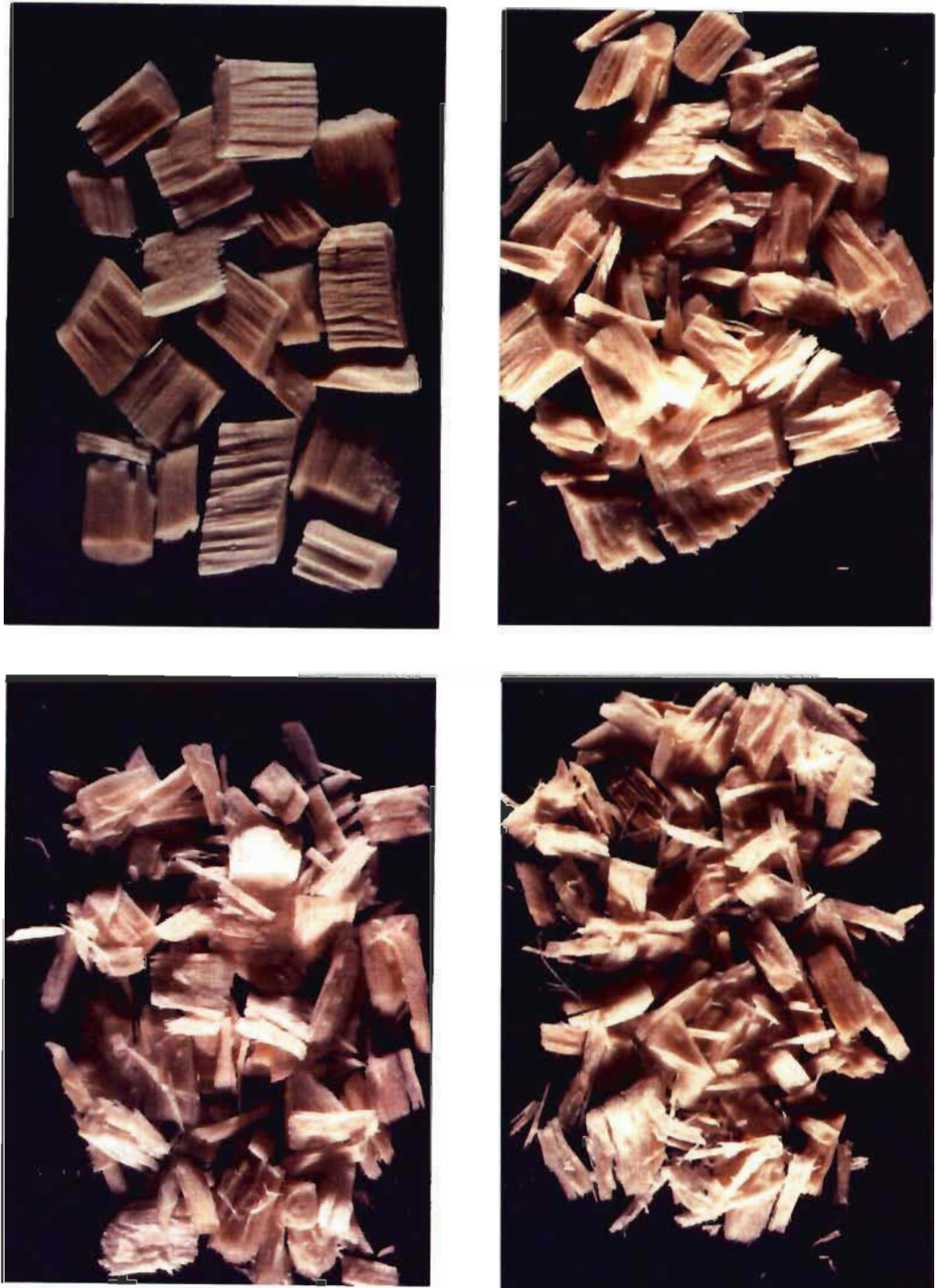


Figure 4-4. Copeaux passés zéro, une, deux et trois fois dans l'alimentateur à bouchon

La figure 4-5 montre les distributions de grosseur de copeaux suite à des passages successifs dans l'alimentateur à bouchon. On voit que la distribution se dirige vers les plus petites fractions avec le nombre de passages qui augmente.

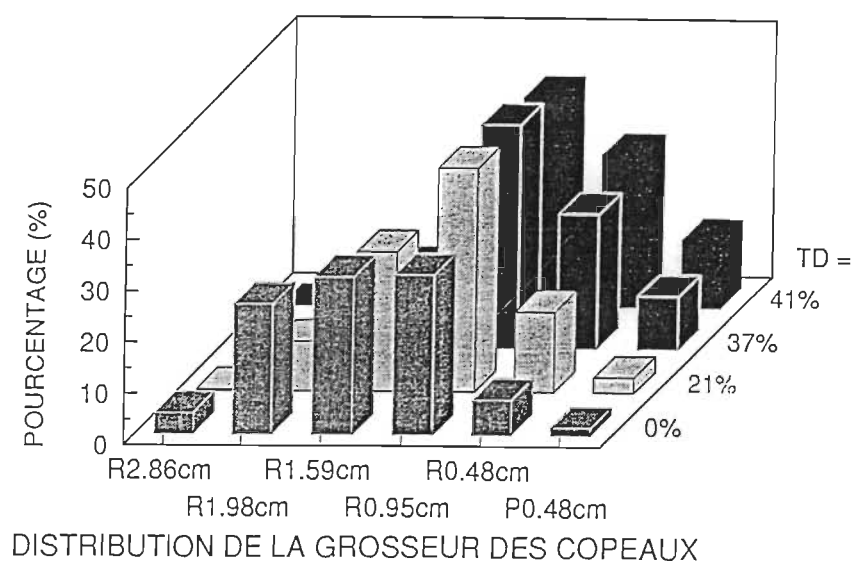


Figure 4-5. Distribution de grosseur de copeaux (tremble frais)

Ce sont ces distributions qui permettent de calculer la dimension moyenne (par poids) des copeaux. Par la suite, on évalue le taux de délaminage avec la formule présentée à la section 2.5.3. Les valeurs sont toujours reliées à la dimension moyenne des copeaux originaux, auxquels on attribue un taux de

délaminage de 0%. Donc, le taux de délaminage est un paramètre relatif et dépend de la distribution originale des copeaux.

C'est ainsi que l'on obtient le graphique du taux de délaminage pour du tremble frais et du tremble âgé de dix mois (figure 4-6). Les distributions originales sont données à la figure 4-7 et sont semblables. On voit à la figure 4-6 que le tremble frais se délamine moins. Le fait que le tremble soit une essence sensible aux champignons peut être la cause de ce phénomène. En effet, les vieux copeaux avaient de petites taches foncées sur leur surface. Cependant, il est aussi possible qu'il soit plus facile de délaminer des vieux copeaux à cause d'une question d'humidité.

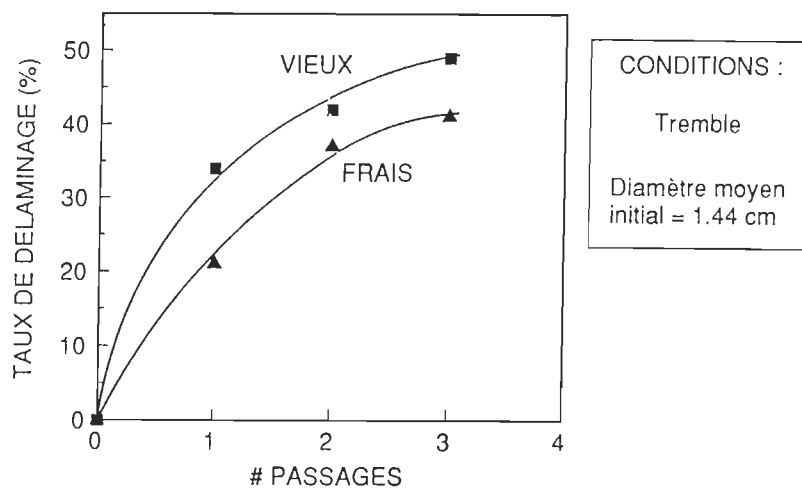


Figure 4-6. Taux de délaminage pour le tremble

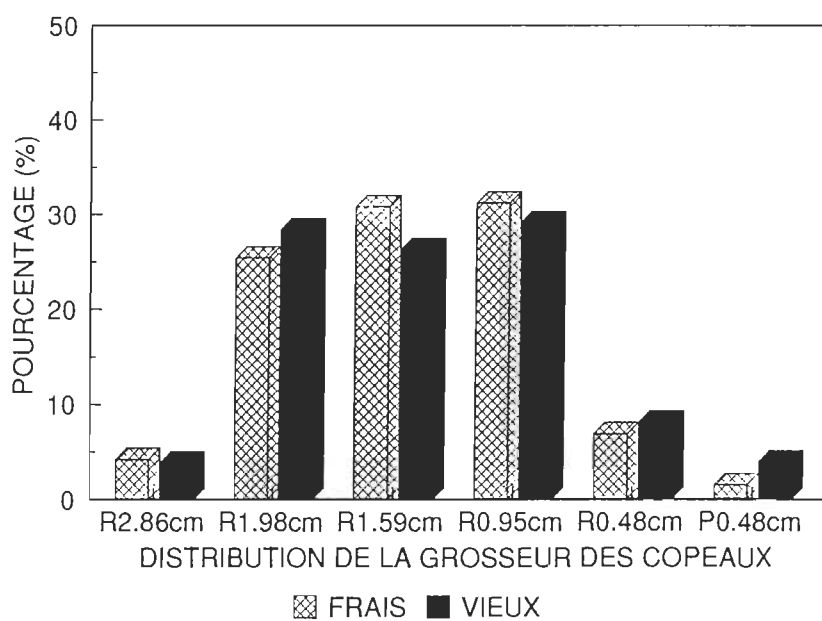


Figure 4-7. Distributions originales des copeaux de tremble

Pour ce qui est du mélange sapin/épinette, on a obtenu l'effet observé à la figure 4-8. Encore une fois, le délaminage augmente avec le nombre de passages dans l'alimentateur à bouchon. Cette augmentation est plus importante que pour le tremble, surtout si on considère les dimensions initiales des copeaux.

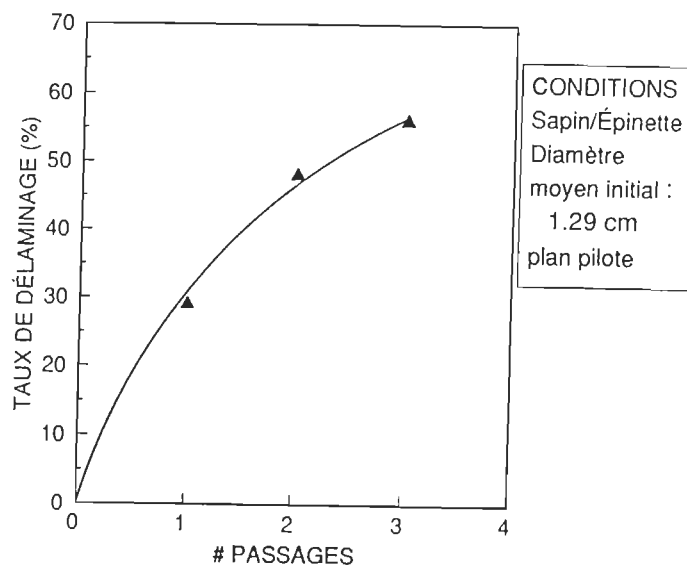


Figure 4-8. Taux de délaminage pour le mélange sapin/épinette

4.2 Effets primaires sur les fibres

Dans le but de comprendre l'effet du délaminage des copeaux sur les caractéristiques des fibres, des cuissons chimiques à l'holocellulose (CH_3COOH et H_2O_2) ont été effectuées avec des copeaux compressés et non compressés.

Un mélange de copeaux de sapin/épinette avec une dimension moyenne initiale de 1,29 cm a été utilisé pour cette partie de l'expérimentation. Les taux de délaminage de 0% et 56% ont été comparés.

Premièrement, on remarque à la figure 4-9 que l'énergie nécessaire pour atteindre un certain indice d'égouttage est plus basse avec les copeaux plus délaminés.

Les viscosités au cupriéthylènediamine ont été évaluées pour les deux pâtes initiales, non battues à la pile PFI. Les résultats ont été 6,1 cP pour les copeaux non délaminés et 4,1 cP pour les copeaux à un taux de délaminage de 56%. C'est donc dire que la cellulose a été très attaquée par le traitement chimique, et encore plus dans le cas des copeaux délaminés. Les nombres de Kappa n'ont pas pu être évalués car ils étaient trop bas (même avec la méthode modifiée de SCAN TEST).

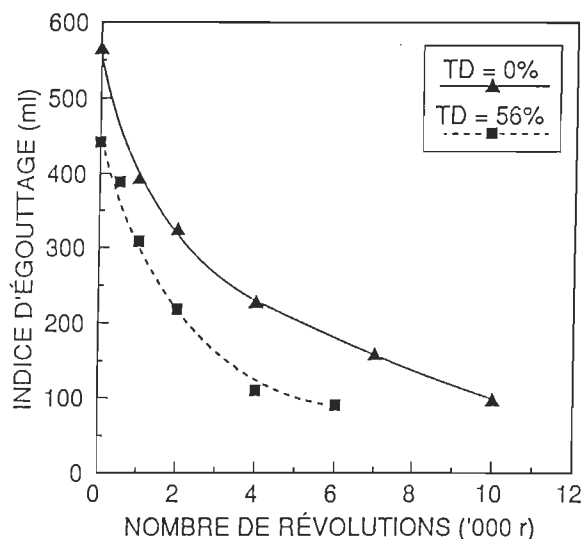


Figure 4-9. Indice d'égouttage en fonction du nombre de révolutions, PFI (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)

Cette différence de viscosité, couplée avec l'effet de la compression intense sur les copeaux, explique les écarts existant au niveau de la consommation d'énergie (figure 4-9) et les longueurs de fibres (figure 4-10). Dans ce dernier cas, on observe un déplacement de la distribution de longueur de fibres vers les valeurs plus petites, alors que le délaminage augmente. On peut imaginer que les microcompressions contribuent à la diminution de longueur des fibres, si ces dernières sont comprimées dans le sens longitudinal. Il y a probablement aussi de la coupe des fibres puisque la diminution de longueur est importante et puisque les fractions courtes augmentent beaucoup.

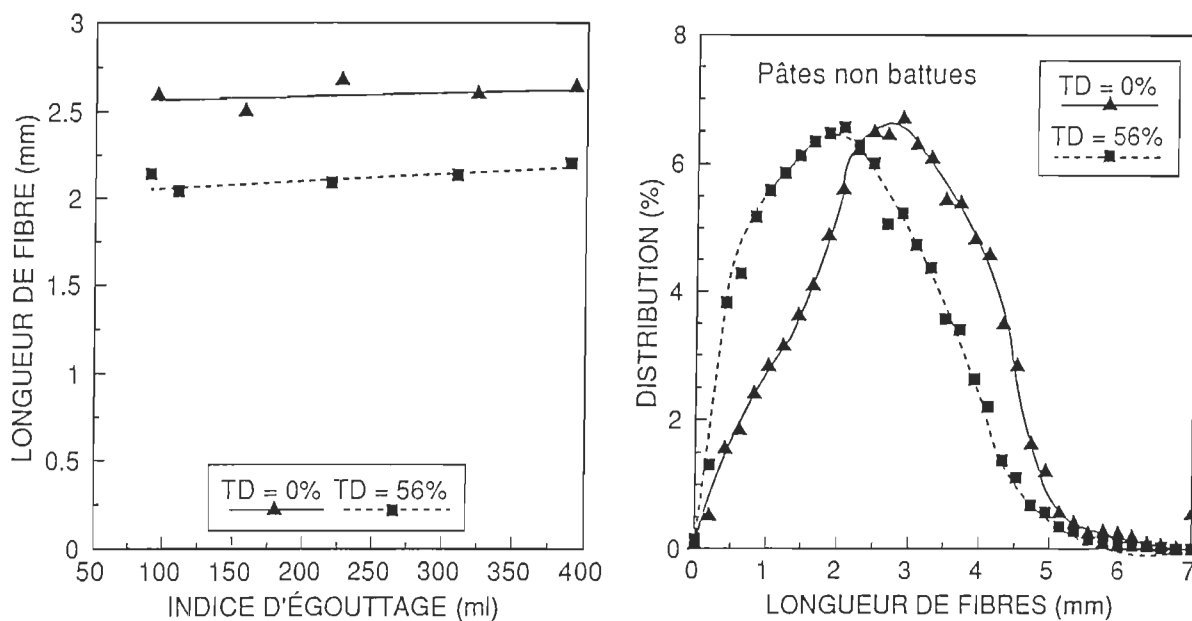


Figure 4-10. Longueur des fibres et distributions des longueurs de fibres (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)

Les densités des papiers fabriqués avec les pâtes des deux taux de délaminage sont représentées à la figure 4-11. En général, le papier correspondant au taux de délaminage le plus élevé est le plus dense. En effet, les fibres plus courtes dans ce cas expliquent que le réseau fibreux soit plus serré.

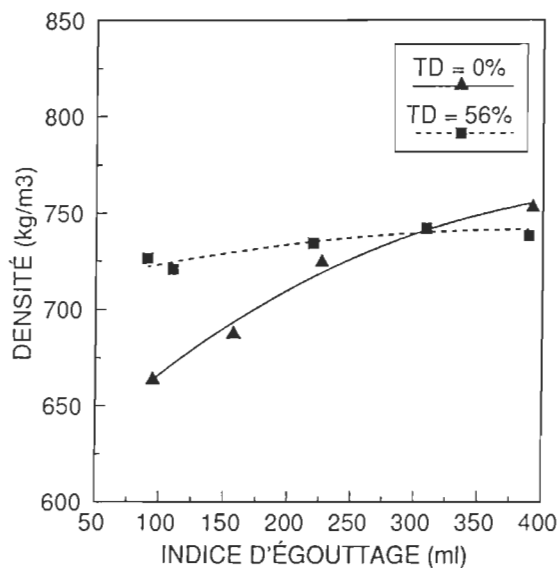


Figure 4-11. Densités des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)

Page et Seth [18] ont montré que les effets sur les fibres des pâtes mécaniques peuvent être interprétés à partir des propriétés physiques. Entre autres, la courbe longueur de rupture vs allongement permet de détecter la présence de microcompressions dans certains cas.

La figure 4-12 montre certaines propriétés mécaniques des papiers en fonction de l'indice d'égouttage. Bien que les fibres soient relativement longues, les valeurs d'indice de déchirure obtenues ici sont très faibles. En fait, ces résultats

seraient considérés faibles, même pour une pâte PMR. Brandon [43] explique que l'indice de déchirure est bas pour du papier très rigide, car les contraintes sont alors concentrées dans une plus petite région. Le résultat est une coupe des fibres, plutôt que le retrait de celles-ci du réseau fibreux. Cette situation est accentuée pour les pâtes trop cuites et dont la fraction carbohydate est partiellement dégradée, ce qui est vraisemblablement le cas ici (absence relative de lignine, viscosité très basse). Ce phénomène de «plastification» peut être influencé par le type de produits chimiques utilisés au cours de la mise en pâte. Ici, les indices de déchirure sont moins élevés lorsque le délaminage augmente. En effet, l'indice de déchirure dépend beaucoup de la longueur des fibres et cette dernière diminue avec le délaminage. De plus, la cellulose des pâtes de copeaux délaminés est plus attaquée, ce qui diminue les propriétés mécaniques (à ce niveau de viscosité à tout le moins). Finalement, le phénomène de «plastification» du réseau fibreux expliqué plus haut est probablement plus intense pour le taux de délaminage le plus grand, puisque ce phénomène est accentué dans le cas d'une cellulose attaquée. Tel que mentionné précédemment, cette «plastification» conduit à des valeurs d'indices de déchirure basses.

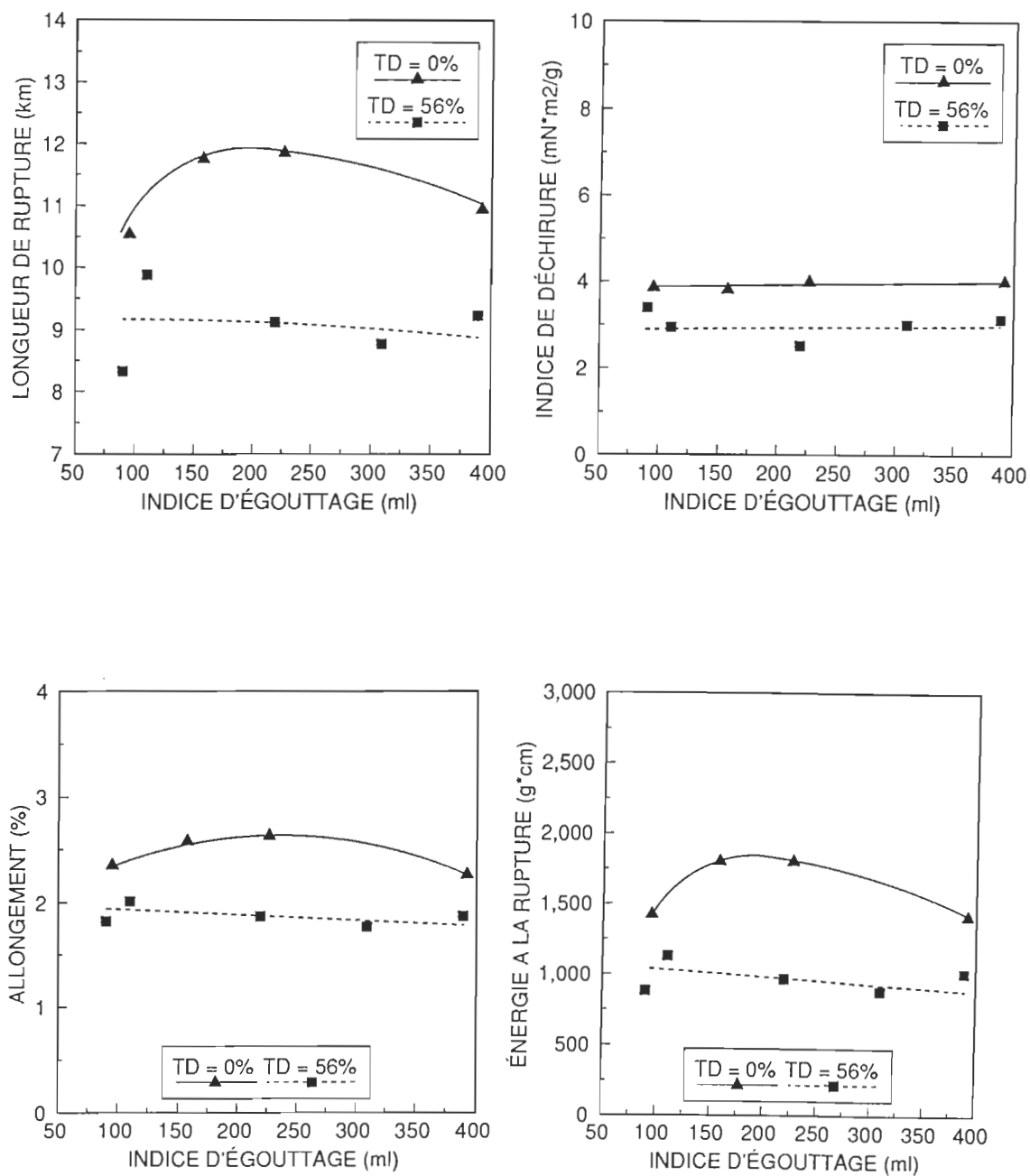


Figure 4-12. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)

L'indice d'éclatement et la longueur de rupture sont très élevées. Comme les feuilles sont beaucoup plus denses que la normale (figure 4-11), la qualité et la quantité des liens inter-fibres le sont également. Aussi, pour ces tests, il y a moins de coupe des fibres que pendant le test de déchirure (pour ce type de papier). C'est ce qui explique les valeurs très élevées pour l'indice d'éclatement et la longueur de rupture. Cependant, les résultats sont moins bons avec les copeaux délaminés, comme dans le cas de l'indice de déchirure. Encore une fois, les fibres ayant été raccourcies par la compression, les propriétés baissent.

L'allongement et l'énergie à la rupture sont aussi plus faibles pour le taux de délaminage le plus élevé, ce qui confirme que les effets négatifs énumérés plus haut sont plus importants que l'influence positive des microcompressions, dans ce cas-ci.

Des propriétés sont exprimées les unes par rapport aux autres à la figure 4-13. On y voit encore une fois que la compression n'a eu que des impacts négatifs sur les propriétés mécaniques.

En résumé, les copeaux ont subi un traitement chimique intense, à un tel point que la cellulose s'en est trouvée attaquée (viscosité basse). Dans le cas des

copeaux très délaminés, cette attaque a été encore plus importante et, couplée avec l'effet de compression, a provoqué une baisse des propriétés mécaniques. Il a donc été montré encore une fois que le traitement mécanique intense avant l'imprégnation chimique facilite cette dernière. Dans ce cas-ci, elle a même été trop intense.

