

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MISE EN PÂTE À HAUT RENDEMENT D'UN MÉLANGE INCORPORANT

DES COPEAUX DE MÉLÈZE HYBRIDE ET DE BOULEAU

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DES PÂTES ET PAPIERS

PAR

QUANQING ZHA

AVRIL 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## Remerciements

Je voudrais d'abord exprimer mes sincères remerciements du fond de mon cœur à mon directeur, le professeur Robert Lanouette, pour sa direction et ses conseils judicieux, aussi bien dans le domaine des pâtes et papiers que dans celui de la langue de française.

Ce travail a été rendu possible grâce au support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

Je tiens aussi à remercier monsieur Alain Marchand et monsieur Pierre Gendron pour leurs collaborations et leur aide. Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux étudiantes qui ont participé à ce projet : Carole Aurélie Okala et Sabrina Ouellet.

Je tiens également à remercier tout le personnel du Centre Intégré en Pâtes et Papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour leur aimable collaboration.

Finalement, j'adresse particulièrement ma reconnaissance à ma femme Fang Chen pour sa compréhension et son soutien moral durant mes études.

## Résumé

Par le passé, le Québec avait des surplus de matières ligneuses. Aujourd'hui, la province souffre d'une diminution des ressources forestières. La récolte admissible de résineux est presque entièrement atteinte. La disponibilité forestière de certaines régions a été révisée à la baisse. Simultanément, depuis des années, les usines de pâtes et papiers du Québec utilisent beaucoup plus de résineux traditionnels dans le but d'obtenir de bonnes propriétés pour le papier journal. Le volume de production de papier journal est encore en croissance. La diminution des forêts naturelles de la province, spécialement au niveau de la quantité de bois résineux, et de la croissance du volume de production du papier journal, contribue à la diminution de copeaux disponibles pour la production de pâtes et papiers. L'industrie papetière québécoise, comme dans le reste de l'Amérique du Nord, fait face à une compétition sévère en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle. Elle doit donc se tourner vers un approvisionnement en matières premières provenant de bois de plantation ou vers des essences délaissées jusqu'à maintenant.

Le mélèze démontre un taux de croissance élevé, une densité et une résistance aux maladies supérieures à celle des autres espèces habituellement utilisées et d'utilisation facile pour les plantations en sylviculture. Aujourd'hui, il est utilisé avec succès dans le procédé de la mise en pâte Kraft. Malheureusement, cette essence de bois n'est pas bien adaptée au procédé de mise en pâte thermomécanique à cause de ses propriétés physiques et optiques du papier qui sont bien inférieures à celles requises par l'industrie papetière. Cependant, le bouleau est la deuxième essence la plus répandue de bois feuillu au Canada. Malgré cela, la quantité de cette essence de bois utilisée dans les usines est toujours dans une proportion faible même s'il y a une grande disponibilité de cette essence dans les forêts naturelles.

Pour ces raisons, nous avons employé le mélèze hybride avec différentes proportions de bouleau blanc dans un procédé de mise en pâte thermomécanique. Considérant que l'épinette noire est l'essence la plus utilisée pour la mise en pâte et la production de papier journal, notre projet est basé sur l'utilisation de ces trois essences de bois. Les

copeaux de chaque essence sont mélangés suivant certaines proportions basées sur un plan d'expérience.

L'analyse des résultats montre qu'il est possible d'incorporer dans un mélange ces trois essences de bois simultanément en co-raffinage. Sous une quantité utilisée relativement large, le co-raffinage n'apporte pas de variation significative sur la CSE. Pendant le co-raffinage, à cause des caractéristiques chimiques et morphologiques différentes, l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc apporte une influence différente sur les propriétés physiques et sur le niveau de blancheur. Le mélèze hybride affecte moins les propriétés physiques mais nuit plus à la blancheur comparativement au bouleau blanc. Le choix des proportions des deux essences doit faire l'objet d'un compromis. En contrôlant la somme de mélèze hybride et de bouleau blanc dans le mélange final sous un pourcentage de 20 à 30%, les pâtes obtenues diminuent d'un maximum de 23% d'indice de rupture, de 30% d'indice d'éclatement et de 23% d'indice de déchirure par rapport à ceux de la pâte contenant 100% d'épinette noire. Cependant, le niveau de blancheur des pâtes finales pourrait être maintenu au-dessus de 50 % ISO.