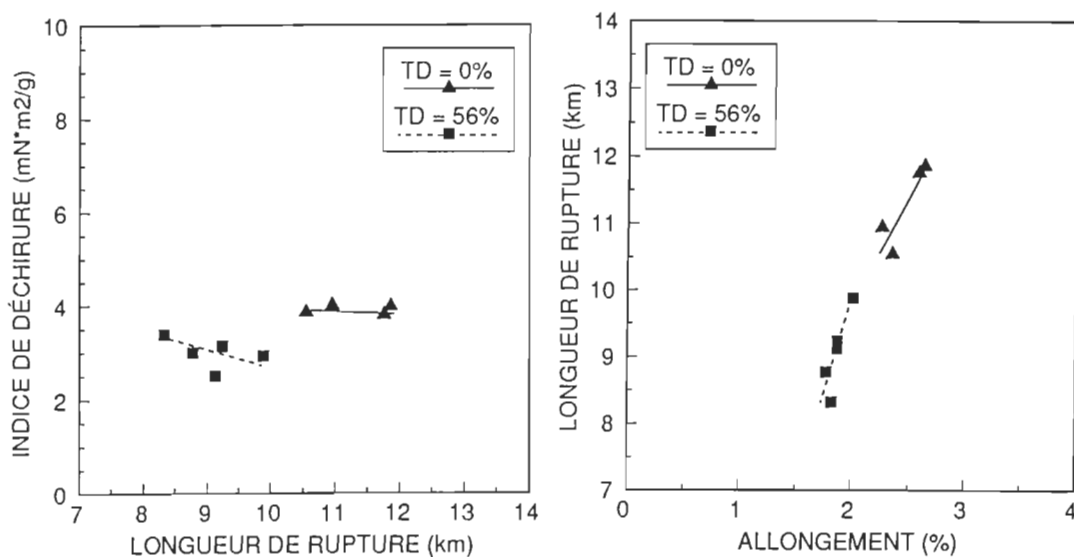


Figure 4-13. Propriétés mécaniques exprimées les unes par rapport aux autres (pâtes chimiques $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}_2$)

4.3 Impact sur le produit final

Dans cette partie de l'étude, l'effet du taux de délaminage des copeaux sur la qualité des pâtes PMR, PTM, PCMR et APMP^{MD} a été déterminé.

Les mises en pâte PMR et PTM ont été effectuées au plan pilote du CRPP de l'Université du Québec à Trois-Rivières. L'objectif était de voir l'influence de la compression et du délaminage des copeaux en l'absence d'imprégnation chimique.

Pour les mises en pâte PCMR et APMP^{MD}, des essais ont été faits au niveau laboratoire et au niveau pilote. En général, à l'échelle laboratoire, les ratios d'absorption de liqueur sont différents pour les taux de délaminage différents. C'est-à-dire que les imprégnations ont été effectuées avec un temps de trempage constant et des concentrations de produits chimiques dans la liqueur (g/l) constantes. À l'échelle pilote, par contre, des efforts ont été déployés pour comparer les résultats à des mêmes ratios d'absorption.

4.3.1 Mises en pâte PMR et PTM

Les mises en pâte mécanique de raffineur (PMR) et thermomécanique (PTM) ont été faites dans le but de déterminer l'effet du taux de délaminage des copeaux, en l'absence d'imprégnation chimique.

4.3.1.1 Mises en pâte PMR

Un mélange commercial de sapin/épinette a été utilisé pour ces essais, avec une dimension moyenne initiale des copeaux de 1,29 cm. Les copeaux ont subi un étuvage de six minutes à 97°C avant les deux stades de raffinage atmosphérique.

À la figure 4-14, on a l'indice d'égouttage (après réfrigération) en fonction de l'énergie spécifique de raffinage. On constate une baisse de l'énergie de raffinage pour le taux de délaminage le plus grand. Il se peut donc que la délamination et l'écrasement des copeaux diminue l'énergie de raffinage, comme certains auteurs l'ont suggéré [44, 45].

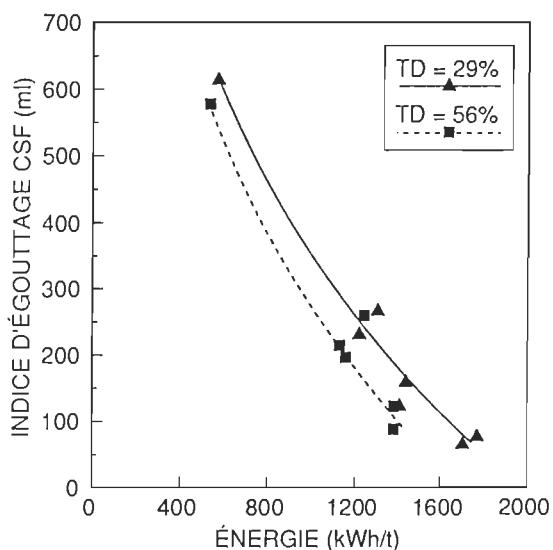


Figure 4-14. Indice d'égouttage (après réfrigération) en fonction de l'énergie spécifique de raffinage (pâtes PMR)

Lorsque la pâte est désintégrée à chaud immédiatement après le raffinage, la latence est alors retirée. Autrement dit, on déplie et on «défrise» les fibres. Quand la pâte est placée au réfrigérateur pendant une période plus ou moins longue, une partie de la latence reste même après une désintégration à chaud. C'est pourquoi les indices d'égouttage obtenus dans ce cas sont plus élevés. La différence est plus grande dans le cas des pâtes strictement mécaniques, pour lesquelles la latence est plus importante. L'énergie spécifique de raffinage peut être exprimée par rapport à l'une ou l'autre des séries d'indices d'égouttage. Les propriétés des pâtes et papiers sont cependant représentées uniquement par rapport

aux indices d'égouttage après réfrigération, puisque ce sont les pâtes réfrigérées qui sont testées.

La densité des papiers est similaire pour les deux taux de délaminage (figure 4-15). Cependant, l'indice d'égouttage utilisé pour ce graphique est celui après réfrigération. C'est donc dire que les densités des deux séries sont différentes pour des énergies de raffinage similaires.

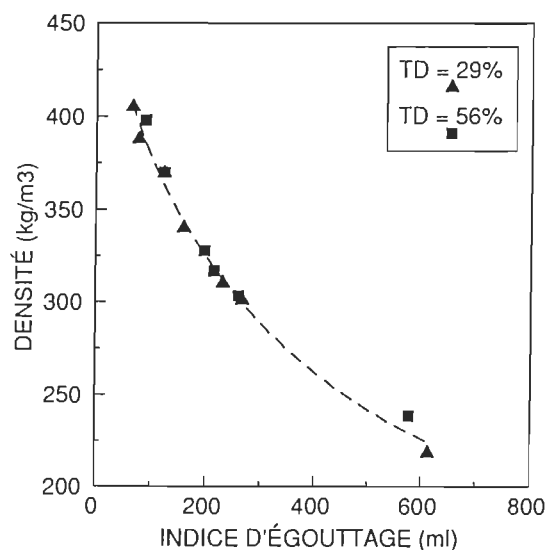


Figure 4-15. Densité des papiers en fonction de l'indice d'égouttage CSF (pâtes PMR)

Les propriétés des pâtes sont présentées à la figure 4-16. On voit que les rejets sont les mêmes dans les deux cas. À un indice d'égouttage de 100 ml, ils sont en-deça d'un dixième de 1%. Par contre, il y a une nette différence entre les fractions R14 et les longueurs de fibre pour les deux taux de délaminage. Ces paramètres ont tendance à diminuer avec une augmentation du taux de délaminage. Il est probable que l'action mécanique intense dans l'alimentateur à bouchon génère des défauts dans la structure ligneuse [48 à 51]. Ces défauts peuvent se transformer en coupures lors du raffinage, surtout lors d'une mise en pâte purement mécanique, sans traitement thermique sous pression. Dans la mise en pâte PMR, la température est environ 90-97°C, ce qui est inférieur à la température de transition vitreuse de la lignine. Il se produit donc plus de rupture des fibres, surtout si des défauts sont induits par compression de la matière ligneuse.

S'il y a coupe des fibres avec le délaminage, il y a aussi baisse de l'indice d'égouttage. Ceci est en accord avec la baisse d'énergie spécifique nécessaire pour atteindre un indice d'égouttage (après réfrigération) donné (figure 4-14).

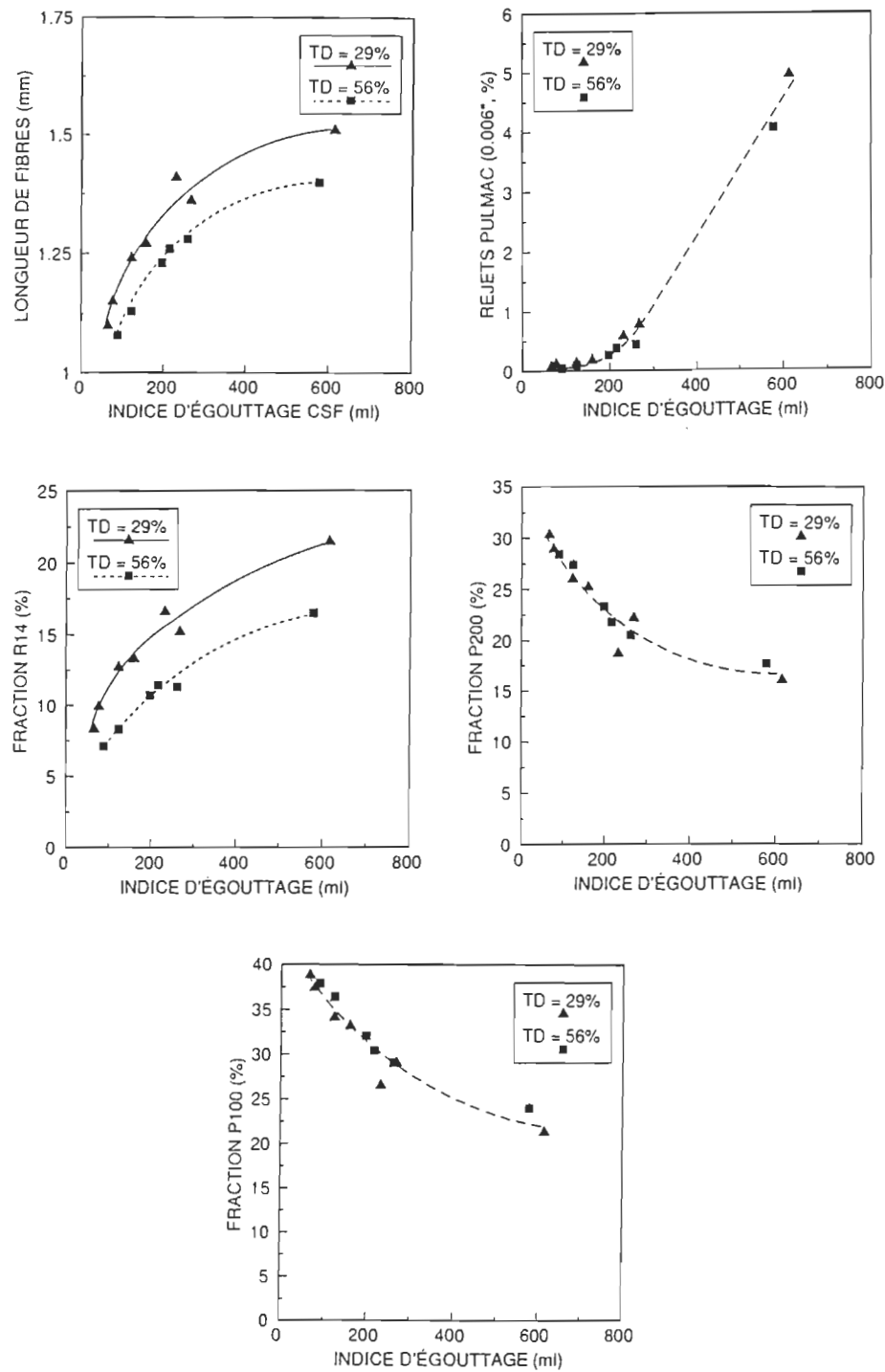


Figure 4-16. Propriétés de pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)

Les fractions P200 et P100, quant à elles, ne semblent pas affectées par le taux de délaminage. La diminution du R14 est donc contrebalancée par une augmentation des fractions 14/100.

À l'exception de la longueur de rupture, toutes les propriétés mécaniques sont meilleures pour le taux de délaminage le plus faible (figure 4-17). La longueur de rupture est équivalente dans les deux cas. Ce peut être parce que la compression intense a produit des microcompressions qui peuvent être positives pour la résistance mécanique [18]. Ceci pourrait compenser pour la différence de longueur de fibre. D'après Brandon [43], les facteurs les plus importants pour la longueur de rupture sont la quantité et la qualité des liens inter-fibres. La longueur de fibres a un impact mais moindre. Cependant, on s'explique mal pourquoi l'allongement est différent, propriété qui devrait être améliorée par la présence de microcompressions.

L'indice d'éclatement est plus faible pour le taux de délaminage le plus élevé. L'indice d'éclatement est une fonction complexe de l'indice de traction et de l'allongement [43]. L'allongement plus faible pour le taux de délaminage le plus grand a donc une influence plus grande (avec la diminution de longueur des fibres) que l'augmentation de la surface spécifique et des fines.

L'indice de déchirure dépend beaucoup de la longueur des fibres, donc il suit la même tendance, c'est-à-dire une décroissance avec une augmentation du taux de délaminage. Les courbes passent par un maximum, conformément à la littérature [30]. On sait que l'indice de déchirure dépend également de la qualité et de la quantité de liaisons inter-fibres, en plus de la longueur des fibres [43]. Cette dépendance est moins importante mais permet à l'indice de déchirure d'augmenter avec la fibrillation, jusqu'à un indice d'égouttage de 200 ml environ. Au-delà de cette valeur, la coupe des fibres est trop importante et l'indice de déchirure diminue.

La figure 4-18 montre les propriétés optiques des pâtes PMR. Le taux de délaminage ne semble pas influencer ces paramètres, du moins dans la plage étudiée. Les coefficients d'absorption et de diffusion sont semblables pour les deux taux de délaminage. Pour le coefficient de diffusion, le fait que les fractions P200 et P100 soient similaires dans les deux cas explique en partie le résultat. Aussi, les courbes sont faites en fonction de l'indice d'égouttage, qui est relié à la surface spécifique. Comme la mise en pâte PMR ne comporte pas de traitement à haute température, il n'y a pas eu d'effet sur l'indice de réfraction des fibres, dont dépend le coefficient d'absorption.

En l'absence de traitements chimique et thermique, il n'est pas surprenant que la blancheur soit similaire dans les deux cas. L'opacité est aussi semblable.

Ces deux paramètres sont reliés directement aux coefficients d'absorption et de diffusion, qui ne varient pas.

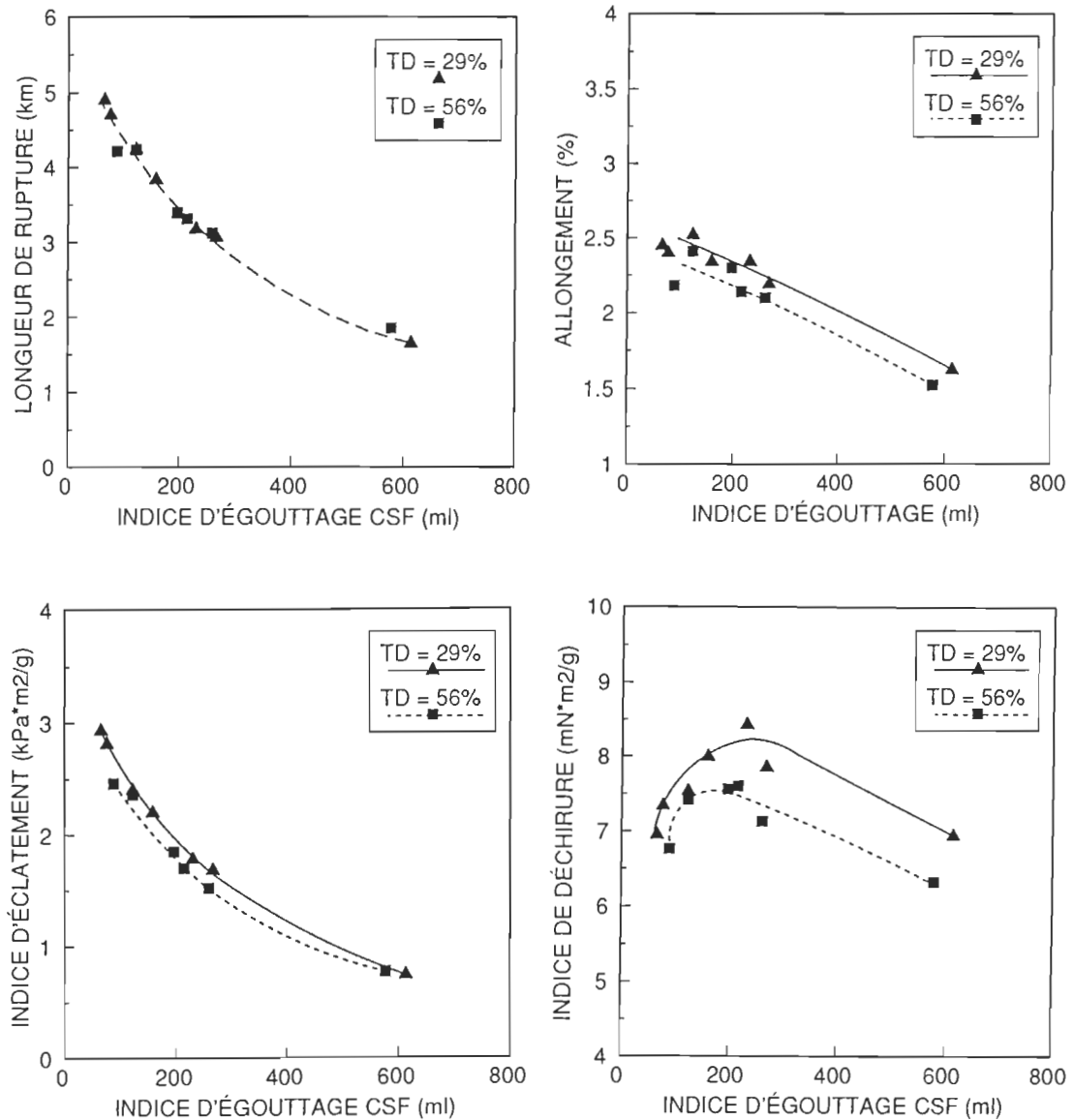


Figure 4-17. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)

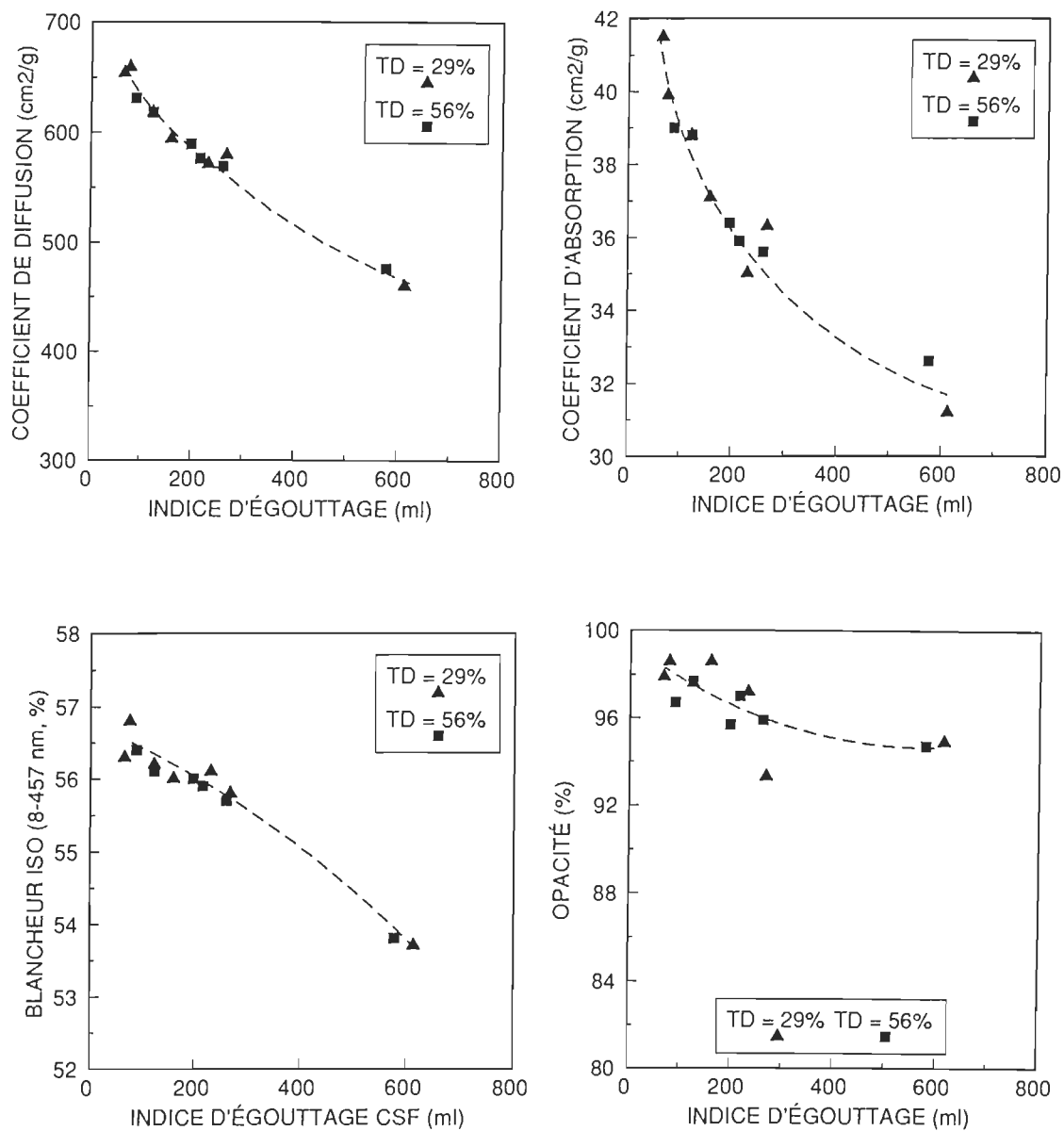


Figure 4-18. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PMR)

4.3.1.2 Mises en pâte PTM

L'effet du taux de délaminage sur la mise en pâte thermomécanique est présenté dans cette section. La mise en pâte PTM comporte un traitement thermique intense (six minutes à 128°C, dans ce cas-ci). La dimension moyenne initiale des copeaux est de 1,27 cm. Le bois utilisé est également un mélange de sapin/épinette.

En premier lieu, on ne décèle pas de différence d'énergie de raffinage (figures 4-18 et 4-19) entre les deux taux de délaminage. Donc, en l'absence de traitement chimique et avec un traitement thermique à haute température, la compression plus ou moins intense des copeaux n'est pas suffisante pour réduire l'énergie requise pour atteindre un certain indice d'égouttage. D'après la littérature, les hautes températures font augmenter l'énergie de raffinage [30]. Cependant, la longueur des fibres est favorisée par le traitement à haute température car il dépasse la température de transition vitreuse de la lignine. Cette dernière agit alors comme une matière visco-élastique. Il faut cependant beaucoup plus d'énergie pour fibriller les fibres que dans le cas d'une mise en pâte mécanique à basse température.

En général, les propriétés physiques des pâtes et papiers ne semblent pas influencées par le taux de délaminage, lors de la mise en pâte PTM (figures 4-20, 4-21 et 4-22). Les papiers fabriqués avec les deux pâtes ont des densités similaires. Les rejets sont aussi du même ordre de grandeur. La différence pour des indices d'égouttage élevés suggère que le traitement thermique a été plus efficace pour ramollir la lignine dans le cas du taux de délaminage le plus élevé. La surface spécifique disponible étant plus grande, la vapeur pénètre plus facilement au coeur des copeaux. Ceci est en accord avec la littérature [39, 61]. Cependant, cette observation ne repose que sur un point de la courbe au taux de délaminage de 40.9%.

À propos de la fraction R14, on ne voit pas de différence alors qu'il y en avait une pour les PMR. Le traitement thermique plus efficace a donc compensé pour la présence de défauts dans la matrice. Pour la fraction P200 aussi, on ne voit pas de différence. La longueur des fibres est semblable dans les deux cas, contrairement aux mises en pâte PMR. Encore une fois, le traitement thermique étant plus efficace, il a permis d'empêcher la coupe des fibres au niveau des défauts créés par la compression intense. De plus, Koran [32] a montré que le nombre de fibres brisées diminue lorsque la température augmente (section 2.3.1.1).

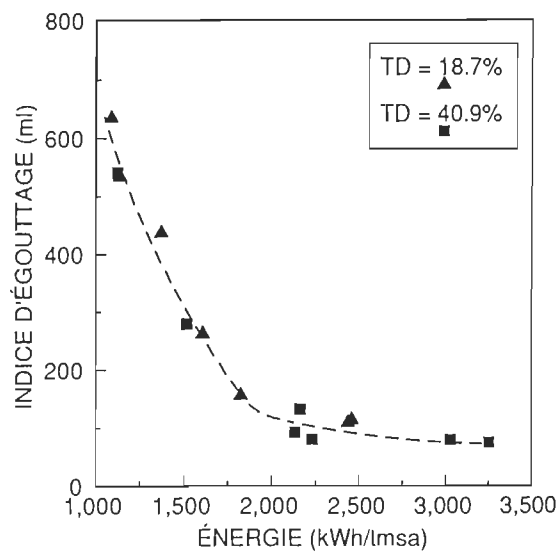


Figure 4-19. Indice d'égouttage (après raffinage) en fonction de l'énergie de raffinage (pâtes PTM)

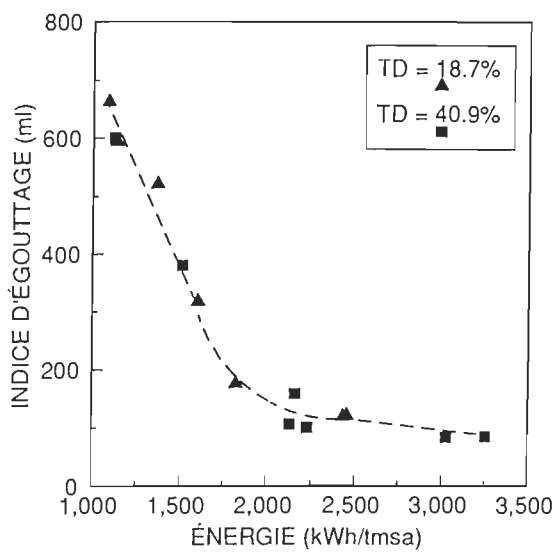


Figure 4-20. Indice d'égouttage (après réfrigération) en fonction de l'énergie de raffinage (pâtes PTM)

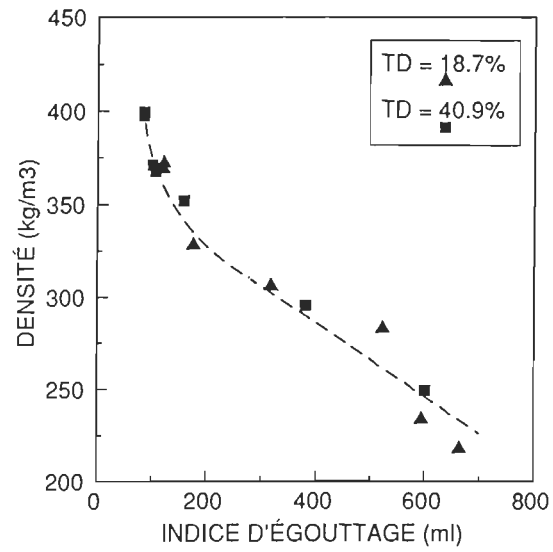


Figure 4-21. Densité en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)

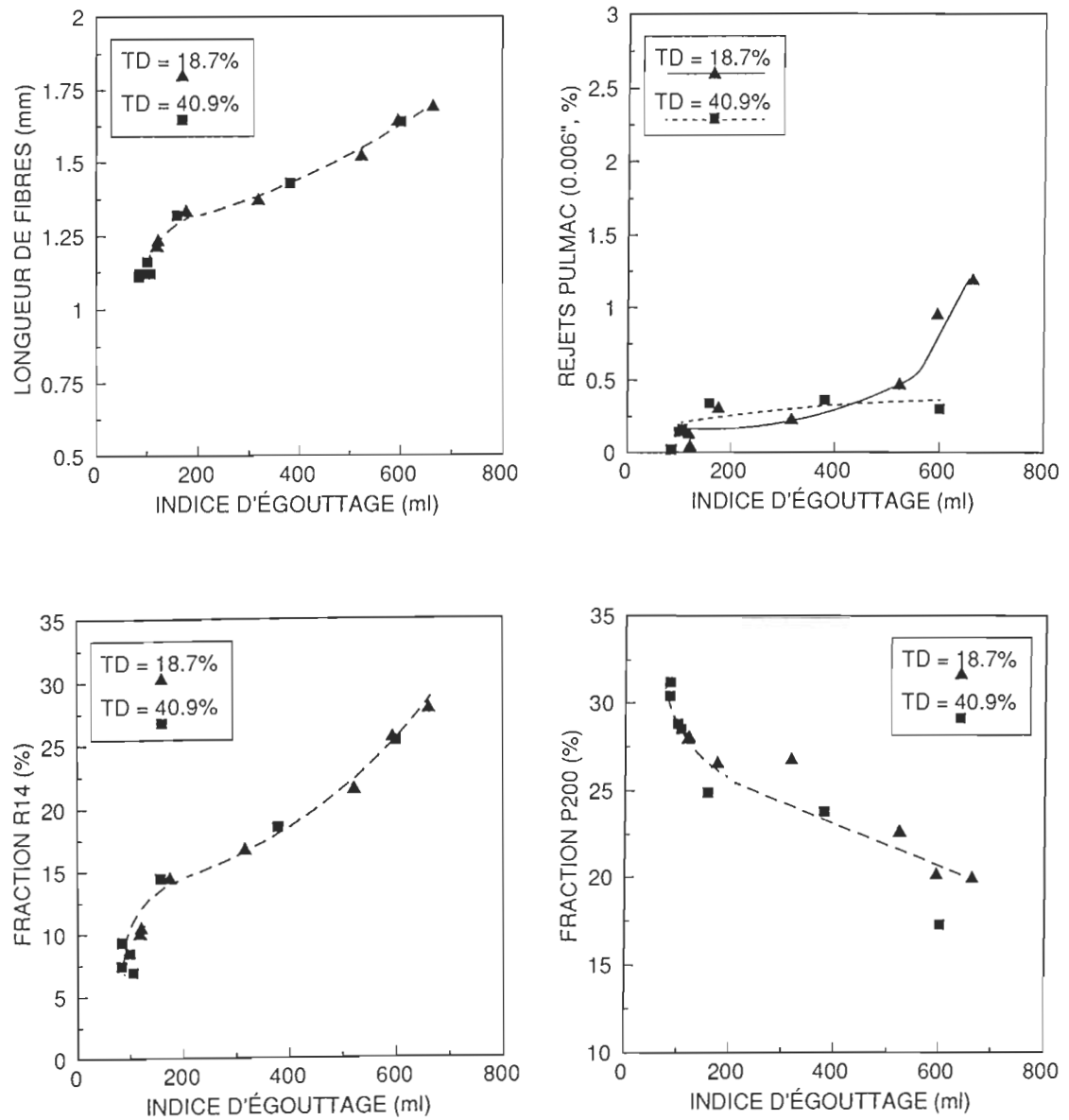


Figure 4-22. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)

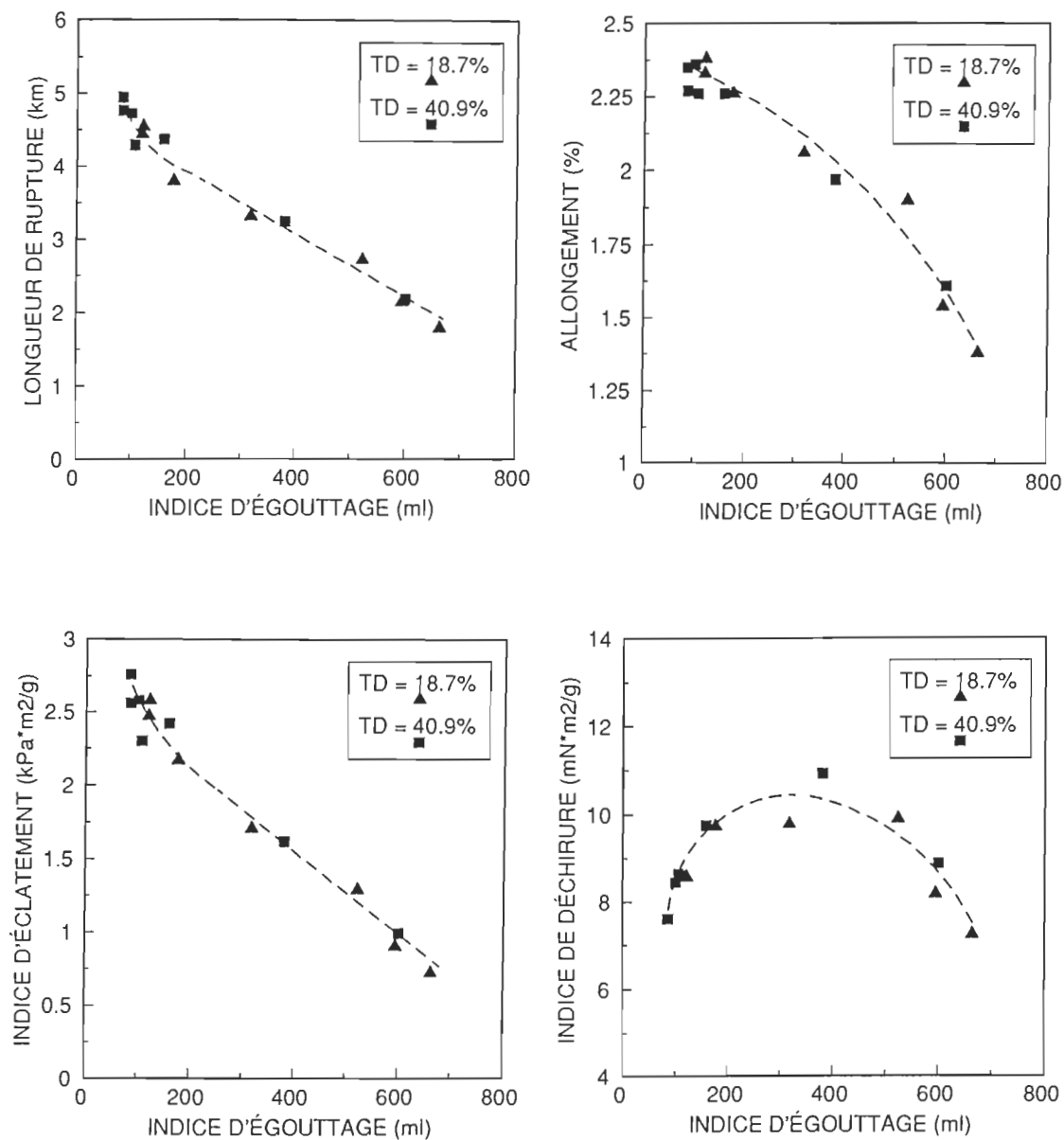


Figure 4-23. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)

En ce qui a trait aux propriétés optiques (figure 4-24), on peut constater que le coefficient d'absorption est plus élevé pour un taux de délaminage élevé, alors que la blancheur est plus basse. Le coefficient d'absorption augmente car le traitement thermique a une influence sur l'indice de réfraction des fibres. Cette influence est plus importante pour le taux de délaminage le plus élevé car la vapeur a accès plus facilement au centre des copeaux. D'après la théorie (figure 4-25), il est normal que la blancheur baisse si le coefficient de diffusion est constant et le coefficient d'absorption augmente. L'opacité, qui est surtout fonction du coefficient de diffusion, ne varie pas en fonction du taux de délaminage. Le coefficient de diffusion dépend de la surface spécifique.

En résumé, une forte compression et un délaminage important avant les mises en pâte PMR et PTM semblent offrir peu d'avantages car les propriétés obtenues sont similaires ou inférieures.

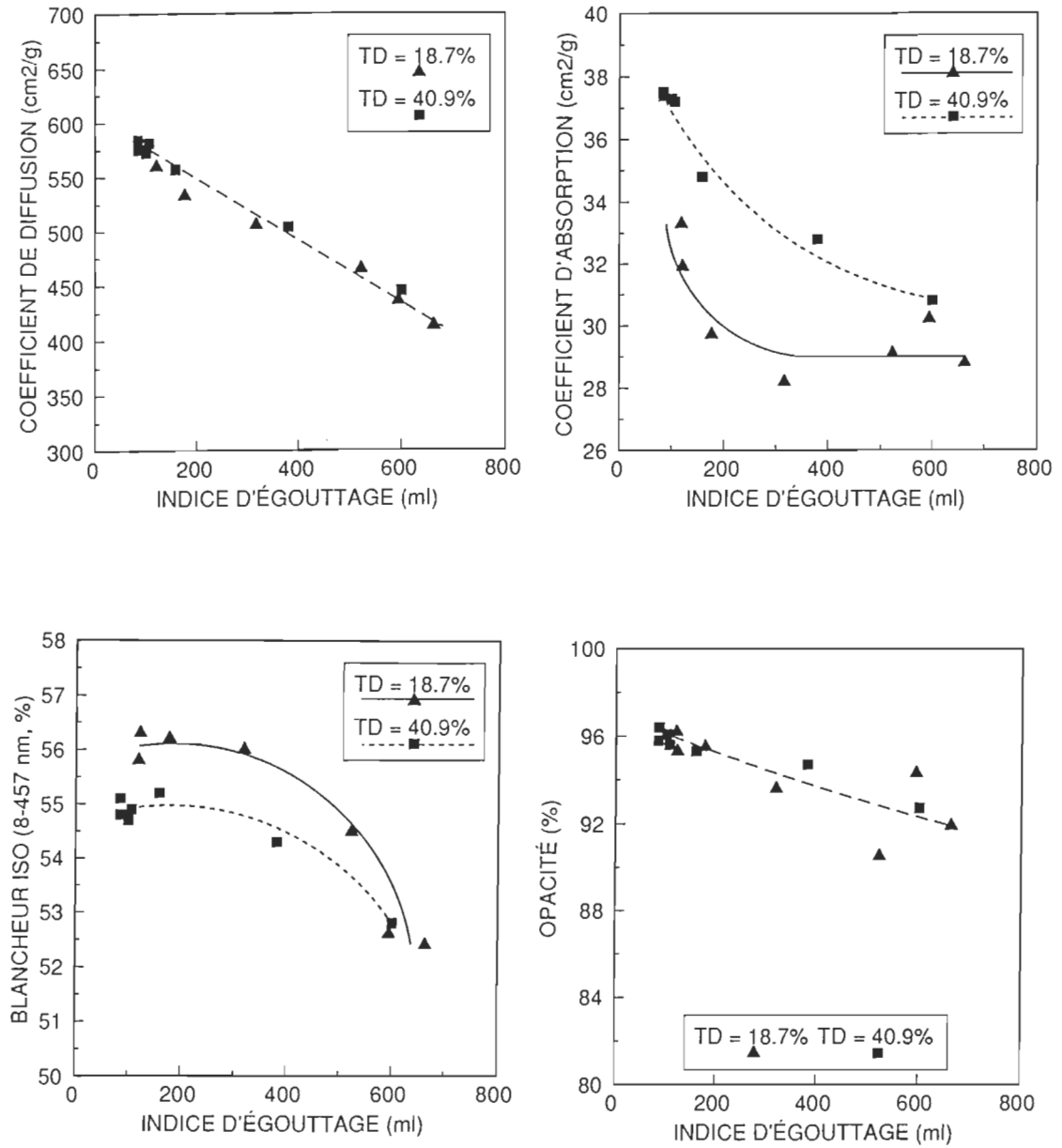


Figure 4-24. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PTM)

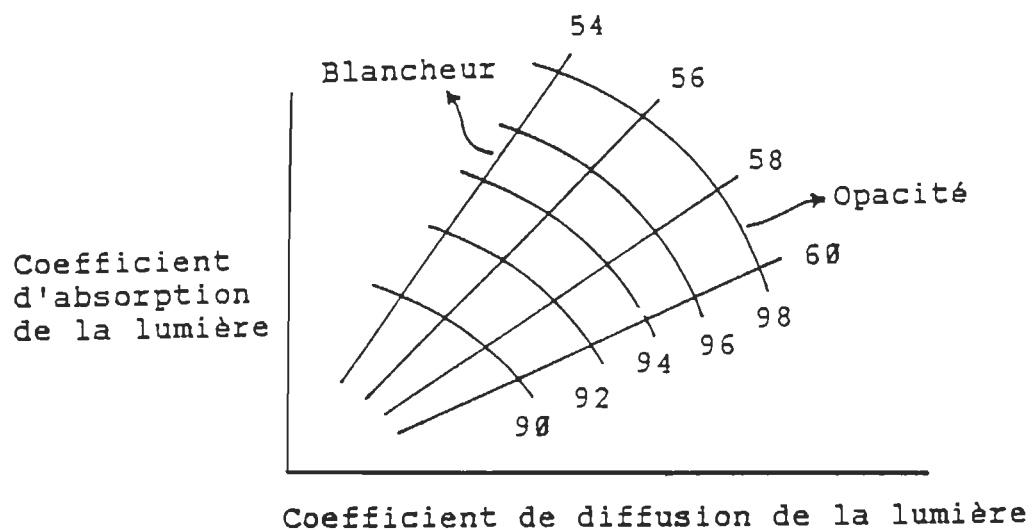


Figure 4-25. Schématisation de la relation existant entre les différentes propriétés optiques [53]

4.3.2 Mise en pâte chimico-mécanique de raffineur (PCMR)

La mise en pâte PCMR pour les feuillus implique un traitement chimique à la soude caustique (NaOH) et au sulfite de sodium (Na_2SO_3) et un traitement

mécanique par raffinage. Le traitement thermique est plutôt modéré (95-100°C) et c'est pourquoi on n'en parle pas dans le nom du type de mise en pâte.

Afin d'avoir une idée de la façon dont la liqueur se comporte au cours de l'imprégnation chimique, une goutte de teinture a été déposée dans un trou carré taillé à la surface de copeaux de feuillus et de résineux. On voit à la figure 4-26 que la teinture se dirige surtout dans la direction des fibres. Ceci mène à l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de la surface spécifique des copeaux aura un impact important sur la qualité de l'imprégnation. Ceci est en accord avec les informations présentées à la section 2.4 et les résultats de MacGregor [36].

4.3.2.1 Interrelations entre le taux de délaminage des copeaux, le temps de rétention et les charges de produits chimiques

Pour cette partie, qui s'est faite en laboratoire, le traitement thermique s'est déroulé à 90°C pendant 15 à 45 minutes. L'essence utilisée a été le tremble, avec un diamètre moyen initial des copeaux de 1,45 cm. Tel que mentionné précédemment, les copeaux les plus délaminés ont absorbé plus de liqueur, ce qui a augmenté les différences entre les résultats de cette section.

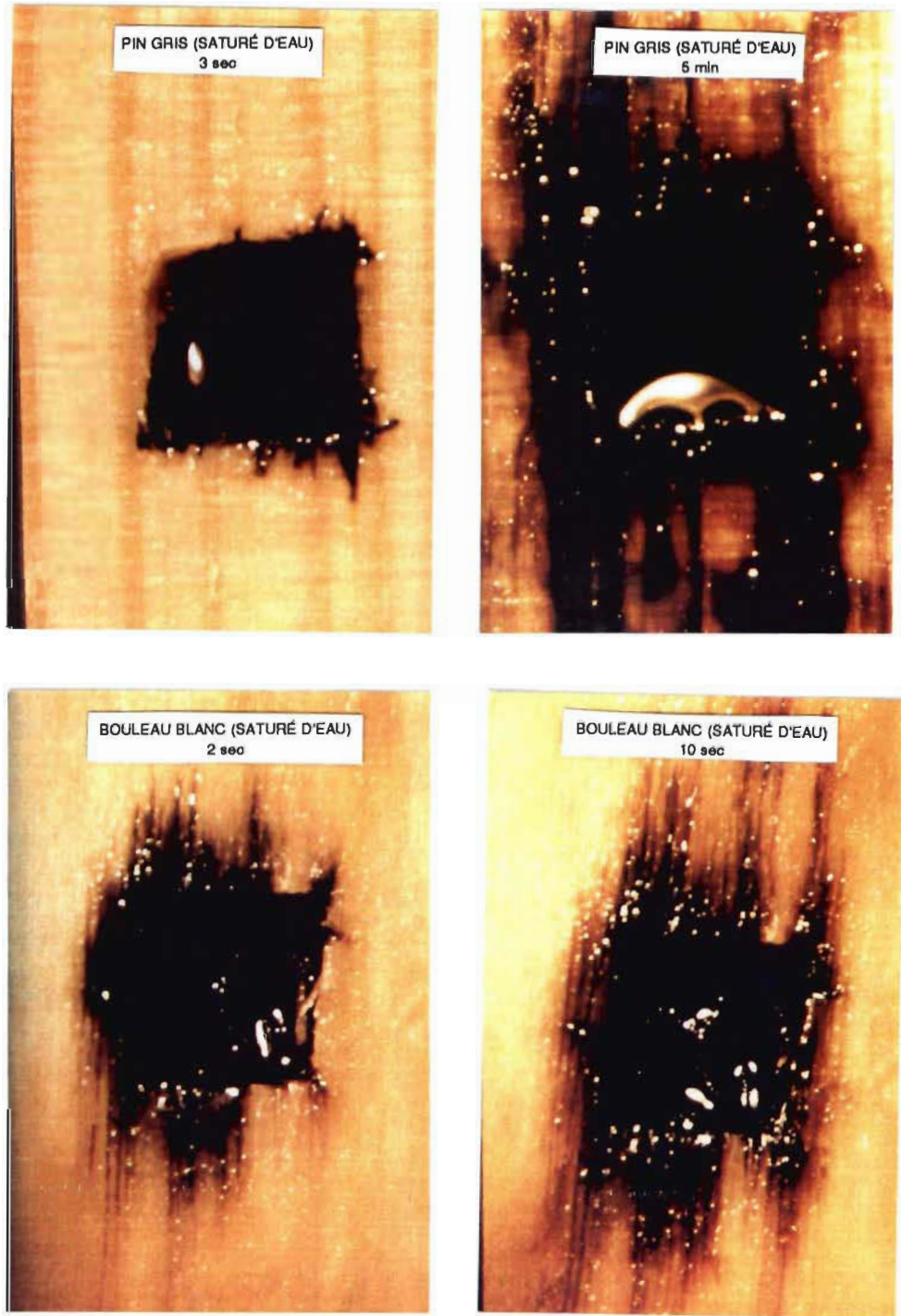


Figure 4-26. Teinture pénétrant et diffusant dans des copeaux

À la figure 4-27, on a des résultats de blancheur pour des pâtes traitées à la soude caustique et au sulfite de sodium. On remarque que la blancheur diminue avec la charges de NaOH. En effet, la charge la plus élevée abaisse même la blancheur par rapport à la valeur initiale. Par contre, pour de faibles charges de soude, le sulfite contribue à augmenter la blancheur.

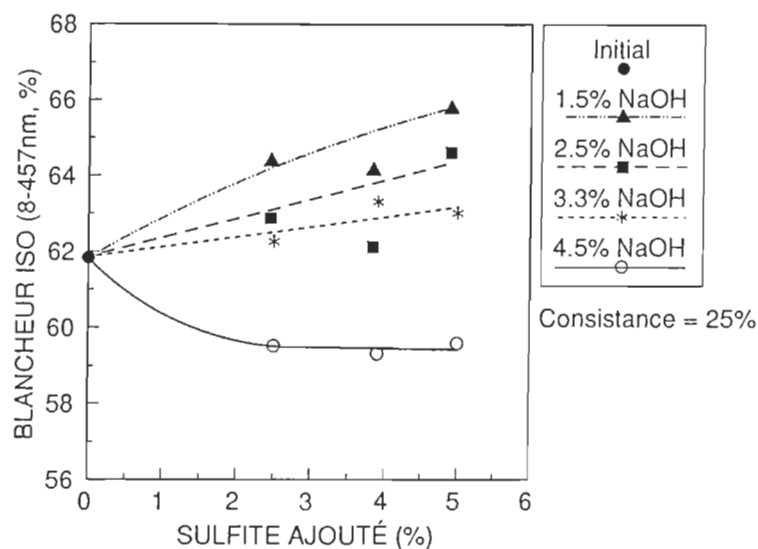


Figure 4-27. Blanchement pour des pâtes imprégnées au Na₂SO₃ et NaOH

La figure 4-28 présente plusieurs résultats d'imprégnation de pâtes et de copeaux délamés à 41%. Le contenu ionique augmente avec les charges de

produits chimiques, puisque ce paramètre est une mesure du degré de dégradation du bois. L'action de la soude est encore plus prononcée que celle du sulfite. Heitner et Attack [62] ont montré que le contenu ionique des pâtes de tremble a une influence positive sur les propriétés mécaniques des papiers, la quantité de bûchettes et une influence négative sur l'opacité et le coefficient de diffusion.

La demande chimique en oxygène (DCO) est un autre paramètre relié à la dégradation du bois. Pour le tremble et en présence de soude caustique, le sulfite semble avoir peu d'influence sur la DCO. Par contre, les charges de NaOH donnent des résultats différents. Plus la concentration de NaOH augmente, plus la DCO est élevée. En effet, il existe trois types de réactions en milieu alcalin qui génèrent des matières organiques : oxydation, «peeling» et l'hydrolyse alcaline du lien glycosidique [30]. La même tendance en fonction de l'alcalinité est observée pour les pâtes et pour les copeaux.

Enfin, on a les résultats de solides dissous mais pour les copeaux délaminés (41%) seulement, les données n'étant pas disponibles pour les pâtes. La tendance est en général la même que pour la DCO.