Pendant le co-raffinage, à cause de la présence des essences différentes, spécialement à cause de leur différente morphologie, il y a certains effets synergiques qui sont introduits sur la consommation d'énergie spécifique, le taux de rejets, la longueur des fibres, la masse linéique, l'allongement l'absorption d'énergie à la rupture et coefficient de diffusion etc. Toutefois, il n'y a pas d'effet synergique sur l'indice de rupture, l'indice d'éclatement et l'indice de déchirure. L'action du raffinage des essences sur ces trois propriétés est indépendante de l'action du raffinage lui-même. Parmi les facteurs influençant l'effet synergique pendant le co-raffinage, l'essence de bois est le facteur le plus important. En même temps, sur des propriétés, le niveau d'effet synergique n'est pas pareil suivant la variation des proportions d'essence composant le mélange. Ainsi, la proportion d'essences est probablement également un facteur non négligeable influençant l'effet synergique. Dans notre travail, le mélèze est le facteur le plus actif pour produire un effet synergique.

En plus, la comparaison de la CES entre les pâtes co-raffinées et les pâtes mélangées après le raffinage permet de vérifier qu'il y a eu un effet synergique sur la CES. En raison des propriétés des pâtes obtenues des pâtes mélangées après le raffinage ne sont simplement pas égales à la somme des propriétés selon la proportion des pâtes individuelles après le raffinage. Pendant le travail, nous n'avons pas fait les propriétés des pâtes mélangées après le raffinage, et ne pouvons donc malheureusement pas faire la comparaison entre les propriétés des pâtes co-raffinées et les propriétés des pâtes mélangées après le raffinage. Cette comparaison serait probablement d'un certain intérêt pour un prochain travail.

Avril 2005

### **Mots Clés**

Mélèze hybride (*Larix eurolepis* Henry.), Bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.), Épinette noire (*Picea mariana* BSP.), mélange, pâte thermomécanique, co-raffinage, action du raffinage, effet synergique

## Table des Matières

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Mots Clés.....	v
Table des Matières.....	vi
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	xi
Liste des Équations.....	xii
Liste des Abréviations.....	xiii
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1    Problématique.....	1
1.2    Objectif.....	3
Chapitre 2 - Mise en pâte à haut rendement.....	4
2.1    Introduction.....	4
2.2    Pâte thermomécanique (PTM).....	5
2.3    Facteurs influençant la qualité de la Pâte PTM.....	7
2.3.1    Essence de bois.....	7
2.3.2    Énergie spécifique.....	8
Chapitre 3 - Caractéristiques des essences de bois.....	9
3.1    Mélèze.....	9
3.1.1    Caractéristiques.....	9
3.1.1.1    La croissance.....	9
3.1.1.2    Densité.....	10
3.1.1.3    Morphologie des fibres.....	11

3.1.1.4	Caractéristiques chimiques.....	12
3.1.2	Caractéristiques des pâtes .....	13
3.1.2.1	Pâte kraft .....	13
3.1.2.2	Pâtes mécaniques .....	15
3.2	Bouleau .....	16
3.2.1	Caractéristiques.....	17
3.2.1.1	Caractéristiques physiques .....	17
3.2.1.2	Caractéristiques chimiques.....	18
3.2.2	Caractéristiques des pâtes .....	18
3.2.2.1	Pâte Kraft .....	18
3.2.2.2	Pâtes mécaniques .....	19
Chapitre 4 - Méthodologie .....		21
4.1	Description des matières premières .....	21
4.2	Méthode de raffinage .....	22
4.3	Évaluation .....	24
Chapitre 5 - Résultats et Discussions .....		25
5.1	Consommation d'énergie spécifique.....	26
5.2	Matières extractibles au DCM .....	29
5.3	Propriétés des fibres .....	31
5.3.1	Taux de rejets.....	31
5.3.2	L'analyse des fibres FQA .....	33
5.3.2.1	La longueur moyenne des fibres.....	33
5.3.2.2	Fines .....	35
5.3.2.3	Masse linéique.....	36
5.3.3	Volume spécifique hydrodynamique (VSH).....	40
5.4	Propriétés du papier .....	42
5.4.1	Densité .....	42
5.4.2	Propriétés physiques .....	43
5.4.2.1	Indice de rupture.....	43
5.4.2.2	Allongement.....	47
5.4.2.3	Absorption d'énergie à la rupture.....	48

5.4.2.4	Indice d'éclatement .....	50
5.4.2.5	Indice de déchirure .....	53
5.4.3	Propriétés optiques.....	55
5.4.3.1	Blancheur .....	55
5.4.3.2	Opacité .....	57
5.4.3.3	Coefficient de diffusion de la lumière.....	58
5.4.3.4	Coefficient d'absorption de la lumière.....	59
5.5	Potentiel d'utilisation.....	60
Chapitre 6 - Conclusions.....		63
Bibliographie.....		66
Annexe 1. Plan d'essais.....		72
Annexe 2. Propriétés des pâtes et papiers. ....		73

## Liste des Figures

Figure 2-1. Séparation selon le procédé de mise en pâte mécanique [17] .....	5
Figure 2-2. Digramme du procédé PTM .....	6
Figure 3-1. Propriétés des pâtes PTM, CSF=130 mL [13].....	15
Figure 4-1. Plan de mélange des copeaux .....	22
Figure 4-2. Le procédé de raffinage .....	23
Figure 4-3. Paramètres évalués des pâtes .....	24
Figure 5-1. Réponse de la CES .....	26
Figure 5-2. Variation de la CES .....	27
Figure 5-3. Variation de la CES (M).....	29
Figure 5-4. Réponse de matières extractibles au DCM.....	30
Figure 5-5. Réponse du taux de rejets .....	31
Figure 5-6. Variation du taux de rejets.....	32
Figure 5-7. Réponse de la longueur moyenne des fibres.....	33
Figure 5-8. Variation de la longueur moyenne des fibres .....	34
Figure 5-9. Réponse des fines .....	35
Figure 5-10. Réponse de la masse linéique de la fraction R48 .....	37
Figure 5-11. Réponse de la masse linéique de la fraction R100 .....	38
Figure 5-12. Variation de la masse linéique de la fraction R48 .....	39
Figure 5-13. Variation de la masse linéique de la fraction R100 .....	39
Figure 5-14. Réponse du volume spécifique hydrodynamique .....	40
Figure 5-15. Variation du volume spécifique hydrodynamique (1) .....	41
Figure 5-16. Variation du volume spécifique hydrodynamique (2) .....	42
Figure 5-17. Réponse de la densité .....	43
Figure 5-18. Réponse de l'indice de rupture .....	44
Figure 5-19. Corrélation entre l'indice de rupture et le VSH.....	45
Figure 5-20. Variation de l'indice de rupture.....	46
Figure 5-21. Variation et corrélation entre l'indice de rupture et la CES .....	46
Figure 5-22. Réponse de l'allongement .....	47
Figure 5-23. Variation de l'allongement .....	48
Figure 5-24. Réponse de l'absorption d'énergie à la rupture .....	49

Figure 5-25. Variation de l'AER.....	50
Figure 5-26. Réponse de l'indice d'éclatement.....	51
Figure 5-27. Corrélation entre l'indice d'éclatement et la longueur des fibres.....	52
Figure 5-28. Corrélation entre l'indice d'éclatement et le VSH .....	52
Figure 5-29. Variation de l'indice d'éclatement .....	53
Figure 5-30. Réponse de l'indice de déchirure.....	54
Figure 5-31. Variation de l'indice de déchirure .....	55
Figure 5-32. Réponse du niveau de blancheur .....	56
Figure 5-33. Réponse de l'opacité.....	57
Figure 5-34. Réponse du coefficient de diffusion .....	58
Figure 5-35. Variation du coefficient de diffusion.....	59
Figure 5-36. Réponse du coefficient d'absorption .....	60
Figure 5-37. Possibilité d'utilisation des essences.....	61