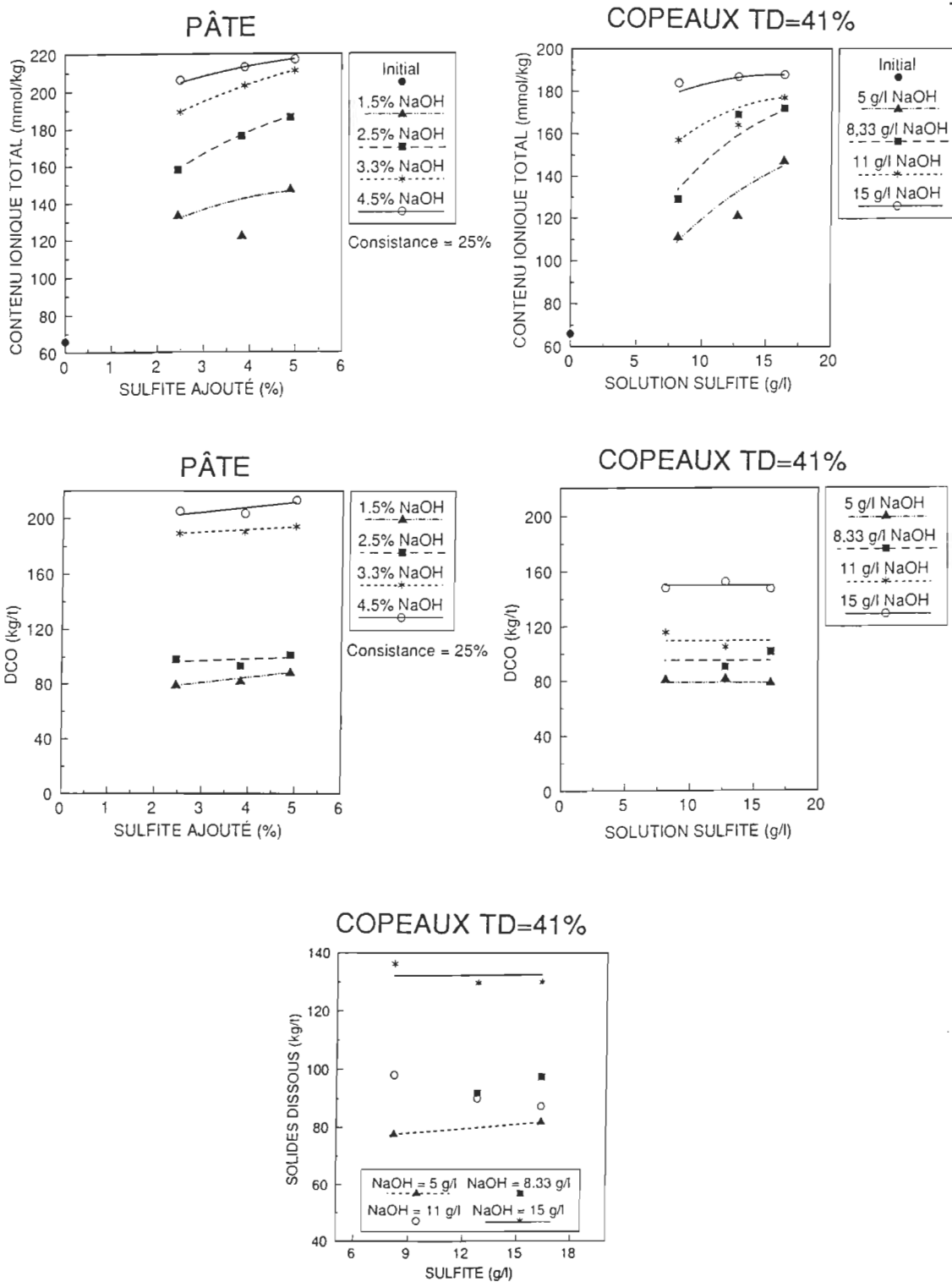


Figure 4-28. Résultats pour pâtes et copeaux en fonction des charges de produits chimiques (PCMR échelle laboratoire)

On observe à la figure 4-29 qu'il semble exister une relation entre le contenu ionique et la blancheur. La courbe résultante, obtenue avec toutes les données disponibles (pâtes et copeaux), passe par un maximum si on utilise le point initial. La charge de soude est faible pour les contenus ioniques faibles et l'action du sulfite sur la blancheur est alors plus évidente. La blancheur optimale pour les conditions utilisées se situe à un contenu ionique de 140 mmol/kg.

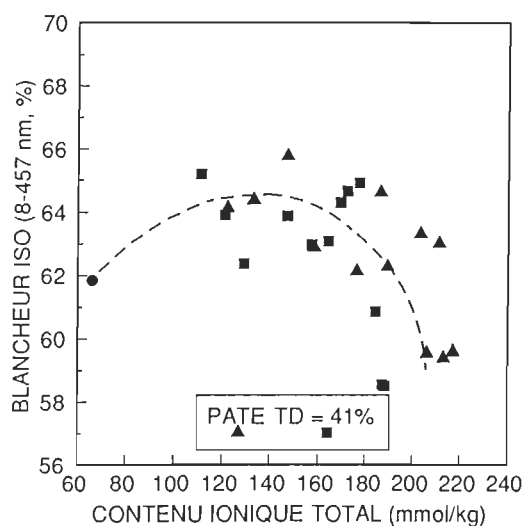


Figure 4-29. Blancheur en fonction du contenu ionique (PCMR échelle laboratoire)

Dans la deuxième partie de cette section, des copeaux de tremble de différents taux de délaminage (0%, 21%, 37% et 41%) ont été utilisés. Ils ont été

imprégnés avec une solution à 11 g/l en NaOH et 13 g/l en Na₂SO₃ pour une période d'une minute, en variant le temps de rétention du traitement thermique de 15 à 45 minutes. On trouve à la figure 4-30 les résultats reliés à ce temps de rétention.

En premier lieu, le contenu ionique est influencé positivement par le temps de rétention et le taux de délaminage. Autrement dit, une augmentation de la surface spécifique ou du temps de rétention peuvent avoir le même effet sur le contenu ionique.

Le contenu ionique total est un indice du potentiel de développement des propriétés physiques. Un contenu ionique plus grand permet d'obtenir des propriétés mécaniques des papiers meilleures. Autrement dit, pour un même traitement de mise en pâte, pour la même matière première et au même contenu ionique, on obtient sensiblement les mêmes propriétés pour un indice d'égouttage donné.

NaOH = 11 g/l
Na₂SO₃ = 13 g/l

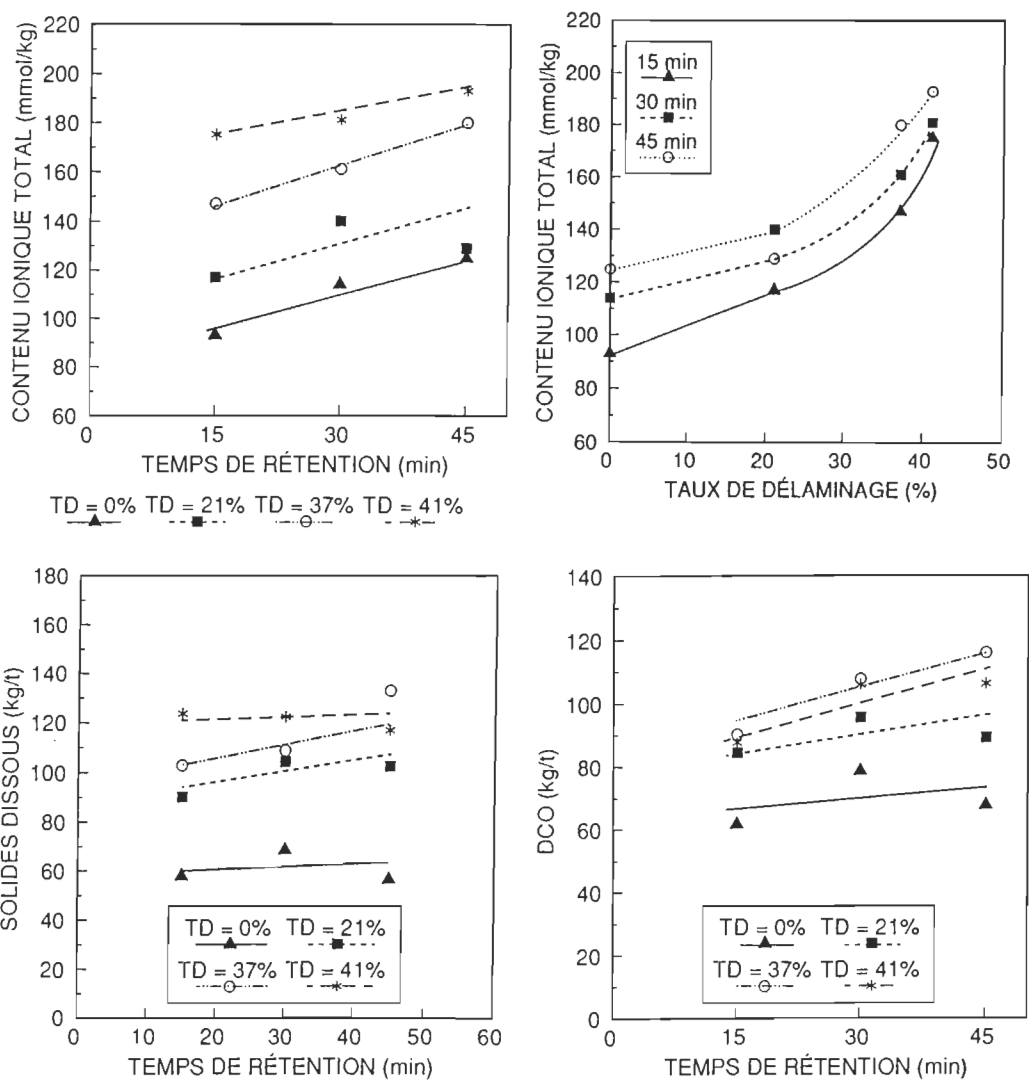


Figure 4-30. Résultats en fonction du temps de rétention (PCMR échelle laboratoire)

Le contenu ionique augmente avec le délaminage des copeaux et le temps de résidence (figure 4-30), pour des concentrations de produits chimiques dans la solution constantes. Pour un même contenu ionique (donc des propriétés similaires), on peut diminuer la durée du séjour dans les trémies de réaction et augmenter le taux de délaminage.

La consommation en produits chimiques peut alors être plus grande, dépendant des conditions d'opération. Elle peut aussi être semblable, comme il sera montré à la section 4.3.2.2.

La figure 4-31 donne le prix des trémies de réaction pour une usine de PCTM comportant deux lignes de 270 tonnes par jour chacune, en fonction du temps de résidence. Le prix est pratiquement directement proportionnel au temps, pour la plage représentée. Il est donc possible d'économiser sur le prix des trémies en augmentant la surface spécifique des copeaux avant l'imprégnation chimique.

Par exemple, avec des concentrations en produits chimiques constantes dans la liqueur (figure 4-30), pour un contenu ionique de 160 mmol/kg, le temps de résidence peut passer de 45 minutes à 15 minutes si le taux de délaminage

augmente de 31% à 40%. Ceci implique une réduction du coût des trémies de plus de 300 000 \$CAN.

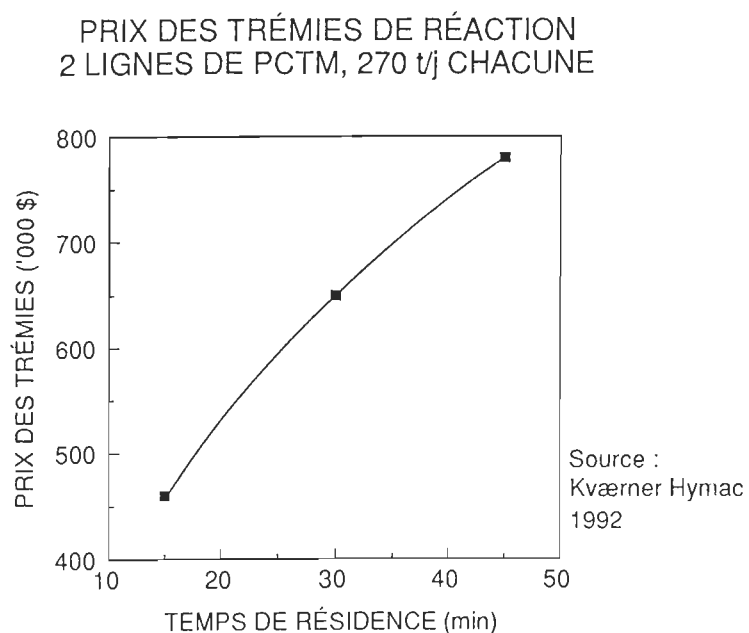


Figure 4-31. Prix des trémies de réaction en fonction du temps de résidence

Également, le temps de réaction dans les trémies peut influencer dans certains cas la hauteur de l'édifice. Dans cette situation, le temps de réaction prend une importance encore plus considérable dans les coûts d'immobilisation.

Il peut y avoir une hausse du prix de l'appareil effectuant le délaminage des copeaux, si le taux de délaminage est augmenté. Cette hausse est un coût en

immobilisation et dépend de la sorte d'appareil utilisé. Elle influencera l'économie réelle pouvant être faite en augmentant le taux de délaminage.

Ensuite, à la figure 4-30, les résultats pour les effluents ont été représentés en fonction du temps de résidence et pour les différents taux de délaminage. La DCO semble augmenter légèrement avec le temps de résidence alors que les solides dissous restent à peu près constants. On peut s'attendre à ce que les charges à l'effluent augmentent avec le temps de rétention, étant donné que la dégradation du bois doit augmenter dans ce cas. Pour la DCO, les deux courbes des copeaux les plus délaminés sont à peu près confondues.

En général, une augmentation du taux de délaminage provoque une hausse des charges de polluants pour une même concentration de produits chimiques dans la liqueur. Il faut réaliser cependant que dans la section 4.3.2.1, les ratios d'absorption sont différents dépendant du taux de délaminage.

Comme dans la première partie de cette section, un graphique de la blancheur en fonction du contenu ionique total a été fait avec toutes les données disponibles (figure 4-32). Malgré une plus grande dispersion des points, on obtient la même tendance avec un maximum de blancheur à un contenu ionique de 130 mmol/kg, soit 10 mmol/kg de moins que dans l'autre partie. Encore une fois, cette

interprétation dépend du point initial. La valeur de la blancheur maximale est aux environs de 65% ISO dans les deux cas. Il serait donc possible que, du point de vue de la blancheur, la façon de faire varier le contenu ionique importe peu et que le résultat soit sensiblement le même (on peut faire varier le contenu ionique en modifiant les charges de produits chimiques, en changeant le taux de délaminage ou en modifiant le temps de rétention).

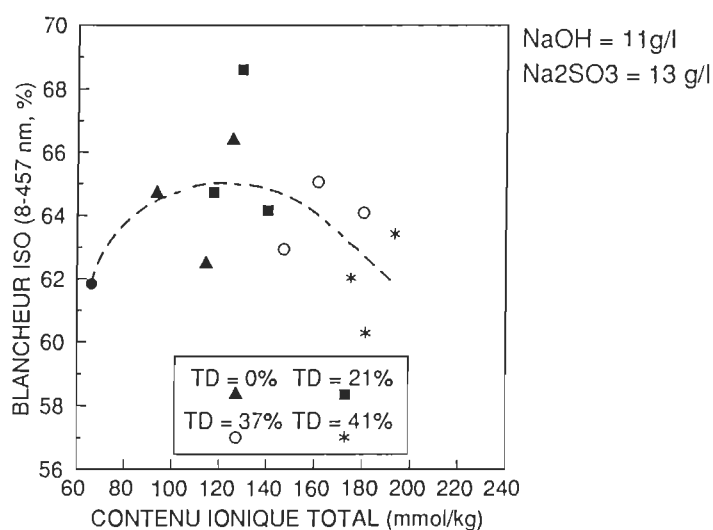


Figure 4-32. Blancheur en fonction du contenu ionique (PCMR échelle laboratoire)

Pour conclure cette section, il est difficile de choisir de petits échantillons de copeaux représentatifs. Cependant, les résultats obtenus permettent en général

d'observer des tendances intéressantes au niveau de l'influence du taux de délaminage, du temps de rétention et des charges de produits chimiques.

4.3.2.2 Impact du taux de délaminage des copeaux sur les propriétés des pâtes PCMR produites en usine pilote

Comme il a été dit auparavant, les résultats de la majorité des expériences à l'échelle laboratoire résultent de la différence de taux de délaminage et de la différence de ratio d'absorption de liqueur. À l'échelle pilote, des efforts ont été faits pour comparer une partie des résultats à des taux de délaminage différents mais à de mêmes charges de produits chimiques.

Cependant, pour cette section, des résultats typiques impliquant une augmentation de taux de délaminage et une augmentation correspondante des charges de produits chimiques sont présentés en premier lieu. Les essais ont impliqué la mise en pâte de copeaux de tremble italien, avec un diamètre moyen initial de 1,13 cm. Les taux de délaminage comparés ont été 27% et 46%, avec 4,2% de Na_2SO_3 , 2,5% NaOH et 5,1% Na_2SO_3 , 3,3% NaOH respectivement. Le traitement thermique s'est fait à 100°C pendant 30 minutes.

Tout d'abord, à la figure 4-32, on peut constater que l'énergie spécifique nécessaire pour atteindre un certain indice d'égouttage est plus faible pour le taux de délaminage le plus grand et les charges de produits chimiques les plus élevées. Le même phénomène est observé avec l'indice d'égouttage après réfrigération (figure 4-33). Les effets morphologiques de la compression décrits à la section 2.6.5.1 contribuent vraisemblablement à une diminution de l'énergie. De plus, la structure des copeaux plus ouverte permet une pénétration de la liqueur plus rapide et plus uniforme (section 2.4). Comme les charges de produits chimiques résultantes sont plus importantes dans le cas du taux de délaminage le plus grand, le contenu ionique des pâtes l'est aussi (tableau 4-1). La figure 2-23 montre bien que l'énergie spécifique diminue avec le contenu ionique, pour les feuillus.

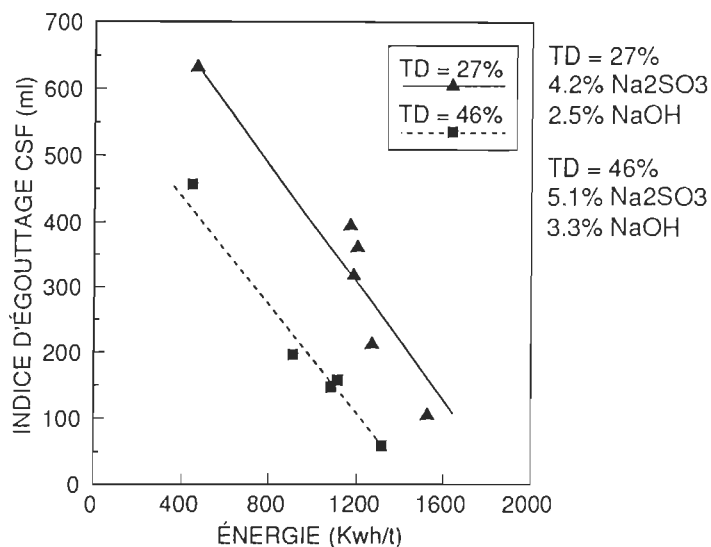


Figure 4-33. Indice d'égouttage après raffinage en fonction de l'énergie spécifique (PCMR échelle pilote, chimiques différents)

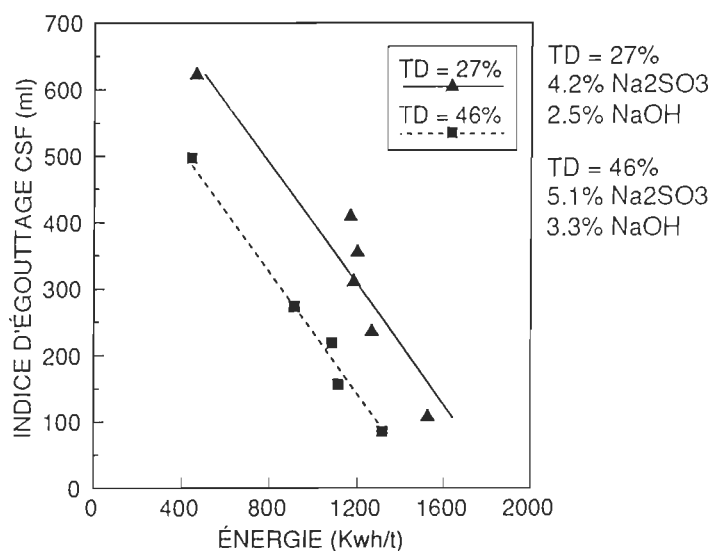


Figure 4-34. Indice d'égouttage après réfrigération en fonction de l'énergie spécifique (PCMR échelle pilote, chimiques différents)

Tableau 4-1. Contenus ioniques pour les deux taux de délaminage (PCMR échelle pilote, chimiques différents)

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	CONTENU IONIQUE TOTAL (mmol/kg)
27	178
46	221

La densité des papiers est représentée à la figure 4-35. Elle est plus importante dans le cas du taux de délaminage et des charges de produits chimiques

élevés. Si le contenu ionique augmente, les fibres sont plus flexibles et se compactent mieux les unes sur les autres. Il en résulte une plus grande densité. Ceci a aussi pour effet d'augmenter le nombre de liens inter-fibres.

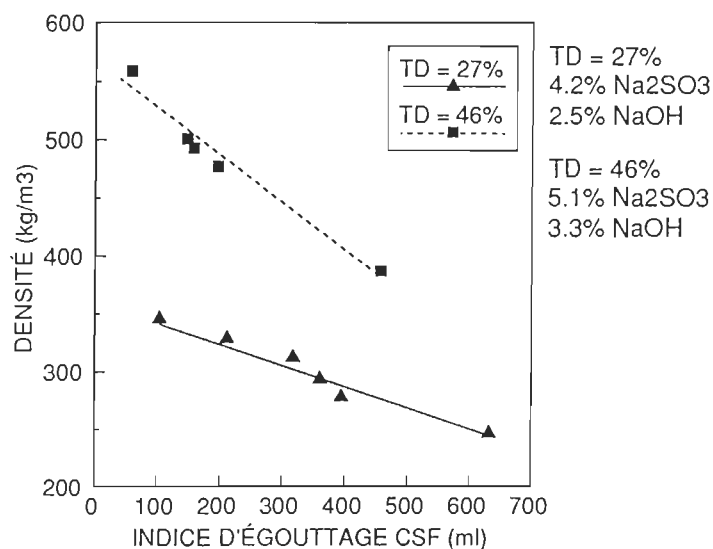


Figure 4-35. Densité des feuilles en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)

Les longueurs de fibres sont plus élevées pour le taux de délamination le plus grand (figure 4-36). Les défauts produits par la compression (plans de glissements, microcompressions) ont donc moins généré de coupe de fibres, à cause de l'imprégnation plus efficace.

Pour de faibles indices d'égouttage, les rejets Pulmac sont à peu près les mêmes dans les deux cas. Pour des indices d'égouttage plus grands, on observe des rejets plus faibles pour le taux de délaminage le plus grand. Ceci n'est cependant basé que sur un point expérimental. La fraction R14 suit la même tendance et, encore une fois, la différence ne concerne qu'un seul point.

Toujours à la figure 4-36, la fraction P200 est plus faible pour le taux de délaminage le plus grand. La production de fines a donc été plus importante dans le cas des copeaux moins délaminés. Évidemment, pour atteindre un indice d'égouttage donné, il a fallu leur appliquer plus d'énergie que pour les copeaux plus délaminés.

La figure 4-37 montre les propriétés mécaniques des papiers. Toutes sont supérieures pour le taux de délaminage le plus grand et les charges de produits chimiques les plus élevées. La densité étant plus grande, les fibres sont plus flexibles dans ce cas, tel qu'expliqué précédemment. Aussi, la longueur des fibres ayant été préservée, ceci contribue à obtenir de bonnes propriétés, surtout pour l'indice de déchirure.