## Liste des Tableaux

Tableau 1-1. Part du Québec dans la production mondiale de papiers et de cartons .....	1
Tableau 1-2. Répartition de la production du Québec selon les produits papiers .....	2
Tableau 2-1. Caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences.....	7
Tableau 3-1. Croissance du mélèze européen et du mélèze japonais .....	10
Tableau 3-2. Hauteur moyenne du mélèze .....	10
Tableau 3-3. Densité des essences de bois .....	11
Tableau 3-4. Morphologie des fibres du mélèze, du pin gris et de l'épinette noire .....	12
Tableau 3-5. Caractéristiques chimiques du bois.....	12
Tableau 3-6. Composition des polysaccharides du mélèze sibérien .....	13
Tableau 3-7. Propriétés des pâtes kraft non tamisées.....	14
Tableau 3-8. Propriétés des pâtes de mélèze, CSF=400mL.....	16
Tableau 3-9. Volume des essences feuillues au Canada et au Québec .....	17
Tableau 3-10. Morphologie des fibres du bouleau blanc, de l'épinette noire et du sapin baumier .....	17
Tableau 3-11. Caractéristiques chimiques du bois de bouleau blanc, d'épinette noire et de sapin baumier.....	18
Tableau 3-12. Propriétés des pâtes Kraft à base d'essences feuillues canadiennes .....	19
Tableau 3-13. Propriétés des pâtes PTM du bouleau blanc et du mélange d'épinette et de sapin.....	20
Tableau 4-1. Matières extractibles au DCM et classification des copeaux.....	22
Tableau 5-1. Résultat de l'analyse des données .....	25

## Liste des Équations

$CES=8,68E+7,91M+10,09B+E*(2,86M -2,23B)$	Équation 5-1 ..... 28
$ME=0,89E+0,78M+2,07B-E*(0,50M +0,61B)$	Équation 5-2 ..... 32
$Taux\ de\ Rejets=0,76E+1,58M+0,17B+E*(0,79M+2,19B)$	Équation 5-3 ..... 33
$Longueur\ moyenne\ des\ fibres=1,95E+1,54M+0,82B+0,20E*B$	Équation 5-4 ..... 35
$Fines=5,58E+9,05M+11,97B-(5,56E+3,41M)*B$	Équation 5-5 ..... 37
$ML\_R48=0,20E+0,23M+0,18B+0,05B*E$	Équation 5-6 ..... 39
$ML\_R100=0,17E+0,20M+0,15B+0,05B*E$	Équation 5-7 ..... 40
$VSH=369,43E+237,42M+107,11B+190,02M*E$	Équation 5-8 ..... 42
$Densité=0,35E+0,32M+0,30B$	Équation 5-9 ..... 45
$IR=48,54E+30,14M+14,97B-4,55M*E-4,54B*E-6,10B*M$	Équation 5-10 ... 46
$Allongement=1,99E+1,79M+0,96B-0,78B*M$	Équation 5-11 ... 49
$AER=36,29E+22,24M+3,95B-16,69B*M$	Équation 5-12 ... 51
$IE=2,80E+1,47M+0,53B-0,69B*E$	Équation 5-13 ... 53
$ID=10,56E+7,84M+1,85B-4,55M*E+2,64B*E$	Équation 5-14 ... 56
$Blancheur=52,64E+40,52M+54,69B-5,33M*E-8,74B*E-5,92B*M$	Équation 5-15 ... 58
$Opacité=95,51E+97,87M+97,14B+2,18M*E$	Équation 5-16 ... 59
$Coef\_diff=52,56E+49,98M+61,21B-16,17B*E-7,50B*M$	Équation 5-17 ... 60
$Coef\_abs=4,11E+7,89M+4,67B+1,65B*M$	Équation 5-18 ... 62

## Liste des Abréviations

CES	Consommation d'énergie spécifique
PMM	Pâte mécanique de meule
PMMP	Pâte mécanique de meule sous pression
PMR	Pâte mécanique de raffineur
PTM	Pâte thermomécanique
PCM	Pâte chimicomécanique
PCTM	Pâte chimicothermomécanique
PMPA	Pâte mécanique au peroxyde alcalin
RTS	Raffinage avec temps de rétention court, à haute température et à vitesse de rotation élevée
PCMR	Pâte chimicomécanique de raffineur
DCM	Dichlorométhane
VSH	Volume spécifique hydrodynamique
AER	Absorption d'énergie à la rupture

# Chapitre 1 - Introduction

## 1.1 Problématique

Par le passé, le Québec avait des surplus de matières ligneuses. Aujourd'hui, le Québec souffre d'une diminution des ressources forestières. La récolte admissible de résineux est presque entièrement atteinte. La disponibilité forestière de certaines régions a été révisée à la baisse. Les statistiques des dernières années montrent que le Québec a importé 3,2 millions m<sup>3</sup> de bois rond résineux, soit près de 10% de sa consommation [1].