TD = 27%
4.2% Na₂SO₃
2.5% NaOH

TD = 46%
5.1% Na₂SO₃
3.3% NaOH

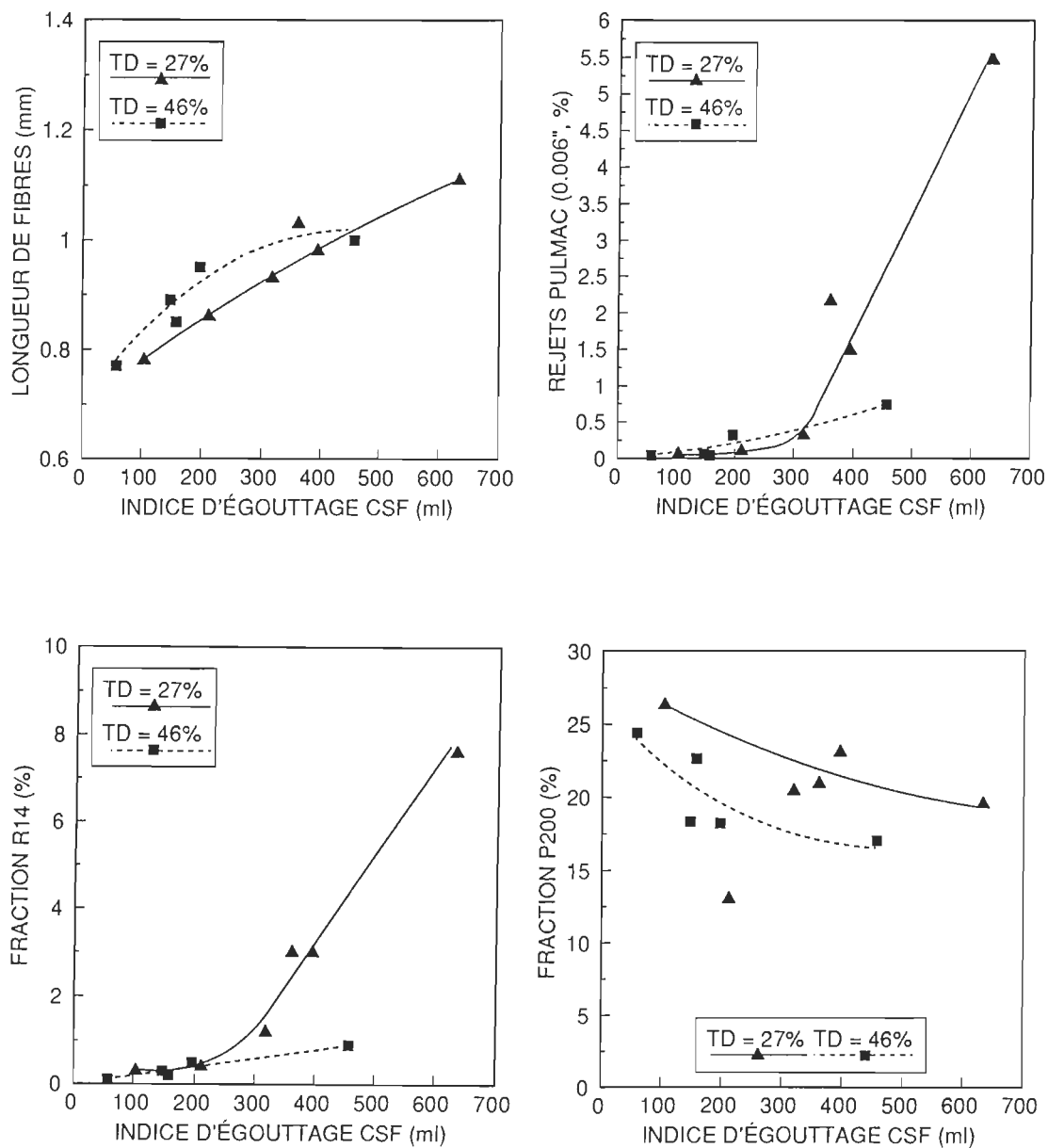


Figure 4-36. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)

TD = 27%	TD = 46%
4.2% Na ₂ SO ₃	5.1% Na ₂ SO ₃
2.5% NaOH	3.3% NaOH

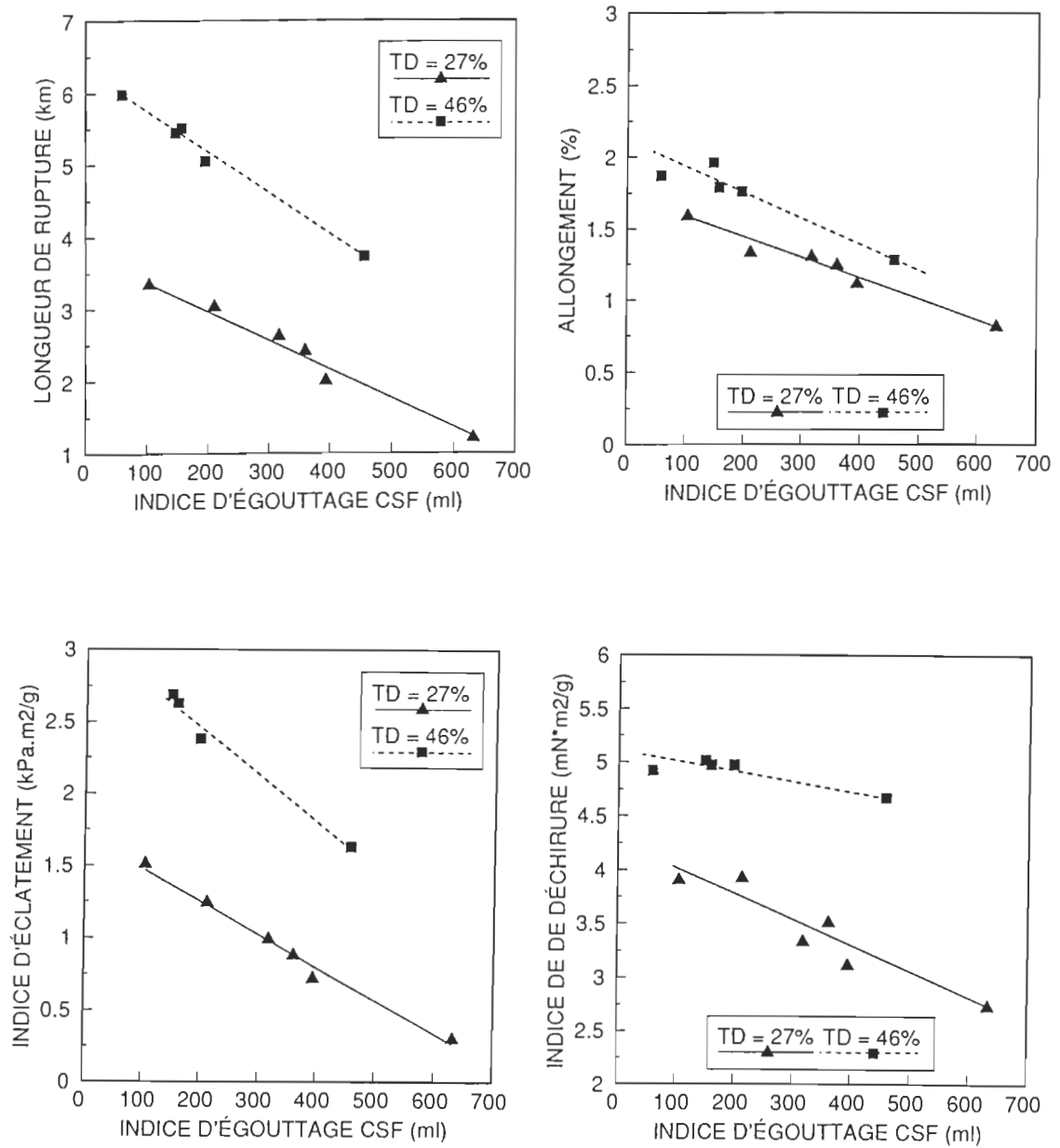


Figure 4-37. Propriétés mécaniques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)

Les propriétés optiques sont représentées à la figure 4-38. Les charges de produits chimiques résultantes conduisent à une diminution de la blancheur avec le taux de délaminage le plus grand. L'effet sur la blancheur dépend beaucoup des proportions relatives de soude et de sulfite. Une augmentation du contenu ionique fait diminuer l'opacité des pâtes mécaniques [62]. L'opacité diminue donc pour un taux de délaminage qui augmente.

Finalement, le tableau 4-2 donne la DCO, les solides dissous et le rendement pour les deux taux de délaminage. Les charges à l'effluent augmentent avec le taux de délaminage et les charges de produits chimiques, car il y a alors augmentation du niveau de réaction entre le bois et les produits. Dans ce cas, il y a aussi une baisse de rendement de 2.8%.

Pour obtenir des résultats à de mêmes charges de produits chimiques, il a fallu interpoler les séries de données à partir de courbes de résultats bruts. Le tremble italien a été utilisé, avec un diamètre moyen initial de 1,13 cm. La base de comparaison est 4,2% de sulfite de sodium et 3,3% de soude caustique. Le traitement thermique s'est fait à 100°C, pour une durée de 30 minutes. Les deux taux de délaminage comparés ont été 27% (un passage dans l'alimentateur à bouchon) et 45% (deux passages).

TD = 27%	TD = 46%
4.2% Na ₂ SO ₃	5.1% Na ₂ SO ₃
2.5% NaOH	3.3% NaOH

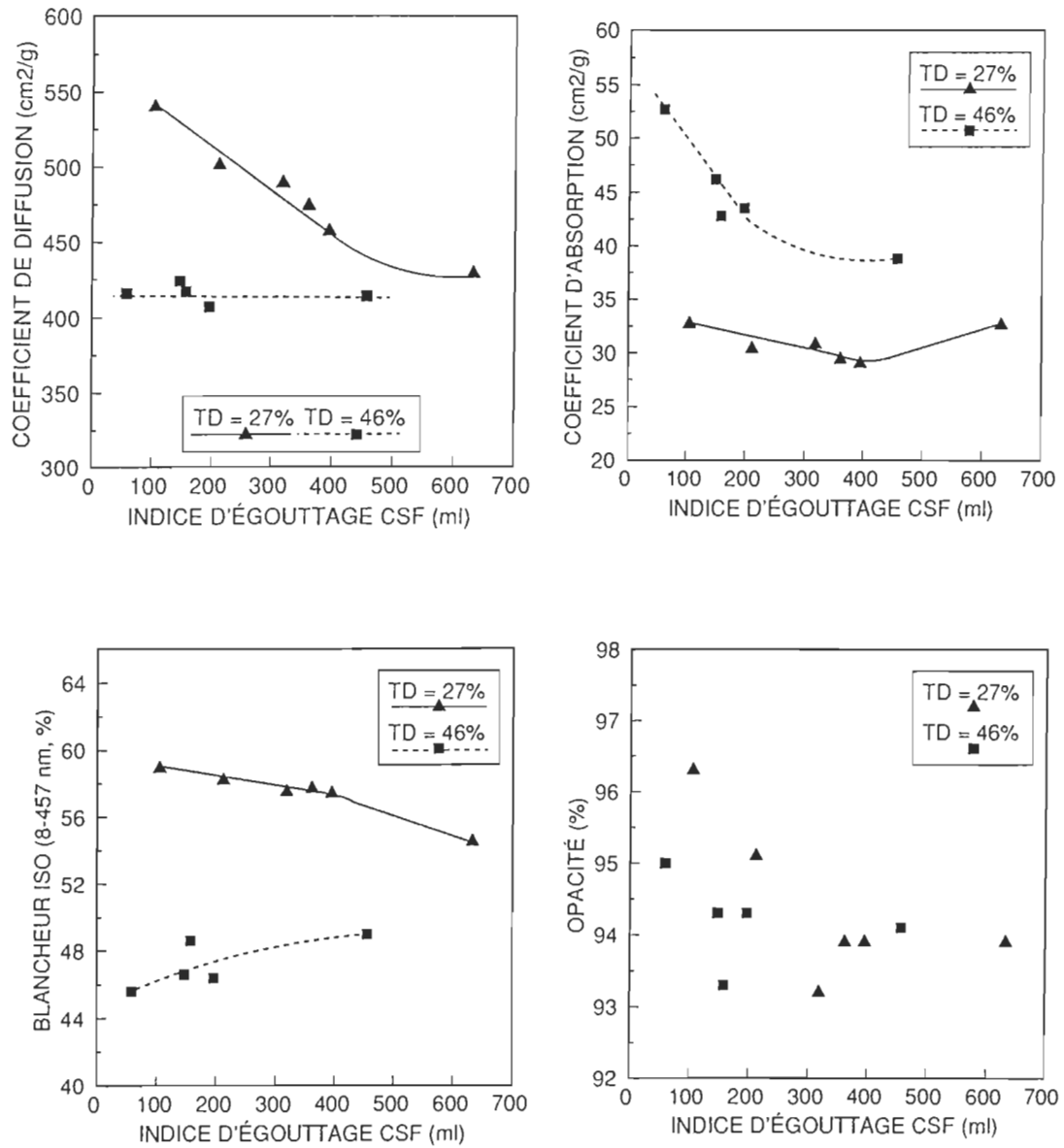


Figure 4-38. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)

Tableau 4-2. DCO, solides dissous et rendement (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques différents)

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	DCO (kg/t)	SOLIDES DISSOUS (kg/t)	RENDEMENT (%)
27	127	149	91.1
46	172	214	88.3

Tout d'abord, l'indice d'égouttage en fonction de l'énergie spécifique après raffinage est présenté à la figure 4-39. On constate une différence, l'énergie pour le taux de délaminage le plus grand étant la plus faible. Ce phénomène peut avoir plusieurs causes. Le traitement mécanique plus intense avant l'imprégnation peut vraisemblablement faire diminuer l'énergie nécessaire lors de la séparation des fibres, puisque des fibres sont séparées dans l'alimentateur à bouchon. Cependant, Kano *et al* [33] ont montré que la quantité d'énergie nécessaire pour la séparation des fibres est faible comparée à celle du raffinage. L'énergie de séparation des fibres ne représenterait qu'environ 20-33% de l'énergie totale [33]. D'autre part, il est possible que «l'ouverture» des copeaux rende l'imprégnation plus uniforme et que cela favorise une baisse de l'énergie de raffinage, en améliorant l'imprégnation chimique et le traitement thermique. Aussi, la compression intense des copeaux

introduit des défauts dans la matrice ligneuse et les fibres, défauts où la liqueur peut pénétrer et attaquer (section 2.4). On peut aussi imaginer que l'imprégnation est tout simplement plus efficace dans ce cas. Cela suppose qu'une partie de la liqueur absorbée ou entraînée par les copeaux peu délaminés n'est pas utilisée. Il y aurait alors un excès de liqueur dans certaines régions du bois et une absence relative ailleurs. Cette hypothèse est confirmée par les contenus ioniques, qui sont donnés au tableau 4-3.

Tableau 4-3. Contenus ioniques pour les deux taux de délaminage (PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	CONTENU IONIQUE TOTAL (mmol/kg)
27	188
45	218

Les énergies spécifiques obtenues avec ces pâtes PCMR sont du même ordre de grandeur que celles des pâtes PMR (section 4.3.1.1). Les températures utilisées pour le traitement thermique sont semblables dans les deux cas.

Il est probable que l'effet du taux de délaminage sur l'énergie spécifique de raffinage atteigne éventuellement un plateau. Si ce plateau est près de 45% de délaminage, dans ce cas-ci, cela expliquerait peut-être que la différence d'énergie ne soit pas plus grande (figure 4-39).

La densité des feuilles provenant de la mise en pâte des copeaux plus délaminés est plus grande (figure 4-40). Le traitement chimique plus uniforme, encore une fois, pour une énergie de raffinage non identique mais comparable, a vraisemblablement fait en sorte qu'une densité plus élevée a été atteinte avec le taux de délaminage le plus grand.

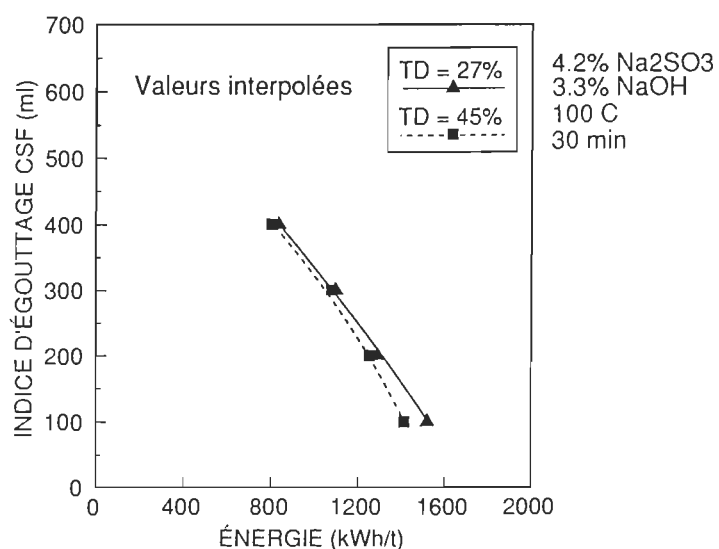


Figure 4-39. Indice d'égouttage en fonction de l'énergie spécifique (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

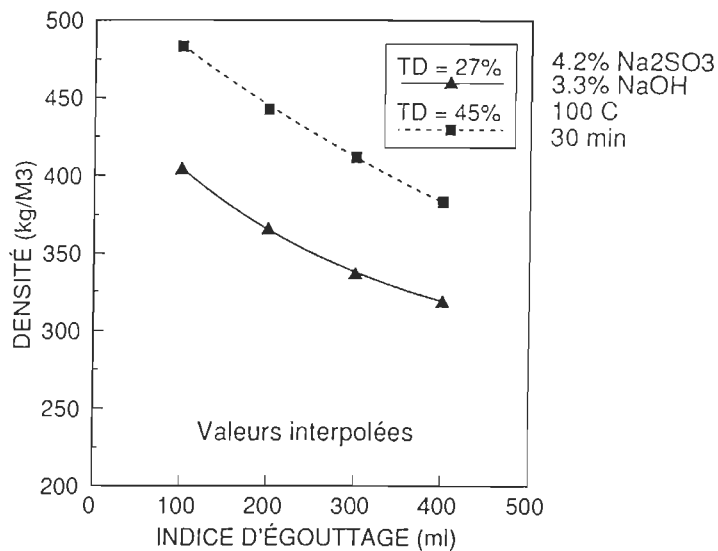


Figure 4-40. Densité en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

La figure 4-41 montre des propriétés de pâtes PCMR, toujours pour les mêmes charges de produits chimiques. En premier lieu, les fibres sont très légèrement plus courtes pour le taux de délaminage le plus élevé. Bien entendu, le travail mécanique que les copeaux subissent lors d'une compression intense peut endommager les fibres dans une certaine mesure (section 4.2). La différence n'est quand même pas très importante, puisque le traitement chimique assouplit les fibres. Étant donné qu'il est plus uniforme dans le cas de copeaux plus délaminés, il est probable que les défauts provoqués lors de compression ont moins tendance à

donner lieu à une coupe de fibre, lors du raffinage. En effet, lors des mises en pâte PMR, donc en l'absence de traitement chimique, les longueur de fibres des copeaux très délaminés étaient beaucoup plus faibles que celles des copeaux peu délaminés.

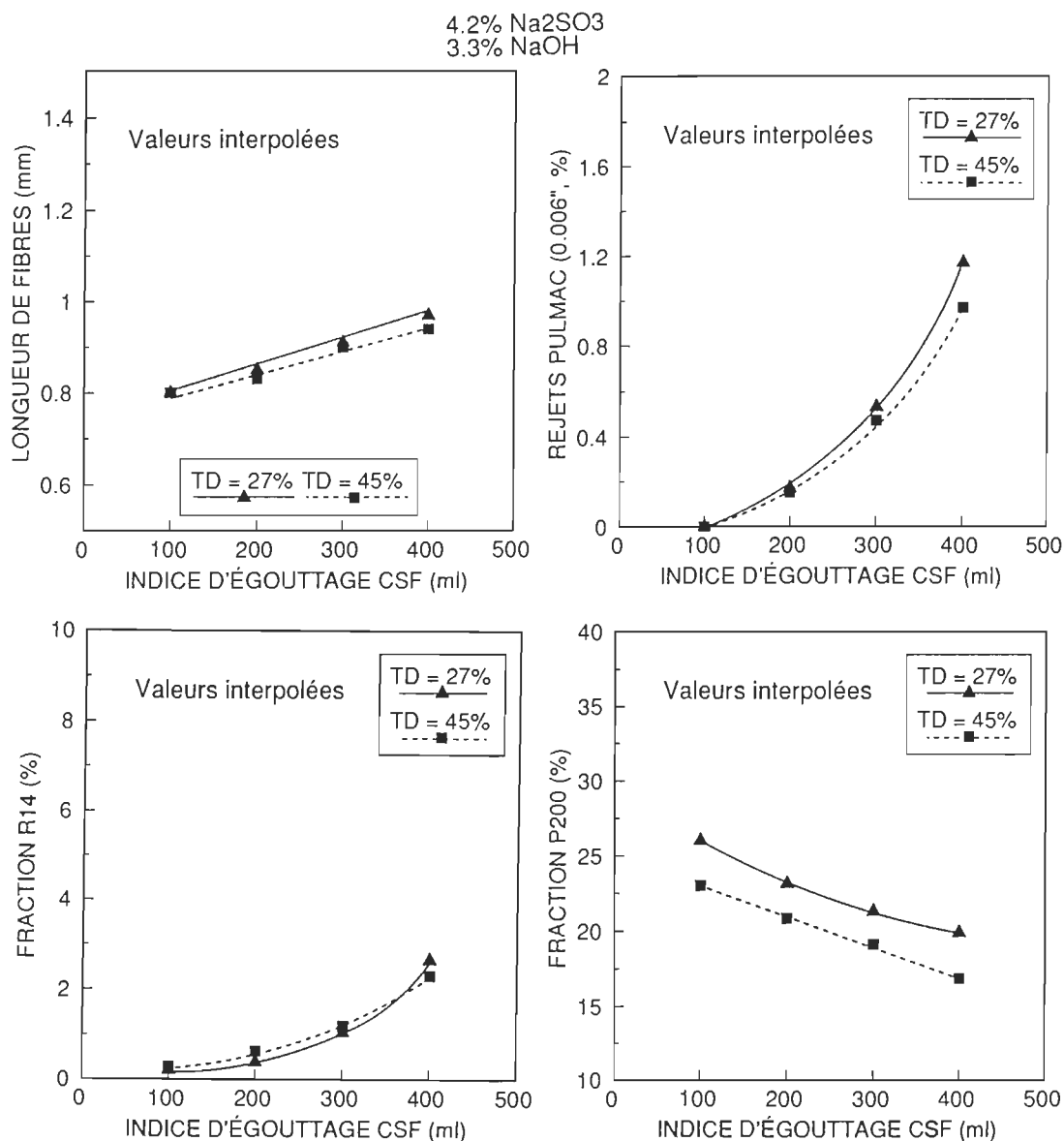


Figure 4-41. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

Les rejets Pulmac, quant à eux, sont plus faibles pour le taux de délaminage le plus élevé, pour des indices d'égouttage élevés. Dans le cas de la mise en pâte PMR, il était difficile de voir une différence. On peut invoquer ici les mêmes raisons que précédemment, c'est-à-dire une plus grande uniformité du traitement chimique.

L'ensemble des propriétés mécaniques des feuilles (figure 4-42) sont nettement supérieures pour le taux de délaminage plus élevé. Même l'indice de déchirure est mieux, malgré une longueur de fibres légèrement inférieure pour le taux de délaminage le plus grand. Ces résultats sont en accord avec la densité plus grande de la figure 4-40. En effet, pour des pâtes mécaniques ou chimico-mécaniques, une augmentation de la densité de la feuille se traduit généralement par une augmentation de la qualité des liens inter-fibres et des propriétés mécaniques [30].

Par contre, les propriétés optiques (figure 4-43) sont moins bonnes (blancheur et opacité inférieures) pour le taux de délaminage le plus grand. Il semble donc que les charges de produits chimiques favorisent des propriétés plus faibles à ce niveau, puisque l'imprégnation est sans doute plus efficace pour le taux de délaminage le plus important.