Simultanément, depuis des années, les usines de pâtes et papiers du Québec utilisent beaucoup plus de résineux traditionnels, tels que l'épinette noire et le sapin, que de feuillus, dans le but d'obtenir de bonnes propriétés pour le papier journal. En 2002, la production de papier journal au Québec représentait 44% de la production du Canada et 9,9% de la production mondiale [2], des données relatives sont illustrées au Tableau 1-1. Au Québec, la production de papier journal représente 37% de la production de l'industrie papetière (voir Tableau 1-2). Le volume de production de papier journal est encore en croissance.

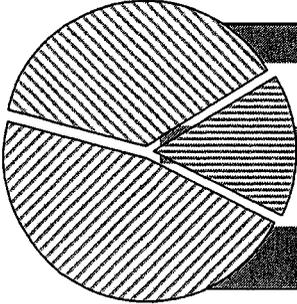
**Tableau 1-1. Part du Québec dans la production mondiale de papiers et de cartons**  
[2]

	Papier journal ( <sup>'000</sup> tm)			Autres papiers et cartons ( <sup>'000</sup> tm)			Total ( <sup>'000</sup> tm)		
	2000	2001	2002	2000	2001	2002	2000	2001	2002
Québec	3,848	3,558	3,726	4,765	4,698	4,841	8,613	8,256	8,567
Canada	9,221	8,373	8,465	11,700	11,275	11,654	20,921	19,648	20,119
Monde	39,431	38,665	37,767	284,615	281,591	277,161	324,046	320,256	314,928
Québec/ Canada (%)	41,7	42,5	44,0	40,7	41,7	41,5	41,2	42,0	42,6
Québec/ Monde (%)	9,8	9,2	9,9	1,7	1,7	1,7	2,7	2,6	2,7

**Sources :** Conseil des industries forestières du Québec (CIFQ).

Conseil des produits des pâtes et papiers (CPPP).

Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAOSTAT).

**Tableau 1-2. Répartition de la production du Québec selon les produits papiers [2]**


	Production (%)			Produits	Production ('000 tm)		
	2000	2001	2002p		2000	2001	2002p
	37	37	37	Papier journal	3 839	3 298	2 264
	16	14	15	Pâtes destinées à la vente	1 666	1 357	1 465
	46	49	48	Cartons et papiers autres que le papier journal	4 765	4 698	4 341
	100	100	100	<b>Total</b>	10 278	9 613	10 032

Source : Conseil des industries forestières du Québec (CIFQ).

Toutefois, la diminution des forêts naturelles de la province, spécialement au niveau de la quantité de bois résineux, et de la croissance du volume de production du papier journal, contribue à la diminution de copeaux disponibles pour la production de pâtes et papiers. L'industrie papetière québécoise, comme dans le reste de l'Amérique du Nord, fait face à une compétition sévère en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle. Elle doit donc se tourner vers un approvisionnement en matières premières provenant de bois de plantation ou vers des essences délaissées jusqu'à maintenant.

Le mélèze démontre un taux de croissance élevé, une densité et une résistance aux maladies supérieures à celle des autres espèces habituellement utilisées et d'utilisation facile pour les plantations en sylviculture [3, 4]. Aujourd'hui, le mélèze est utilisé avec succès dans le procédé de la mise en pâte Kraft [5, 6, 7, 8, 9]; on remarque seulement une légère perte de propriétés. Malheureusement, des études précédentes ont montré que cette essence de bois n'est pas bien adaptée au procédé de mise en pâte thermomécanique à cause de ses propriétés physiques et optiques du papier qui sont bien inférieures à celles requises par l'industrie papetière [10, 11, 12, 13]. Malgré cela, tel que mentionné récemment par Valade [13], le mélèze de plantation présente un certain intérêt pour l'industrie des pâtes et papiers québécoise.

Le bouleau est la deuxième essence la plus répandue de bois feuillu au Canada [14]. Aujourd'hui, des usines de papier journal québécoises portent une certaine attention à

l'utilisation de cette essence. Toutefois, la quantité de cette essence de bois utilisée dans les usines est toujours dans une proportion faible même s'il y a une grande disponibilité de cette essence dans les forêts naturelles.

## 1.2 Objectif

Notre but est d'employer le mélèze hybride (*Larix eurolepis* Henry.) avec différentes proportions de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) dans un procédé de mise en pâte thermomécanique. Considérant que l'épinette noire (*Picea mariana* BSP.) est l'essence la plus utilisée pour la mise en pâte et la production de papier journal, notre projet sera basé sur l'utilisation de ces trois essences de bois. Nous analyserons donc la possibilité d'incorporer dans un mélange ces trois essences de bois simultanément en co-raffinage. De plus, à cause des frictions fibres à fibres pendant le raffinage, le co-raffinage d'un feuillu dense comme le bouleau avec un résineux semble avoir un effet abrasif sur les fibres de résineux que nous voulons mettre ici à profit pour développer les propriétés des fibres de mélèze hybride qui sont normalement plus difficiles à raffiner convenablement que les fibres d'épinette noire ou de sapin. Dû à la haute température entraînant le ramollissement de la lignine et donc des fibres, il semble difficile de voir l'effet abrasif causé par le bouleau sur le mélèze pendant le premier stade de raffinage pressurisé. Cependant cet effet devrait être plus perceptible au cours du deuxième stade de raffinage atmosphérique. Enfin, nous déterminerons également l'impact de ces essences sur les propriétés du papier, pour ainsi, tenter de révéler l'effet du raffinage au cours du co-raffinage.

## Chapitre 2 - Mise en pâte à haut rendement

### 2.1 Introduction

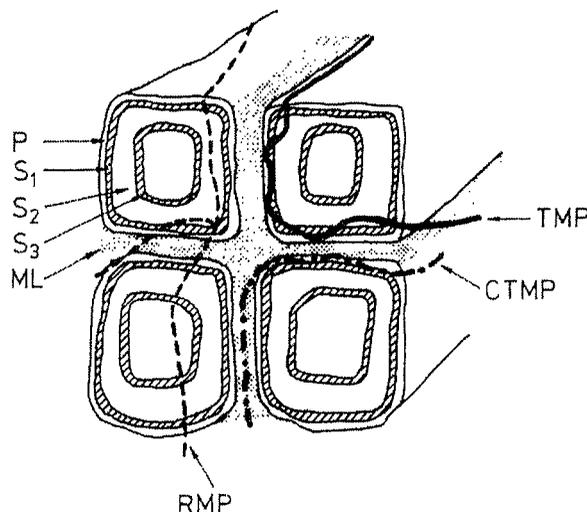
La technologie de mise en pâte à haut rendement (mécanique) s'est considérablement développée depuis le dernier siècle, particulièrement des années 70 jusqu'au début des années 90 [15, 16, 17]. Durant la mise en pâte mécanique, des bûches sans écorces ou des copeaux de bois sont séparés en fibres individuelles en appliquant une force mécanique. L'objectif principal de l'utilisation d'un traitement mécanique plutôt que d'un traitement chimique est de transformer les bûches sans écorces ou les copeaux de bois directement en fibres avec un haut rendement de mise en pâte. Dans ce cas, presque toutes les composantes originales du bois se retrouvent dans le produit final. Aujourd'hui, les pâtes mécaniques représentent environ le quart de la production mondiale de pâtes et papiers.

Généralement, le procédé de mise en pâte mécanique de raffineur se divise en une étape de séparation des fibres suivie d'une étape de développement de la surface des fibres [17, 18, 19]. Pendant la première étape, les copeaux sont transformés en petites particules ou en faisceaux de fibres par une force mécanique. Petit-Conil et al [19] ont considéré que la séparation des fibres devrait se faire entre les couches  $S_1$  et  $S_2$  ou entre la couche  $S_1$  et la paroi primaire. Ces séparations sélectives peuvent augmenter les liaisons hydrogène. Cependant, durant la période de développement des fibres, deux mécanismes se produisent en parallèle [18, 19]: Le contenu en fibres longues est diminué pendant que la paroi primaire P et la couche  $S_1$  des fibres sont partiellement arrachées. Lors de la seconde étape de développement, les fibres sont développées et deviennent plus flexibles. Cette dernière fonction confère aux pâtes de meilleures propriétés physiques. [19].