4.2% Na₂SO₃
3.3% NaOH

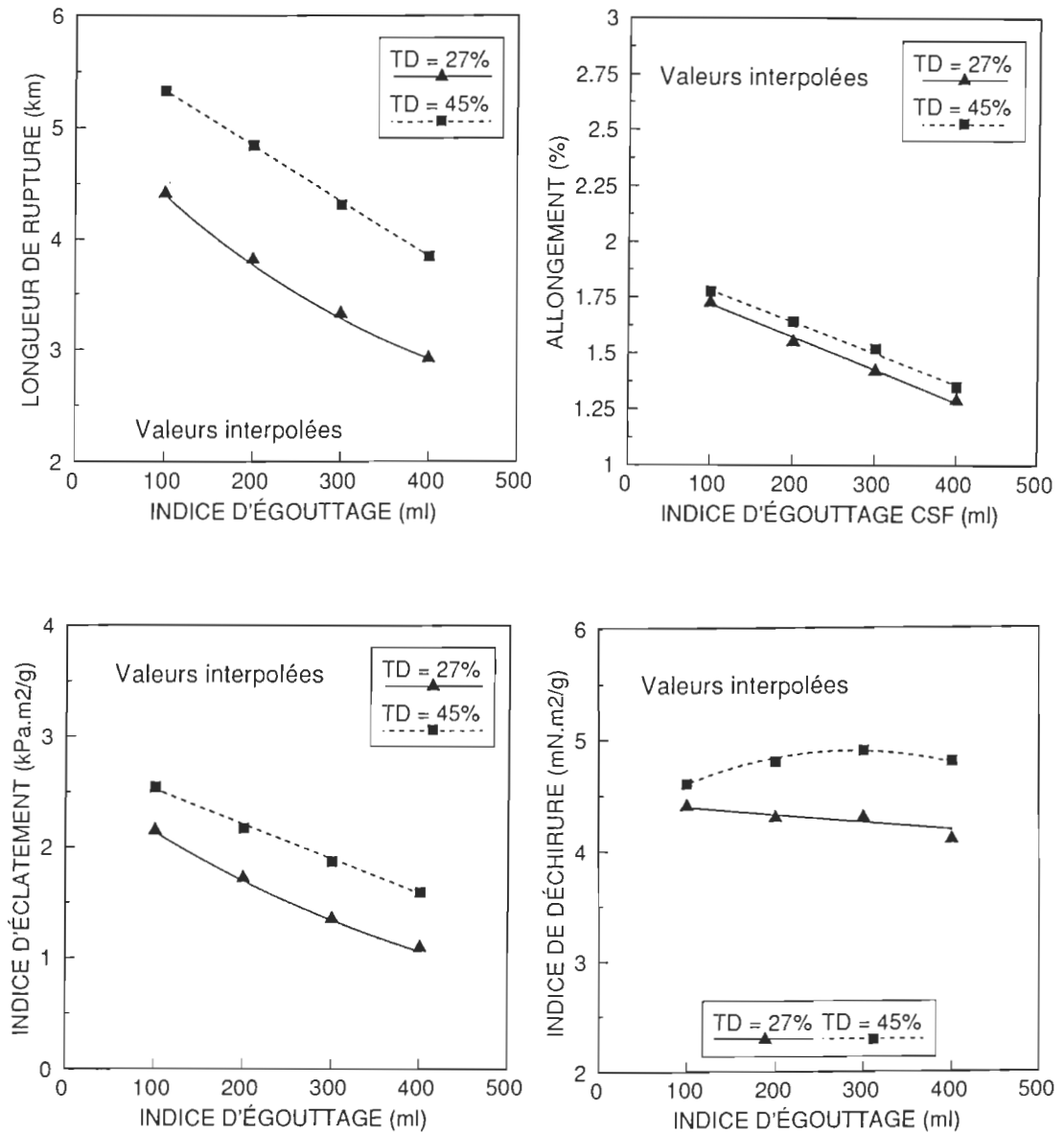


Figure 4-42. Propriétés de résistance en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

4.2% Na₂SO₃
3.3% NaOH

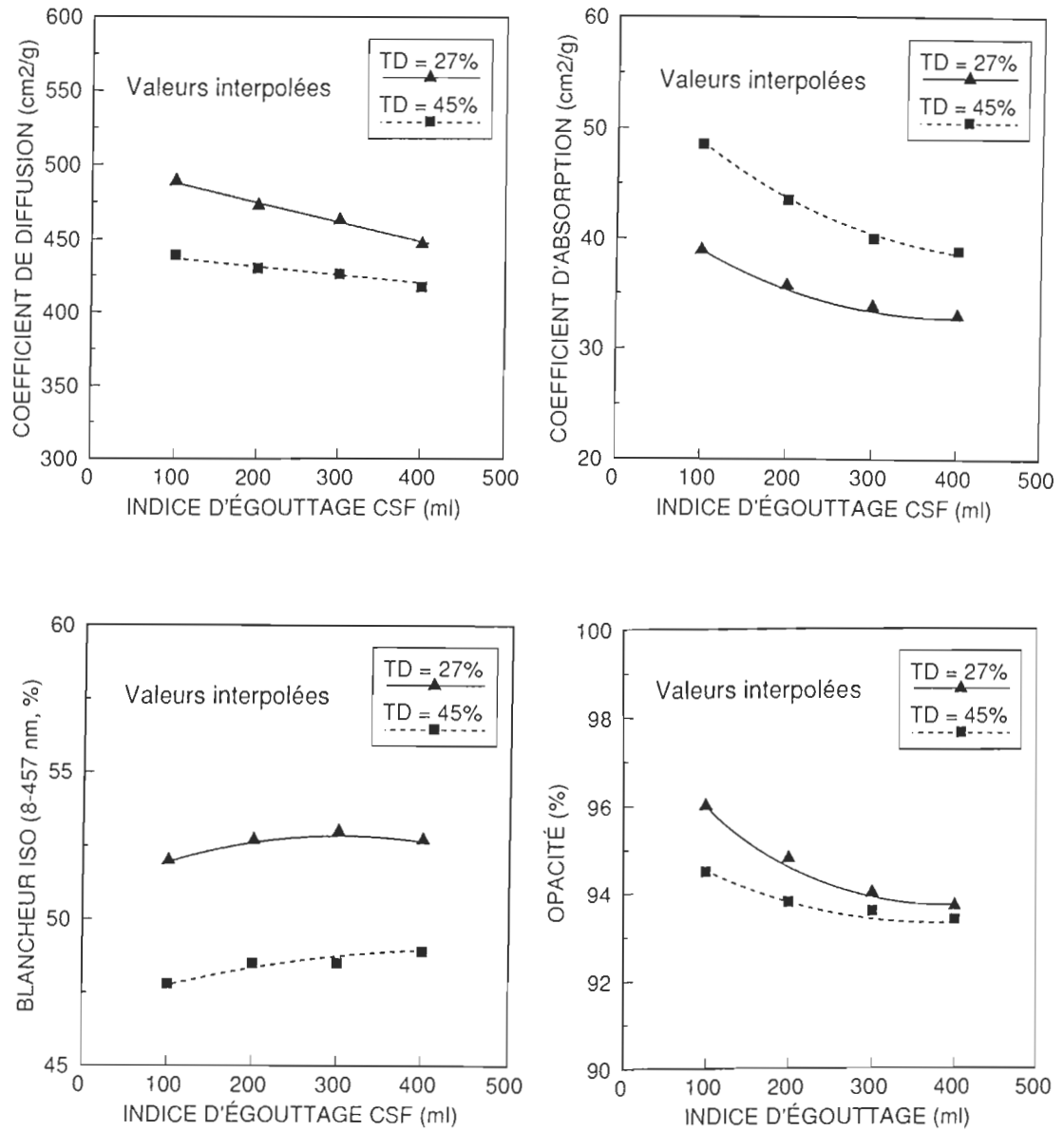


Figure 4-43. Propriétés optiques en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

Le tableau 4-4 présente la DCO, les solides dissous et le rendement pour les deux taux de délaminage. Il n'est pas surprenant que les charges à l'effluent augmentent et que le rendement diminue; en effet, une augmentation du niveau de réaction des produits chimiques avec le bois conduit à une telle situation.

Tableau 4-4. DCO, solides dissous et rendement (pâtes PCMR échelle pilote, chimiques identiques)

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	DCO (kg/t)	SOLIDES DISSOUS (kg/t)	RENDEMENT (%)
27	154	189	89.4
45	170	199	88.4

Les propriétés physiques obtenues dans la deuxième partie de cette section sont plus élevées pour le contenu ionique le plus grand, qui correspond au taux de délaminage le plus grand. Il est donc possible, pour de mêmes charges en produits chimiques, d'obtenir un contenu ionique et des propriétés physiques équivalents, en augmentant le délaminage des copeaux et en diminuant le temps de résidence dans les trémies de réaction. Les mêmes observations qu'à la section 4.3.2.1 peuvent donc être faites.

D'autre part, l'amélioration de l'efficacité de l'imprégnation par une augmentation du taux de délaminage peut entraîner une diminution de l'énergie spécifique de raffinage pour atteindre un certain indice d'égouttage, pour de mêmes propriétés physiques ou optiques.

Par exemple, pour la mise en pâte PCMR à 4.2% de Na_2SO_3 et 3.3% NaOH, on peut décider que le paramètre important est l'indice d'éclatement. Si l'on vise une valeur de 2 $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$, on obtient les données du tableau 4-5, en supposant que l'électricité coûte 0.025 \$CAN par kWh.

Il y a donc une différence de 9.00 \$CAN/t au niveau du coût en énergie, pour atteindre le même indice d'éclatement. Pour une usine de 500 t/j opérant pendant 350 jours dans l'année, ceci correspond à une économie de 1 575 000 \$CAN par an. D'autres propriétés sont données dans le tableau. Évidemment, si d'autres paramètres sont considérés, il est possible que l'épargne s'en trouve modifiée. Par exemple, si le maintien de la blancheur est important, il faut l'ajuster lors d'une étape de blanchiment subséquente qui entraînera des coûts supplémentaires.

Tableau 4-5. Calcul du coût en énergie spécifique pour PCMR à un indice d'éclatement de 2.0 kPa*m²/g

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	27	45
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	2.0	2.0
INDICE D'ÉGOUTTAGE CSF (ml)	125	275
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/t)	1500	1140
COÛT EN ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (\$CAN/t)	37.50	28.50
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.4	4.8
BLANCHEUR ISO (8-457 nm, %)	52.3	48.3
OPACITÉ (%)	95.5	93.5

Si l'on veut produire un grade de PCMR avec un indice d'égouttage de 150 ml, avec les mêmes charges de produits chimiques et les mêmes conditions que dans l'exemple précédent, alors on obtient les valeurs du tableau 4-6 :

Tableau 4-6. Calcul du coût en énergie spécifique pour PCMR à un indice d'égouttage de 150 ml

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	27	45
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	1.9	2.4
INDICE D'ÉGOUTTAGE CSF (ml)	150	150
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/t)	1433	1341
COÛT EN ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (\$CAN/t)	35.80	33.50
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	4.4	4.7
BLANCHEUR ISO (8-457 nm, %)	52.3	48.1
OPACITÉ (%)	95.2	94.1

La différence en coût pour l'énergie de raffinage est de 2.30 \$CAN/t, pour un même indice d'égouttage de 150 ml. Pour une usine de 500 t/j, opérant pendant 350 jours dans l'année, ceci donne une économie annuelle de 402 500 \$CAN. De plus, dans ce cas, les propriétés physiques sont supérieures pour le taux de délaminage le plus élevé, qui correspond au coût le plus faible.

Aussi, les charges de produits chimiques peuvent être diminuées en augmentant le délaminage, tout en conservant des propriétés semblables. Les données brutes que l'on retrouve à l'annexe B permettent de faire un calcul approximatif des coûts associés à une diminution des charges de produits chimiques. Par exemple, pour la mise en pâte PCMR, si l'on vise un indice d'éclatement de 2.0 kPa*m²/g à un indice d'égouttage de 150 ml, alors on obtient les valeurs du tableau 4-7.

Il y a donc une économie de 2.00 \$CAN/t avec le taux de délaminage le plus élevé. Cette économie tient compte de la diminution des coûts en produits chimiques et d'une augmentation des coûts en énergie spécifique. Sur une base annuelle, cela donne 350 000 \$CAN pour une usine de 500 t/j fonctionnant 350 jours par an.

La référence utilisée pour les prix des produits chimiques est donnée au tableau 4-8. Le taux de change utilisé pour faire la conversion entre les dollars américains et canadiens est 0.7825 (11 janvier 1993).

Tableau 4-7. Calcul des coûts pour des mises en pâte PCMR à un indice d'égouttage de 150 ml et un indice d'éclatement de 2 kPa*m²/g.

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	27	45
INDICE D'ÉGOUTTAGE CSF (ml)	150	150
INDICE D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)	2.0	2.0
CHARGE DE NaOH (%)	3.4	3.3
CHARGE Na ₂ SO ₃ (%)	4.2	3.3
COÛT EN PRODUITS CHIMIQUES (\$CAN/t)	47.10	39.70
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/t)	1351	1566
COÛT EN ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (\$CAN/t)	33.80	39.20
COÛT EN CHIMIQUES ET EN ÉNERGIE (\$CAN/t)	80.90	78.90

Tableau 4-8. Prix des produits chimiques et référence

PRODUIT	COÛT (\$CAN/kg)	RÉFÉRENCE
NaOH	0.44	[63]
Na ₂ SO ₃	0.76	[63]

L'augmentation du délaminage des copeaux peut également entraîner des coûts supplémentaires au niveau du traitement des effluents, étant donné que les charges de DCO et de solides dissous augmentent. Dans ce domaine, les coûts par kg des charges à l'effluent dépendent de plusieurs facteurs (débit, concentration, type de traitement, etc) et toutes les usines sont différentes. Il faut cependant prendre conscience que ces charges supplémentaires pourraient hausser les coûts d'opération des systèmes de traitement des eaux. Finalement, la diminution du rendement implique l'utilisation d'une plus grande quantité de bois pour produire une tonne de pâte.

4.3.3 Mise en pâte mécanique alcaline au peroxyde (APMP^{MD})

Pour cette section, les imprégnations ont été faites en une étape, avec des produits de blanchiment. Ces produits incluent le peroxyde d'hydrogène, la soude caustique, le DTPA, le silicate de sodium et le sel d'Epsom. Ce type de mise en pâte implique aussi un traitement thermique assez modéré et on termine par un traitement mécanique par raffinage.

Comme pour la mise en pâte PCMR, des imprégnations ont été faites en laboratoire (section 4.3.3.1) et à l'échelle pilote (section 4.3.3.2). Aussi, pour la partie laboratoire conventionnelle, les ratios d'absorption augmentent avec le taux de délaminage. Les imprégnations ont été menées selon certaines concentrations de solution, pour des temps de trempage donnés. Par contre, pour la partie échelle pilote, des efforts ont encore été faits pour présenter des résultats à de mêmes charges de produits chimiques pour deux taux de délaminage différents. Dans les deux cas, des produits chimiques standard pour le blanchiment au peroxyde d'hydrogène ont été utilisés.

4.3.3.1 Interrelation entre le taux de délaminage et les charges de produits chimiques

Dans cette section, des copeaux de tremble frais et âgés de 10 mois ont été utilisés. Les premiers avaient un diamètre moyen initial de 1,45 cm et 1,43 cm pour les seconds. La cuisson s'est effectuée à 70°C, pour une période variant entre 15 et 45 minutes. Le trempage a duré une minute, avec des concentrations de solutions constantes pour les taux de délaminage différents. Les ratios d'absorption ont donc été différents, encore une fois, ce qui a influé sur les résultats.

Premièrement, à la figure 4-44, on remarque que l'absorption d'eau augmente avec le taux de délaminage, pour un temps de trempage d'une minute. La réponse de l'absorption au taux de délaminage est cependant différente avec des produits chimiques, tel qu'on peut le voir à la figure 4-45. L'absorption est augmentée par la concentration en NaOH et diminuée par la concentration en H₂O₂. Le NaOH est un agent gonflant et ceci explique qu'il augmente l'absorption, bien que sa viscosité soit importante. Le H₂O₂ diminue l'absorption parce qu'il utilise une partie du NaOH pour la réaction de blanchiment et qu'il en reste alors moins pour le gonflement.

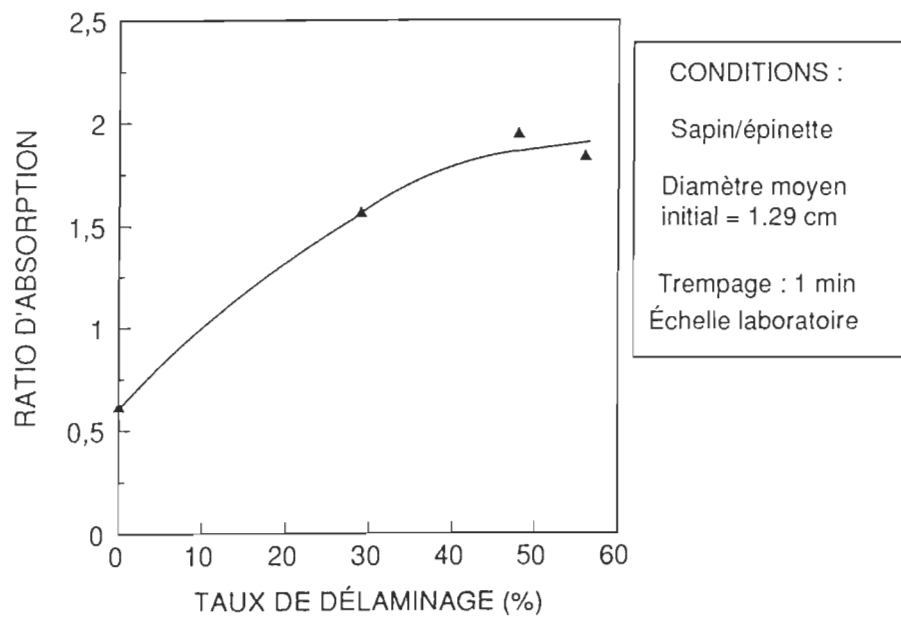


Figure 4-44. Absorption d'eau en fonction du taux de délaminage

La figure 4-46 montre les courbes de blanchiment de copeaux pour un éventail de taux de délaminage et des copeaux frais et âgés de 10 mois. On constate que la blancheur augmente avec le taux de délaminage dans les deux cas. Si le blanchiment de copeaux est principalement un phénomène de surface, on peut donc espérer, à partir de ces résultats, sauver des produits chimiques en augmentant la surface spécifique des copeaux avant l'imprégnation chimique. On peut aussi remarquer à la figure 4-46 qu'on réussit quand même à obtenir d'assez bons résultats avec les vieux copeaux, malgré une blancheur initiale plus faible. Il faut dire que les vieux copeaux sont plus délaminés que les frais et cela joue sur

l'absorption de liqueur et l'efficacité de l'imprégnation. Ceci sera regardé de plus près un peu plus loin.

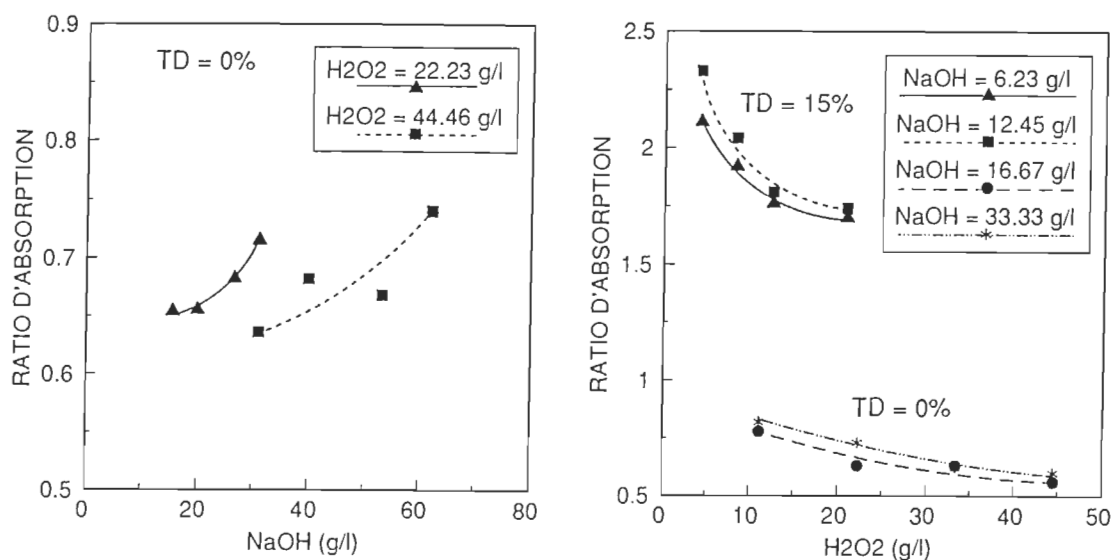


Figure 4-45. Absorption de liqueur en fonction des charges de NaOH et H₂O₂

Afin d'analyser plus à fond l'utilisation du peroxyde d'hydrogène par les vieux copeaux versus les copeaux frais, des pâtes ont aussi été blanchies. Elles ont été produites à partir des mêmes copeaux, dans un mélangeur domestique. Les courbes résultantes sont donc présentées à la figure 4-47 en fonction du peroxyde ajouté et du peroxyde consommé. À de hautes charges de peroxyde, des

blancheurs similaires sont obtenues avec les deux pâtes. Cependant, la pâte produite à partir des copeaux frais consomme moins de peroxyde (tableau 4-9).

De la même façon, à la figure 4-48, on compare les blancheurs obtenues avec les deux types de copeaux initiaux (taux de délaminage = 0%) et une dimension moyenne pratiquement identique. Des blancheurs supérieures sont obtenues avec les copeaux frais mais le gain de blancheur est semblable dans les deux cas.

Puisque les copeaux délaminés frais et âgés n'ont pas les mêmes taux de délaminage, des graphiques de la blancheur en fonction de ce dernier ont été dessinés pour plusieurs concentrations de peroxyde dans la liqueur. Les données ont été lues sur les graphiques de la figure 4-46 et on obtient ceux de la figure 4-49. À nouveau, on constate que des blancheurs supérieures peuvent être atteintes avec des copeaux frais, comparativement à de vieux copeaux. Malgré un taux de délaminage plus grand pour un même traitement mécanique, il est clair que le vieillissement des copeaux n'est pas une solution intéressante. Ceci est d'ailleurs en accord avec la littérature et les pratiques courantes de l'industrie, où on cherche à utiliser des copeaux frais.

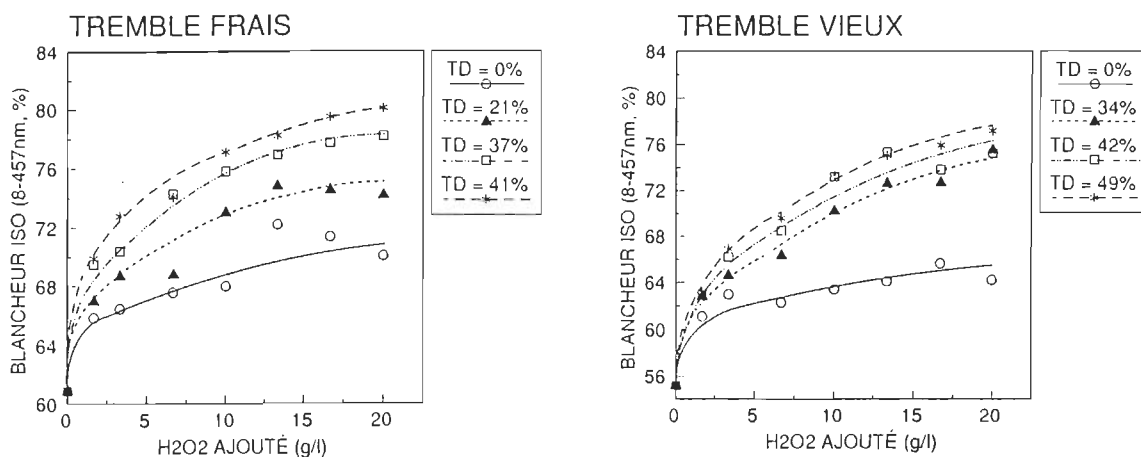


Figure 4-46. Blancheur en fonction de la concentration de H_2O_2 et du taux de délaminage (pâtes APMP^{MD} échelle laboratoire)

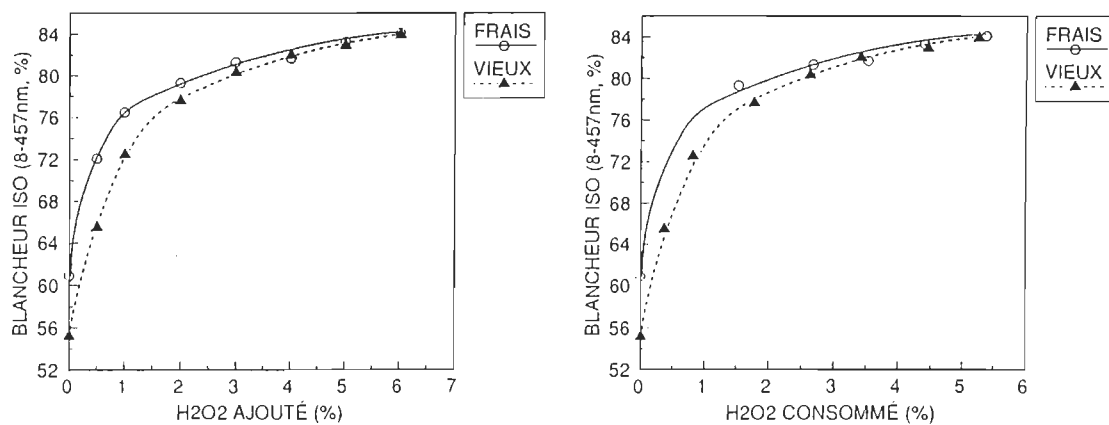
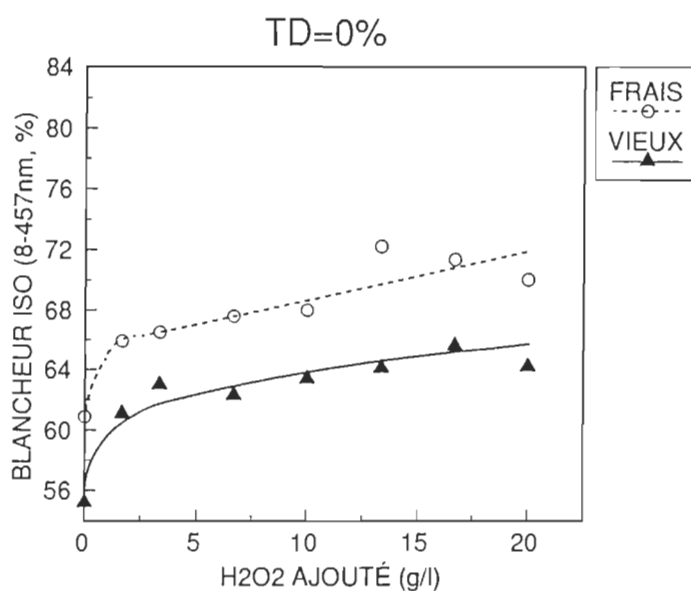


Figure 4-47. Blancheur des pâtes en fonction du peroxyde ajouté et consommé (pâtes mécaniques blanchies)

Tableau 4-9. Consommation de peroxyde pour une blancheur finale de 80% ISO

	PATE DE VIEUX COPEAUX	PATE DE COPEAUX FRAIS
BLANCHEUR ISO INITIALE (8-457 nm, %)	55.2	60.9
BLANCHEUR ISO FINALE (8-457 nm, %)	80	80
H ₂ O ₂ AJOUTÉ (%)	2.78	2.13
H ₂ O ₂ CONSOMMÉ (%)	2.47	1.82

Figure 4-48. Blancheur en fonction de la concentration de H₂O₂ pour des copeaux frais et âgés (pâtes APMP^{MD}, échelle laboratoire)

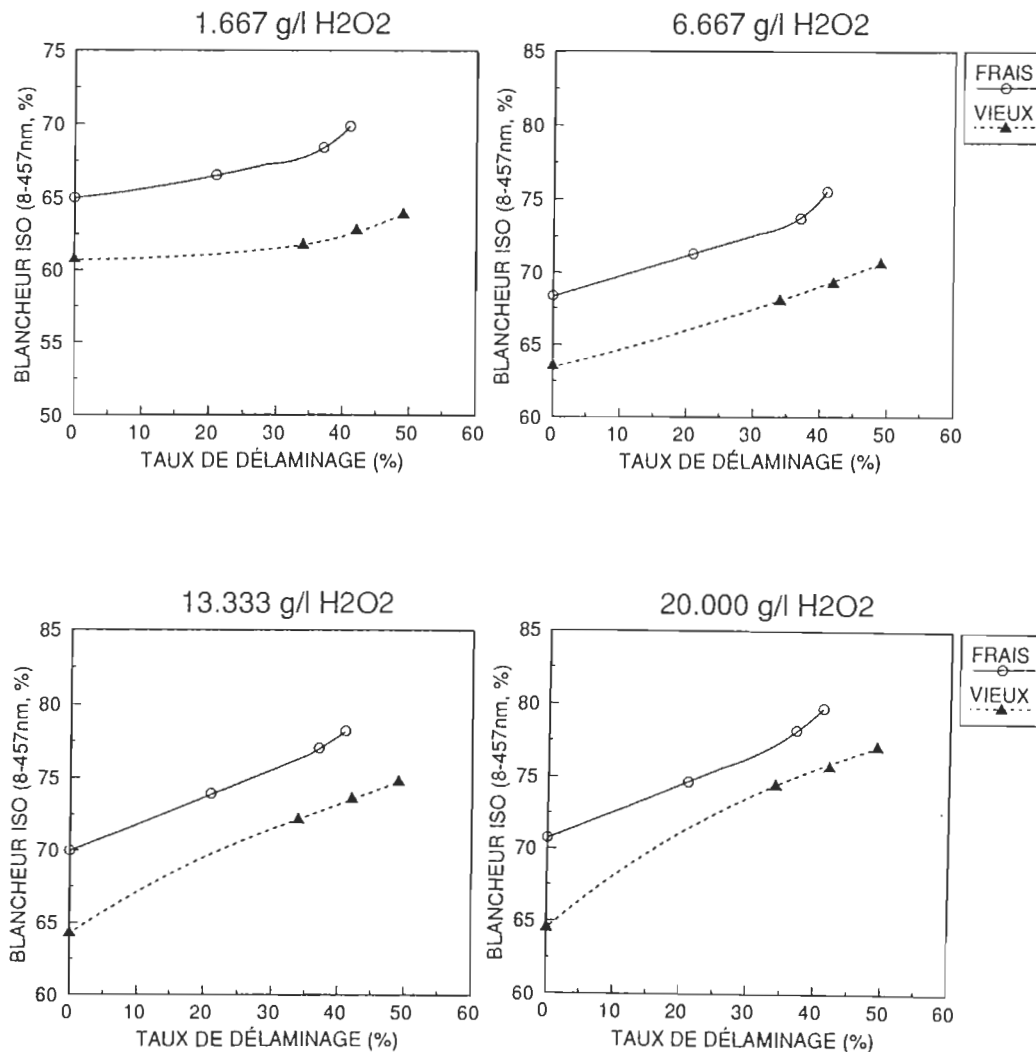


Figure 4-49. Blancheur en fonction du taux de délaminage, copeaux frais et âgés (pâtes APMP^{MD} échelle laboratoire)

Le taux de délaminage a aussi été représenté en fonction du contenu ionique total, pour différentes charges de produits chimiques (figure 4-50). Le contenu ionique est ici interprété comme un indice de l'avancement de la réaction

de blanchiment. Tout d'abord, on voit qu'il y a une tendance d'augmentation du contenu ionique avec le taux de délaminage. C'est donc dire que l'avancement de la réaction est plus grand avec un taux de délaminage plus élevé. De plus, cette tendance est d'autant plus accentuée que les charges de produits chimiques sont élevées. Cela est normal puisqu'il ne saurait y avoir de réaction plus intense en l'absence de produits chimiques. On remarque aussi que la forme des courbes est différente pour les copeaux âgés. En effet, le contenu ionique atteint comme un plateau alors que les copeaux frais, on a plutôt une droite. Si les copeaux vieux sont déjà attaqués par des bactéries ou des champignons, il est probable que les possibilités de réaction avec les produits de blanchiment soient réduites. Les points sont aussi plus dispersés dans le cas des vieux copeaux mais il est possible d'observer des tendances.

Enfin, la blancheur a été représentée en fonction du contenu ionique total, pour les différents taux de délaminage et les pâtes (figure 4-51a). Si les résultats pour copeaux âgés sont difficiles à interpréter, ceux des copeaux frais sont intéressants. On y voit en effet que pour un même contenu ionique, le délaminage fait augmenter la blancheur. Autrement dit, malgré le fait que les produits chimiques aient autant réagi, le fait qu'ils aient été mieux répartis a amélioré le résultat final.

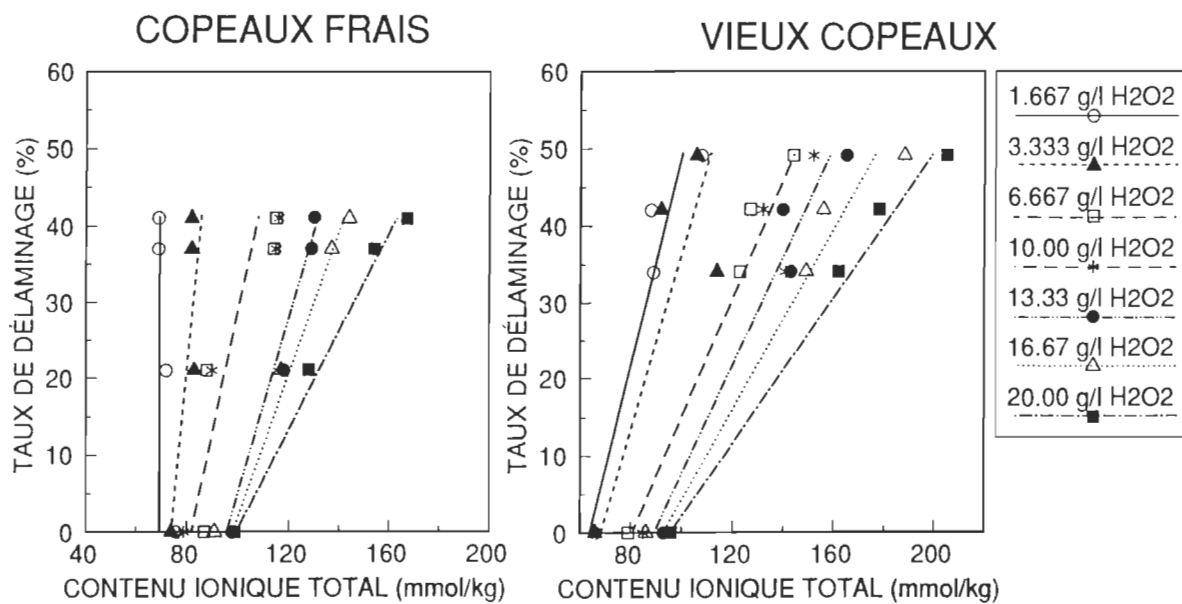


Figure 4-50. Taux de délaminage en fonction du contenu ionique (pâtes APMP^{MD} échelle laboratoire)

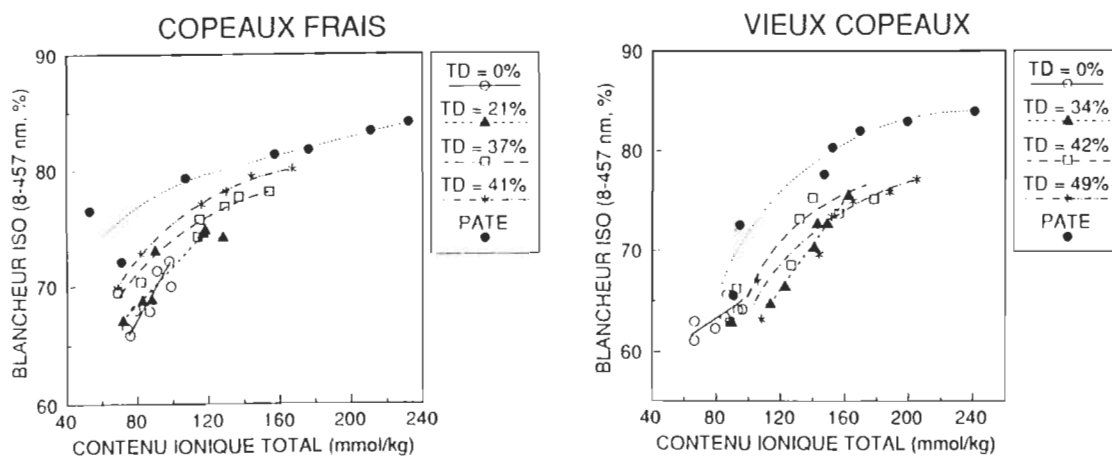


Figure 4-51a. Blancheur en fonction du contenu ionique (pâtes APMP^{MD} échelle laboratoire)

4.3.3.2 Impact du taux de délaminage sur les propriétés des pâtes APMP^{MD} produites en usine pilote

À l'échelle pilote, encore une fois, les résultats peuvent être comparés à un même ratio d'absorption, ce qui permet d'identifier l'effet du taux de délaminage pour une même consommation de produits chimiques. Dans ce cas-ci, les charges utilisées ont été 2,7% de peroxyde d'hydrogène et 3,0% en alcalinité. Le traitement thermique s'est déroulé à 60°C pendant 30 minutes. Les copeaux utilisés avaient une dimension moyenne initiale de 1,13 cm. Les taux de délaminage comparés ont été 29% et 45%.

Tout d'abord, l'énergie spécifique nécessaire pour obtenir un certain indice d'égouttage est légèrement plus faible pour le taux de délaminage le plus grand (figure 4-51). Il semble donc qu'une imprégnation plus uniforme et plus efficace diminue l'énergie de raffinage, même si les charges de produits chimiques sont les mêmes. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans la section de mise en pâte PCMR (section 4.3.2.2) et les explications fournies alors sont valables ici aussi.

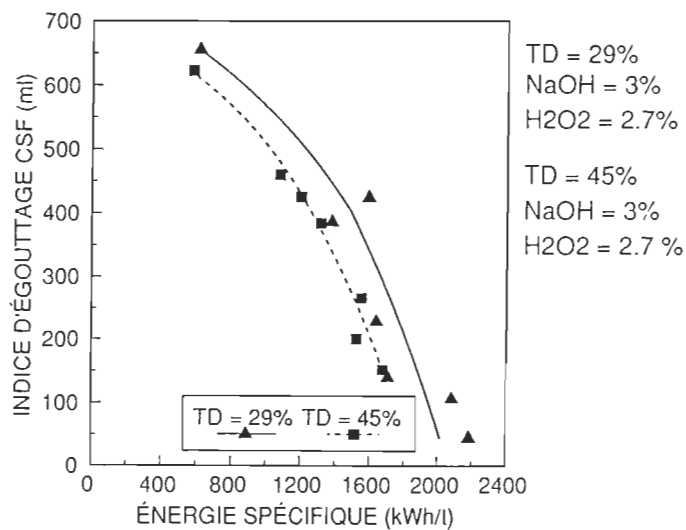


Figure 4-51. Indice d'égouttage après raffinage en fonction de l'énergie spécifique (pâtes APMP^{MD} échelle pilote)

Malgré le fait que moins d'énergie a été consommée au même indice d'égouttage, la densité des feuilles produites avec les pâtes de copeaux plus délaminés est plus élevée (figure 4-52). L'uniformité et l'efficacité de l'imprégnation, encore une fois, ont donc contribué à augmenter la densité.

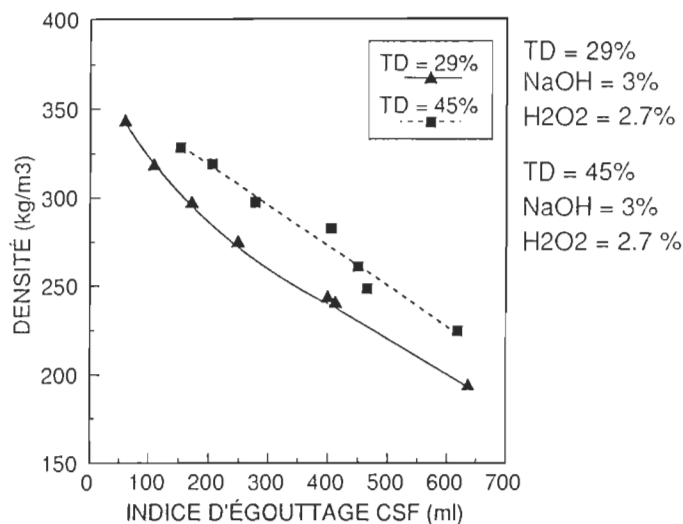


Figure 4-52. Densité des feuilles en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP^{MD} échelle pilote)

À nouveau, on constate que l'augmentation du taux de délaminage a fait diminuer la longueur des fibres (figure 4-53). Ceci explique en partie l'augmentation de la densité avec le taux de délaminage. La plus grande flexibilité du réseau fibreux contribue également à augmenter la densité. Mais à propos de la longueur des fibres, tel que mentionné précédemment, le traitement mécanique intense avant l'imprégnation chimique doit d'une certaine façon endommager les fibres et provoquer une coupe au niveau du raffinage. Le niveau de coupe des fibres dépendrait de plusieurs facteurs, entre autres de l'intensité de la compression et du

délaminage et de la quantité de produits chimiques utilisés au cours de l'imprégnation. Ceci dit, malgré une diminution de la longueur des fibres, les propriétés mécaniques peuvent être bonnes quand même, s'il y a compensation au niveau de la qualité et de la quantité des liens fibre à fibre.

Toujours à la figure 4-53, on voit que les rejets Pulmac sont moins importants pour le taux de délaminage le plus grand. De nouveau, on peut attribuer ce phénomène à une meilleure imprégnation, qui devrait permettre de séparer les fibres plus facilement. Dans la même ligne de pensée, on constate que la fraction R14 diminue et la fraction P200 augmente avec un taux de délaminage croissant.

Les propriétés mécaniques suivent l'augmentation de densité des feuilles, elles augmentent avec le taux de délaminage (figure 4-54). Ceci est vraisemblablement dû à une amélioration de la qualité et de la quantité des liens inter-fibres, qui ferait plus que compenser la diminution de longueur de fibres. Ceci est favorisé par une plus grande flexibilité des fibres. Jackson [64] a expliqué que si l'imprégnation n'est pas uniforme, il se trouve des fibres peu flexibles dans la pâte, malgré l'utilisation de produits chimiques.

NaOH = 3%
H₂O₂ = 2.7%

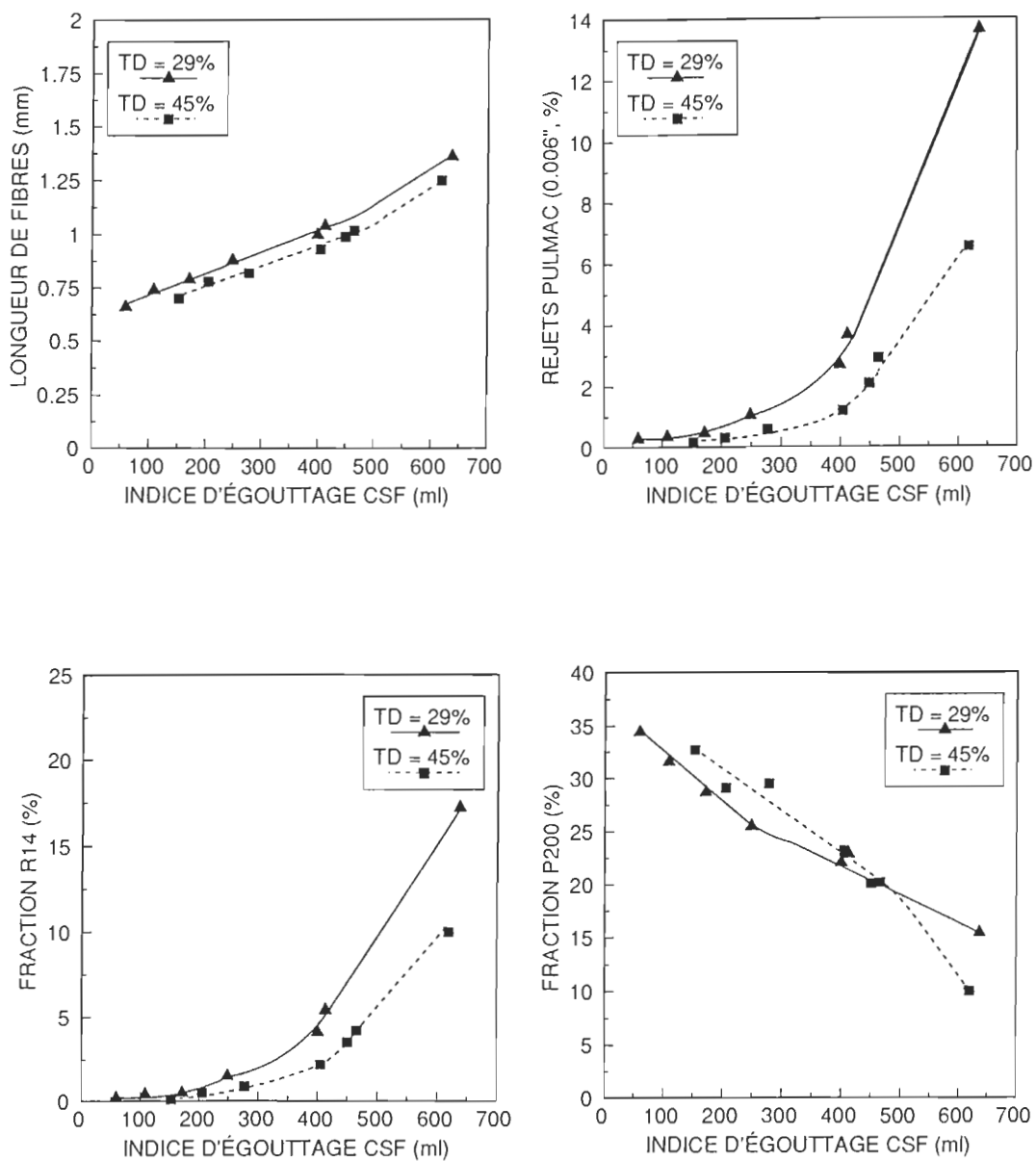


Figure 4-53. Propriétés des pâtes en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP^{MD} échelle pilote)

Finalement, on assiste à une amélioration de la blancheur et une diminution de l'opacité du papier, avec une augmentation du délaminage (figure 4-55). Le blanchiment au peroxyde est généralement accompagné d'une diminution de l'opacité [30]. Ceci suggère qu'une plus grande partie du peroxyde soit utilisée adéquatement lorsque la surface spécifique des copeaux augmente.

En somme, l'augmentation de la surface spécifique par compression et délaminage a amélioré la qualité et l'efficacité de l'imprégnation chimique et les propriétés des pâtes et papiers résultants. Une exception est l'opacité, qui diminue, mais cette situation est consécutive du reste.

NaOH = 3%
H₂O₂ = 2.7%

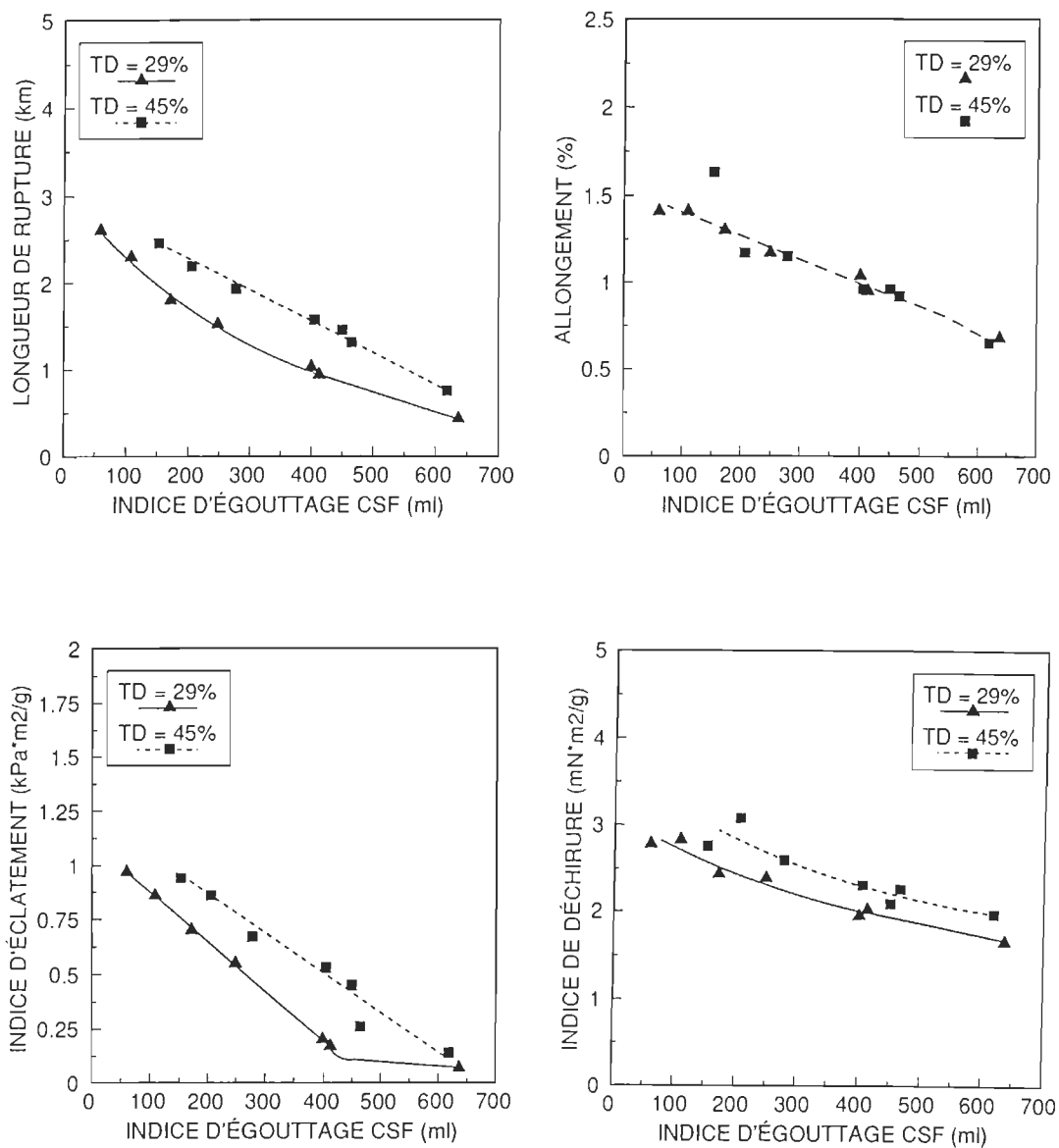


Figure 4-54. Propriétés mécaniques des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP^{MD} échelle pilote)