Selon la façon de fabriquer les pâtes mécaniques, il y a fondamentalement trois catégories de procédés [17, 19, 20, 21]:

- Les procédés utilisant des bûches: Pâte mécanique de meule (PMM) et pâte mécanique de meule sous pression (PMMP) ;
- Les procédés de raffinage à partir de copeaux sans ajout de produits chimiques: Pâte thermomécanique (PTM) et pâte mécanique de raffineur (PMR);
- Les procédés de raffinage à partir de copeaux avec traitement chimique: Pâte chimicomécanique (PCM), pâte chimiothermomécanique (PCTM) et pâtes mécanique au peroxyde alcalin (PMPA).

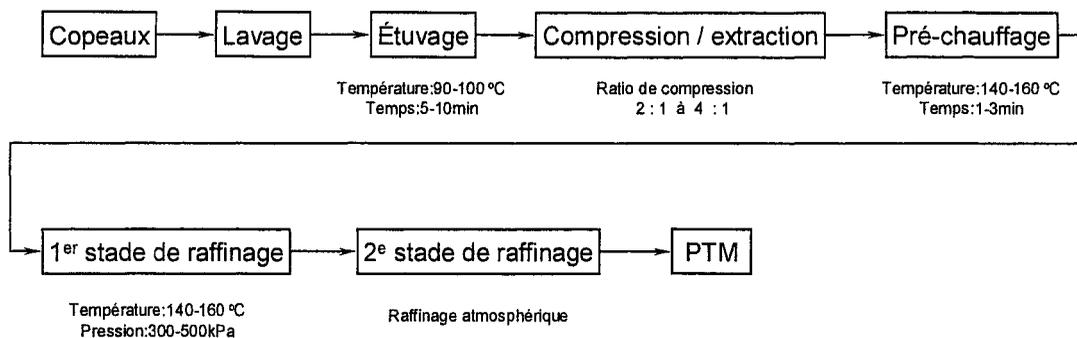
La Figure 2-1, représente la séparation des fibres pour différents procédés de mise en pâte mécanique de raffineur.



**Figure 2-1. Séparation selon le procédé de mise en pâte mécanique [17]**

## 2.2 Pâte thermomécanique (PTM)

La pâte thermomécanique est produite moyennant un raffinage pressurisé. Son application est basée sur la technologie PMR [17]. Aujourd'hui, la pâte PTM est principalement employée pour fabriquer le papier journal. La Figure 2-2 nous montre un digramme du procédé PTM.



**Figure 2-2. Digramme du procédé PTM**

Avant d'entrer dans le raffineur, les copeaux de bois sont normalement préchauffés à l'aide de vapeur à une température d'environ 90-100 °C. Après le préchauffage, les copeaux sont chauffés à une température supérieure à la température de transition vitreuse de la lignine dont l'effet est de ramollir les copeaux, ce qui facilite la séparation des fibres de bois et réduit les coupures aux fibres individuelles [17].

Le contenu en fibres longues et en fines sont les paramètres les plus importants pour mesurer les propriétés des pâtes PTM. Si on la compare avec la pâte PMMP, la pâte PTM possède un plus haut contenu en fibres longues, de meilleures propriétés physiques et moins de fines. Malheureusement, ce procédé consomme beaucoup plus d'énergie spécifique lors du raffinage et confère aux pâtes une plus faible opacité [17].

Le procédé RTS est un développement récent de la technologie de mise en pâte PTM. Il emploie un court temps de résidence (R), une haute température (T) et une vitesse de rotation élevée (S) durant le premier stage de raffinage pressurisé [17, 22, 23]. La haute température, qui est supérieure à la température de transition vitreuse de la lignine, ramollie les copeaux de bois pendant que le bas temps de résidence permet d'éviter de perdre le niveau de blancheur de la pâte.

## 2.3 Facteurs influençant la qualité de la Pâte PTM

Pendant la mise en pâte PTM, il y a un grand nombre de facteurs, tels que l'essence de bois, l'énergie spécifique, l'intensité de raffinage, la température et la pression de raffinage, les plaques de raffineurs, la vitesse de rotation, le taux de production etc. [17, 24], influençant la qualité des pâtes PTM. Nous allons ici principalement nous concentrer sur l'essence de bois et l'énergie spécifique influençant la qualité de la pâte PTM.