NaOH = 3%
H₂O₂ = 2.7%

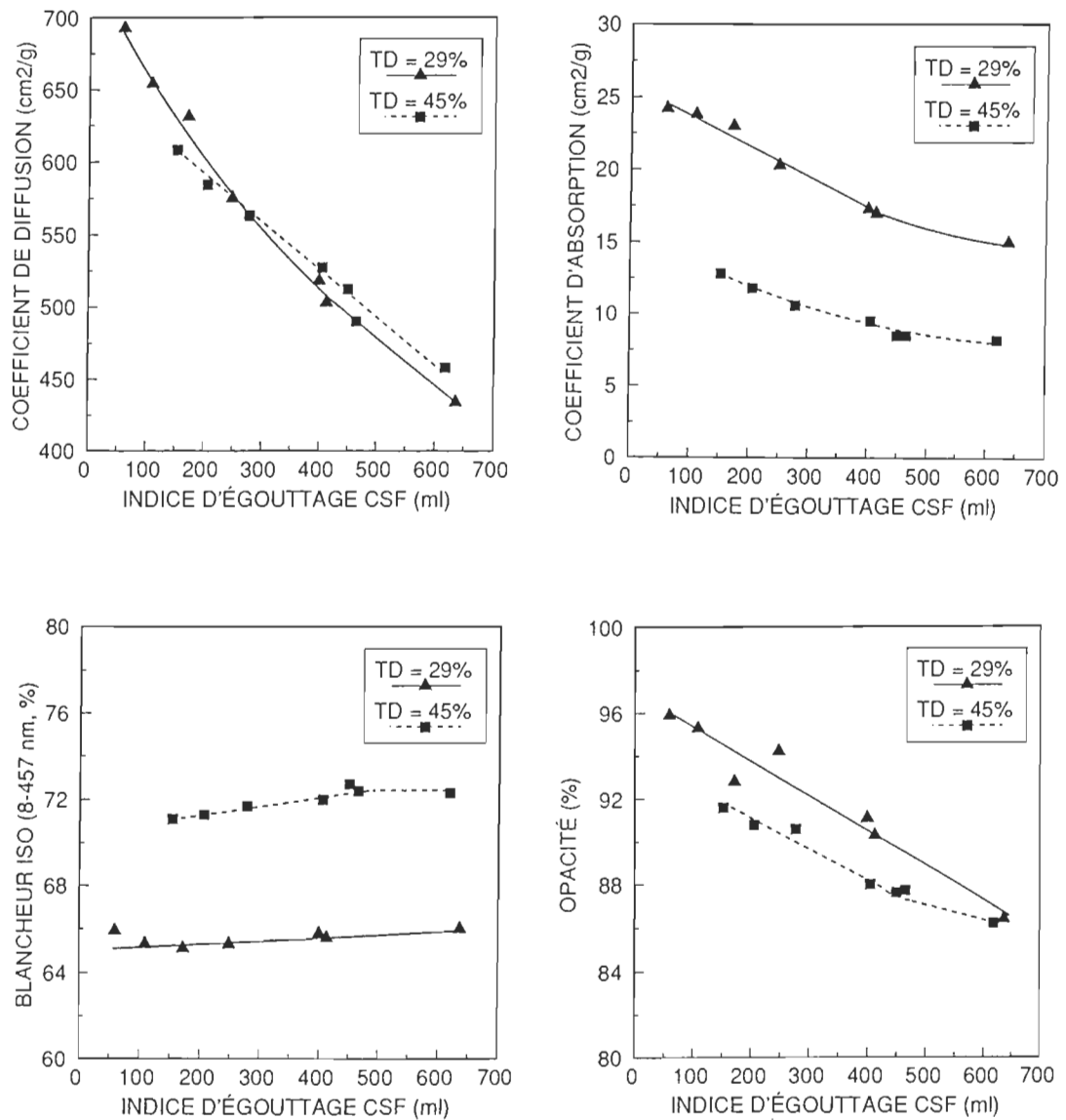


Figure 4-55. Propriétés optiques des papiers en fonction de l'indice d'égouttage (pâtes APMP^{MD})

Une efficacité plus grande à l'imprégnation peut réduire les coûts de production. Une analyse des coûts en énergie spécifique peut être effectuée avec les résultats de mise en pâte APMP^{MD}, comme à la section 4.3.2.2, en supposant un prix de 0.025\$/kWh pour l'électricité. Si on choisit un indice de déchirure de 2.5 mN*m²/g comme objectif, alors on obtient les données suivantes:

Tableau 4-10. Calcul du coût en énergie pour des mises en pâte APMP^{MD} à un indice de déchirure de 2.5 mN*m²/g

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	29	45
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)	2.5	2.5
INDICE D'ÉGOUTTAGE CSF (ml)	180	335
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/t)	1850	1400
COUT EN ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (\$CAN/t)	46.20	35.00
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	1.8	1.8
BLANCHEUR ISO (8-457 nm, %)	65.0	71.7
OPACITÉ (%)	93.9	89.2

Il y a donc une différence en coût d'énergie spécifique de 11.20 \$CAN/t. Pour une usine de 500 t/j opérant 350 jours par an, cela donne une économie annuelle de 1 960 000 \$CAN. Dans ce cas-ci, la blancheur est aussi plus élevée pour le taux de délaminage le plus grand, alors il n'y aurait pas de frais supplémentaires de blanchiment.

Si l'on vise un indice d'égouttage de 150 ml, avec les mêmes charges de produits chimiques et les mêmes conditions décrites précédemment, alors on obtient les résultats du tableau 4-11.

Dans ce cas, il y a une économie de 5.50 \$CAN/t et des propriétés physiques et une blancheur plus élevées pour les taux de délaminage le plus grand. L'économie annuelle en coût d'énergie s'élève à 962 500 \$CAN, pour une usine de 500 t/j opérant pendant 350 jours par année.

Le tableau 4-12 présente les charges à l'effluent et le rendement pour les deux taux de délaminage. Comme dans le cas de la mise en pâte PCMR et pour les mêmes raisons (section 4.3.2), la DCO et les solides dissous augmentent avec le taux de délaminage. Pour sa part, le rendement diminue de 1.5%. Il peut en résulter des dépenses supplémentaires au niveau de l'opération des systèmes de

traitement des effluents et de l'utilisation de la matière première, tel que mentionné à la section 4.3.2.2.

Tableau 4-11. Calcul du coût en énergie pour des mises en pâte APMP^{MD} à un indice d'égouttage de 150 ml

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	29	45
INDICE DE DÉCHIRURE (mN*m²/g)	2.6	3.0
INDICE D'ÉGOUTTAGE CSF (ml)	150	150
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kWh/t)	1880	1660
COÛT EN ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (\$CAN/t)	47.00	41.50
LONGUEUR DE RUPTURE (km)	2.0	2.5
BLANCHEUR ISO (8-457 nm, %)	65.2	71.0
OPACITÉ (%)	94.7	91.8

Tableau 4-12. DCO, solides dissous et rendement (pâtes APMP^{MD} échelle pilote)

TAUX DE DÉLAMINAGE (%)	DCO (kg/t)	SOLIDES DISSOUS (kg/t)	RENDEMENT (%)
29	91	98	93.4
45	114	121	91.9

5.0 CONCLUSION

Un paramètre a été défini pour caractériser l'effet de la compression d'un alimentateur à bouchon sur les copeaux de bois : le taux de délaminage. Ce paramètre augmente avec le nombre de passages dans l'alimentateur à bouchon, pour toutes les essences étudiées. De plus, il semble que les vieux copeaux de tremble se délaminent plus que les copeaux frais.

Des mises en pâte à l'holocellulose ont permis d'établir que le délaminage par compression diminue la longueur des fibres. Il se produit aussi des glissements dans les parois cellulaires des fibres («slip planes») qui influencent l'intensité du traitement chimique à l'holocellulose.

Les effets du délaminage par compression sur les propriétés des pâtes sans imprégnation chimique sont:

PMR : - Faible baisse de l'énergie spécifique de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage.

- En général, les propriétés mécaniques sont moins bonnes en augmentant le taux de délaminage.
- Les propriétés optiques ne sont pas influencées par le délaminage.

- PTM :
- L'énergie spécifique de raffinage est similaire.
 - Les propriétés des pâtes et papiers sont similaires.

L'augmentation de la compression des copeaux avant le traitement thermique de la mise en pâte PTM n'apporte donc rien de positif, pour les cas étudiés. Une plus grande compression peut être intéressante pour la mise en pâte PMR, si on veut diminuer la consommation d'énergie. Il faut alors s'attendre à une baisse des propriétés mécaniques du papier.

Lorsqu'il y a imprégnation chimique, la quantité de liqueur absorbée en un temps donné (une minute) augmente avec le taux de délaminage. Le ratio d'absorption est aussi influencé par la composition de la liqueur chimique.

L'augmentation du taux de délaminage rend également l'imprégnation plus uniforme, étant donné que la surface disponible est plus grande et que plusieurs copeaux sont «étirés».

En effet, dans le cas de la mise en pâte PCMR faite en laboratoire, le contenu ionique et les charges à l'effluent augmentent avec le taux de délaminage. On constate également la même tendance en fonction du temps de rétention dans la trémie de réaction. À l'échelle pilote, l'énergie spécifique et les propriétés mécaniques des papiers sont meilleures avec un délaminage élevé. Cependant, on observe une tendance à la baisse pour les propriétés optiques. Ceci dépend des charges relatives de sulfite et de soude caustique.

Pour la mise en pâte APMP^{MD} en laboratoire, la blancheur et le contenu ionique augmentent avec le taux de délaminage. À l'échelle pilote, l'énergie spécifique diminue et les propriétés mécaniques du produit final sont meilleures. Pour ce qui est des propriétés optiques, la blancheur augmente mais l'opacité diminue.

Tous ces résultats montrent que l'augmentation du délaminage par compression améliore la qualité et l'uniformité de l'imprégnation chimique.

L'étude économique, faite au cours de l'analyse des résultats, permet d'identifier des façons d'économiser sur les investissements et les coûts d'opération des usines de mise en pâte à haut rendement comportant une imprégnation chimique. En général, un délaminage plus important des copeaux (dans le domaine

étudié) permet de réduire les coûts de mise en pâte lorsqu'il y a une imprégnation chimique. Cependant, les coûts pour le traitement des effluents peuvent augmenter, ainsi que le coût de la matière première.

D'autres travaux d'imprégnation de copeaux plus ou moins délaminés pourraient être faits avec plusieurs combinaisons de charges de produits chimiques. Ceci permettrait de déterminer plus précisément (et pour différentes conditions) à quel point les produits chimiques peuvent être économisés en augmentant le délaminage et en visant des propriétés données.

ANNEXE A**EXEMPLE DE CALCUL DES POURCENTAGES D'AIR, DE LIQUIDE ET DE SOLIDES DANS LES COPEAUX**

Gravité spécifique "green" = 0.39

Siccité = 50% »»» Humidité (base humide) = 50%

Densité des solides = 1500 kg/m³

Densité du liquide = 1000 kg/m³

Note: la densité "green" est définie comme étant le rapport du poids de bois séché au four sur le volume du bois saturé d'eau (volume maximal).

Pour 1 m³, on a: $\frac{390 \text{ kg de solides}}{1500 \text{ kg/m}^3} = 0.260 \text{ m}^3 \text{ de solides}$

masse de liquide = $\frac{\text{masse de solides} * \text{humidité}}{(1-\text{humidité})}$

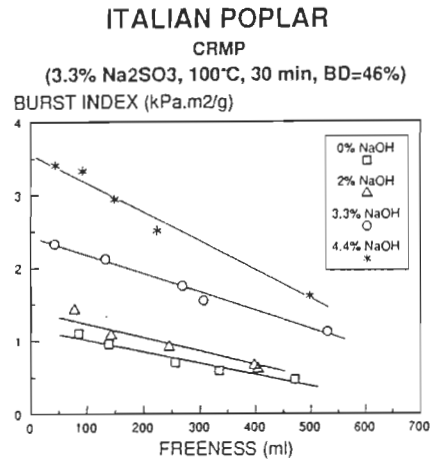
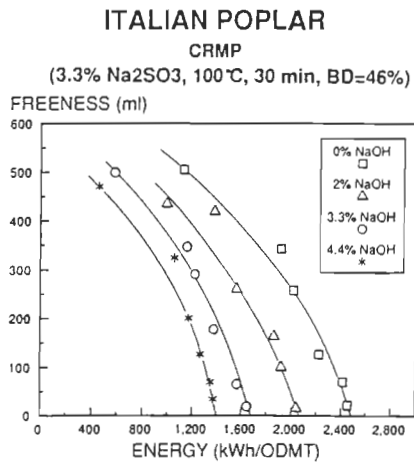
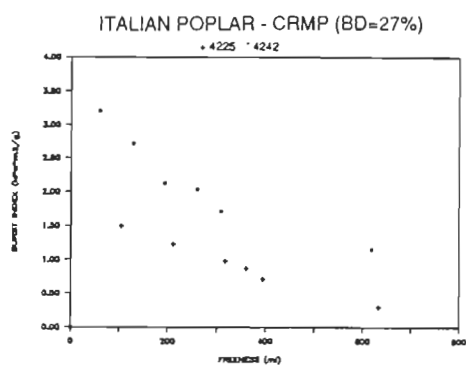
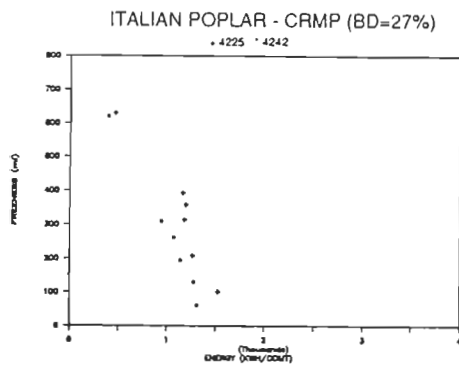
= $\frac{390 * 0.50}{(1-0.50)} = 390 \text{ kg de liquide}$

$\frac{390 \text{ kg de liquide}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.390 \text{ m}^3 \text{ de liquide}$

$1.000 \text{ m}^3 - 0.260 \text{ m}^3 - 0.390 \text{ m}^3 = 0.350 \text{ m}^3 \text{ d'air}$

ANNEXE B

DONNÉES POUR CALCULS DE COÛTS DU TABLEAU 4-7



BIBLIOGRAPHIE

1. Capacité canadienne de production de pâtes et papiers, Association Canadienne des Pâtes et Papiers (ACPP), 1992
2. BEATH, L.R. et MIHELICH, W.G., Refiner Mechanical Pulping of Chemically Pretreated Wood, Tappi, vol. 60, num. 12, 1977, p. 77-81
3. MUTTON, D.B., TOMBLER, G., GARDNER, P.E. et FORD, M.J., The Sulfonated Chemimechanical Pulping Process, International Mechanical Pulping Conference, Oslo, session V, num. 9, 1981, p.1-18
4. BEATSON, R.P., HEITNER, C. et ATACK, D., Sulphonation of Eastern Black Spruce Chips, Part II, Pulp and Paper Report, Paprican, num. 355, 1982, p.1-11
5. HEITNER, C., KARNIS, A. et ATACK, D., Ultra-high Yield Pulping - Part IV. High Strength Pulp From Mechanical Pulp Rejects, Pulp and Paper Report, Paprican, num. 403, 1982, p. 1-16

6. CORSON, S.R., ALLISON, R.W. et RICHARDSON J.D., Chemimechanical Pulp of Mature Radiata Pine, Tappi International Sulfite Pulping Conference, 1982, p. 211-217
7. GUMMERUS, M., Sulphonation of TMP Fibres, Papperi ja Puu- Papper och Trä, num. 5, 1982, p. 329-338
8. BEATSON, R.P., HEITNER, C. et ATACK, D., Factors Affecting the Sulphonation of Spruce, Journal of Pulp and Paper Science, vol. 10, num. 1, 1984, p. J12-J17
9. ENGSTAND, P., HAMMAR, L.-Å. et HTUN, M., The Kinetics of Sulphonation on Norwegian Spruce, International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, 1985, p. 275-279
10. CORSON, S.R. et RICHARDSON, J.D., Chemimechanical Pulping of Radiata Pine, International Pulping Conference, Stockholm, 1985, p.186-202
11. STONE, J.E. et NICKERSON, L.F., The Pulping of Mechanically Treated Wood I. Crushed Softwoods, Reprinted from Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 59, num. 6, 1958, p.1-9

12. DE CHOUDENS, C., ANGELIER, R. et COMBETTE, Ph., Pâtes mécaniques de résineux, pâtes chimicomécaniques de feuillus - nouveau procédé de fabrication, Revue A.T.I.P., vol. 38, num. 8, 1984, p.405-416
13. KURDIN, J.A. et BOHN, W.L., Mechanical Pulping by Extrusion, Tappi Pulping Conference, San Francisco, 1984, p. 265-274
14. KURDIN, J.A. et TANTALO, L., Mechanical Pulping by Extrusion, Tappi Mechanical Pulping Conference, 1987, p. 105-110
15. COGNARD, P., The Bi-vis, a French Invention to Be Promoted, Papier, Carton et Cellulose, janvier-février, 1985, p. 25-27
16. TAY, C.H., FAIRCHILD, R.S. et MANCHESTER, D.F., Jack Pine as Pulpwood for Newsprint Manufacture Part II, Removal of Extractives During Ultra-High-Yield Pulping, International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, Tsukuba Science City, Japan, 1983, p. 28-35
17. THORNTON, D.S. et NUNN, B.E., The Effect of a Plug Screw Feeder on Ether-Solubles Removal and Power Reduction During TMP Manufacture,

Invited papers presented at the Spring 1978 Meeting of Empire State Paper Research Associates Inc., Mobile (Alabama), 1978, p. 119-154

18. PAGE, D.H. et SETH, R., The Extentional Behavior of Commercial Mechanical Pulps, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 80, num. 8, 1979, p. T235-T237
19. DINES, R.E. et TYMINSKI, A., The Vapor Phase SCMP Process, prétirés, 69^e congrès annuel, section technique de l'ACPPP, 1983, p. A281-A285
20. HEITNER, C., BEATSON, R.P. et ATACK, D., Ultra-High Yield Pulping Part V. High Compression Impregnation of Softwood Chips With Sodium Sulfite - A Method of Producing CMP With High Wet and Dry Strength, International Mechanical Pulping Conference, Stockholm, 1985, p. 101-108
21. SMOOK, G.A., Handbook for Pulp and Paper Technologists, Montréal et Atlanta, Joint Textbook Committee of The Pulp and Paper Industry (ACPP et TAPPI), 1982, 395 p.
22. GUITARD, D., Mécanique du matériau bois et composites, Cepadues-Éditions, 1987, 238 p.

23. GARCEAU, J.J. et *al*, Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques, Montréal, Section technique de l'Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers, 1989, 299 p.
24. KOCUREK, M.J. et STEVENS, C.F.B. (éditeurs), Pulp and Paper Manufacture Volume 1 - Properties of Fibrous Raw Materials and their Preparation for Pulping, Montréal et Atlanta, Joint Textbook Committee of the Pulp and Paper Industry (ACPP et TAPPI), 1983, 182 p.
25. FRANZEN, R.G., General and Selective Upgrading of Mechanical Pulps, prêtirés, International Mechanical Pulping Conference, 1985, p. 19-23
26. ISENBERG, I.H., Pulpwoods of the United States and Canada, Appleton (Wisconsin), 3^e éd., The Institute of Paper Chemistry, 1980 et 1981, 2 tomes
27. DORLOT, J.-M., BAILON, J.-P. et MASOUNAVE, J., Des matériaux, Montréal, 2^e éd., École Polytechnique de Montréal, 1986, 467 p.
28. U.S. Forest Products Laboratory, Wood Engineering Handbook, Englewood Cliffs (New Jersey), Prentice-Hall, 1974

29. LEASK, R.A. (éd. techn.) et KOCUREK, M.J. (éd. de la série), Pulp and Paper Manufacture Volume 2 - Mechanical Pulping, Montréal et Atlanta, Joint Textbook Committee of the Paper Industry (ACPP et TAPPI), 1987, 287 p.
30. CASEY, J.P. (éd.), Pulp and Paper, Chemistry and Chemical Technology, Volume I, New York, 3^e éd., John Wiley & Sons, 1981, 820 p.
31. CASEY, J.P. (éd.), Pulp and Paper, Chemistry and Chemical Technology, Volume II, New York, 3^e éd., John Wiley & Sons, 1981, 626 p.
32. KORAN, Z., Energy Consumption in Mechanical Fibre Separation as a Function of Temperature, Transactions of the Technical Section, CPPA, vol. 7, num. 2, 1981, p. TR40-TR44
33. KANO, T., IWAMIDA, T. et SUMI, Y., Energy Consumption in Mechanical Pulping, Pulp and Paper Canada, vol. 83, num. 6, 1982, p. 80-84
34. STONE, J.E. et GREEN, H.V., Penetration and Diffusion Into Hardwoods, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 58, num. 10, 1958, p. 223-231

35. McCABE, W.L., SMITH, J.C. et HARRIOTT, P., Unit Operations of Chemical Engineering, New York, 4^e éd., McGraw-Hill, 1985, 960 p.
36. MACGREGOR, R.P., PEEMOELLER, H., SCHNEIDER, M.H. et SHARP, A.R., Anisotropic Diffusion of Water in Wood, Journal of Applied Polymer Science, vol. 37, num. 2, 1983, p. 901-909
37. ROBERTSEN, L. et LÖNNBERG, B., Diffusion in Wood, Part 1. Theory and Apparatus, Paperi ja Puu- Paper and Timber, vol. 73, num. 6, 1991, p. 532-535
38. ROBERTSEN, L. et LÖNNBERG, B., Diffusion in Wood, Part 2. The Effects of Concentration and Temperature, Paperi ja Puu- Paper and Timber, vol. 73, num. 7, 1991, p. 635-639
39. LIN, S.-H. et HSIEH, J., Effect of Raw Material on Energy Requirement of CTMP, TAPPI 1990 Engineering Conference, 1990, p. 499-503
40. M&D Continuous Digesters (dépliant publicitaire), C-E Bauer, Bulletin P-30D

41. HDF Series II Heavy Duty Bark Shredder (dépliant publicitaire), S.W. Hooper & Co. Ltd.
42. Pressafiner, Impressafiner (dépliant publicitaire), C-E Bauer, Bulletin P-22-G
43. CASEY, J.P. (éd.), Pulp and Paper, Chemical and Chemistry Technology, Volume III, New York, 3^e éd., John Wiley & Sons, 1981, 514 p.
44. FRAZIER, W.C. et WILLIAMS, G.J., Reduction of Specific Energy in Mechanical Pulping by Axial Precompression of Wood, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 83, num. 6, 1983, p. 87-92
45. PURI, V.P. et HIGGINS, H.G., Possibilities for Reduction of Energy Requirements During Chip Refining, APPITA, vol. 37, num. 6, 1984, p. 496-501
46. HARTLER, N., How Energy Can Be Reduced In Refiner Mechanical Pulping, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 81, num. 6, 1980, p. T119-T123

47. MICHAUD, G., Optimisation des conditions de mise en pâte PCTM pour leur utilisation dans les cartons, mémoire de maîtrise, Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, à paraître

48. GREEN, H.V., Compression-Caused Transverse Discontinuities in Tracheids, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 63, num. 3, 1962, p. T155-T168

49. DINWOODIE, J.M., Structural Changes in the Cell Wall Associated with Longitudinal Compression, Tappi Special Technical Association Publication, num. 8, 1969, p. 233-236

50. SCURFIELD, G., SILVA, S.R. et WOLD, M.B., Failure of Wood Under Load Applied Parallel to Grain : A Study Using Scanning Electron Microscopy, Micron 3, vol. 3, num. 2, 1972, p. 160-184

51. KEITH, C.T. et COTE Jr, W.A., Microscopic Characterization of Slip Lines and Compression Failures In Wood Cell Walls, Forest Products Journal, vol. 18, num. 3, 1968, p. 67-74

52. BONIN, P., JANKNECHT, S., BARBE, M.C. et VALADE, J.L., Utilisation de sciures, planures et fines de scieries dans la fabrication du papier journal, Les Papetières du Québec, vol. 1, num. 1, 1990, p. 25-34
53. JANKNECHT, S., Mise en pâte mécanique et chimicomécanique des pins, mémoire de maîtrise, Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 1990, 196 p.
54. SINKEY, J.D., Softwood Chemimechanical Pulping - A Technology Review, TECH'82 Mechanical Pulping Course, CPPA, 1982, p. 123-131
55. BARBE, M.C., DESSUREAULT, S. et JANKNECHT, S., The Future of Aspen BCTMP; Market Trends and Technologies, Technical Conference Pacific Paper Exposition, 1990, p. 15-0 à 15-24
56. STEVENSON, S., Meadow Lake's Zero-effluent Is Good News For Millar Western, Pulp and Paper Canada, vol. 93, num. 10, 1992, p. 13-19
57. CORT, C.J. et BOHN, W.L., Alkaline Peroxide Mechanical Pulping of Hardwoods, Tappi Journal, vol. 74, num. 6, 1991, p. 79-84

58. BONIN, P., L'utilisation des résidus de scieries dans la fabrication du papier, mémoire de maîtrise, Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 1990, 87 p.
59. TASMAN, J.E., The Fiber Length of Bauer-McNett Screen Fractions, Tappi Journal, vol. 55, num. 1, 1972, p. 136-138
60. KATZ, S., BEATSON, R.P. et SCALLAN, A.M., The Determination of Strong and Weak Acidic Groups in Sulfite Pulps, Svensk Papperstidning, vol. 87, num. 6, 1984, p. R48-R53
61. NUNN, B.E. et THORNTON, D.S., A New Steaming System Shows Many Benefits In TMP Pilot Plant Trials, Tappi Pulping Conferences (New Orleans), 1978, p. 239-242
62. HEITNER, C. et ATACK, D., Ultra-high-yield Pulping of Aspen, Effects of Ion Content, Pulp and Paper Canada, vol. 84, num. 11, 1983, p. T252-T257
63. Chemical Marketing Reporter, December 21, 1992

64. JACKSON, M., The Manufacture, Physical Properties and End-uses of High-Yield Pulps, TECH'87 Mechanical Pulping Course, CPPA, 1987, p. 167-181