### 2.3.1 Essence de bois

Jackson [25] montre que l'essence de bois a un effet significatif sur la pâte PTM. Ceci en raison des différentes compositions chimiques du bois et des propriétés morphologiques différentes entre les fibres de résineux et de feuillus. L'essence de bois est probablement le paramètre le plus important influençant les propriétés de la pâte PTM et même de toutes les pâtes mécaniques [17, 24]. Cependant, un faible pourcentage de feuillus pourrait être utilisé comme matière première lors de la mise en pâte PTM. Par contre, la plupart des essences de bois feuillu ont besoin d'un traitement chimique pour améliorer les propriétés des fibres. Le Tableau 2-1 [24] montre des caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences de bois.

**Tableau 2-1. Caractéristiques des pâtes PTM de diverses essences**

Propriété	Épinette / Sapin	Pin gris	Tremble
Énergie spécifique, MWh/t	1,92	2,20	-
Bauer McNett, +14 mailles, %	12,2	7,0	-
Bauer McNett, -200 mailles, %	30,2	32,5	-
Longueur de fibres, mm	1,29	1,00	-
Rejet, %	0,45	0,10	0,5
Densité, kg/m <sup>3</sup>	391	341	365
Indice de rupture, Nm/g	40,8	34,9	23
Indice de déchirure, mN*m <sup>2</sup> /g	9,4	8,5	3,1
Coeff. Diffusion, m <sup>2</sup> /kg	63,5	59,4	68,0
Blancheur, % ISO	58,0	47,8	58,0

La qualité de la pâte PTM est plus ou moins déterminée par la qualité de la matière première [26]. Ainsi, afin d'obtenir une qualité égale et élevée de pâte, la qualité des copeaux doit donc être soigneusement vérifiée. Les autres paramètres à surveiller sont : la densité et l'humidité du bois, la longueur et l'épaisseur des fibres, l'épaisseur des parois des fibres et l'angle des fibrilles. Ceux-ci influencent la qualité de la pâte PTM. Reme et Helle utilisant un procédé PTM [27], indiquent qu'en gardant tous les autres paramètres constants, une réduction de l'épaisseur de la paroi des fibres pourrait apporter une réduction considérable de la rugosité de surface et une augmentation du coefficient de diffusion de la lumière du papier.

### **2.3.2 Énergie spécifique**

L'énergie spécifique est un facteur important pour la production de pâte PTM. La qualité de la pâte dépend de l'énergie spécifique appliquée. Si on le compare aux autres procédés de mise en pâte mécanique, le procédé PTM consomme beaucoup d'énergie lors du raffinage. La pâte PTM pourrait consommer 40% plus d'énergie spécifique que la pâte PMM ou PMMP [17]. Par ailleurs, l'essence de bois influence beaucoup la quantité d'énergie spécifique consommée. Laliberté et al [28] ont montré que le pin a besoin de beaucoup plus d'énergie spécifique que l'épinette lorsqu'on produit la pâte PTM ayant une qualité semblable. L'énergie spécifique dépend aussi de la sorte de papier à fabriquer [29].

## Chapitre 3 - Caractéristiques des essences de bois

### 3.1 Mélèze

En général, le mélèze est un grand arbre à tige droite et graduellement décroissante. Son bois est dur, lourd, non poreux et de grande valeur industrielle. Cet arbre se distingue des autres conifères par ses aiguilles qui jaunissent et tombent à l'automne; laissant l'arbre nu en hiver [30]. Il a une meilleure croissance lorsqu'il est isolé et pousse en plein soleil. On le retrouve rarement en peuplement pur [13, 30, 31, 32, 33, 34]. En effet, dès le début des années 70, le mélèze était considéré comme une des essences à croissance rapide qui allaient jouer un rôle important dans le reboisement et la production forestière du Québec [31].

Au Canada, les mélèzes se classifient en deux catégories : le mélèze indigène et le mélèze de plantation. Le mélèze indigène regroupe trois espèces : le mélèze laricin (*Larix laricina*), le mélèze occidental (*Larix occidentalis*) et le mélèze alpin (*Larix hyalii*). Parmi eux, l'espèce la plus répandue est le mélèze laricin. Il se retrouve habituellement en terrain dense, humide et froid où la compétition est presque nulle. Par contre, il croît nettement mieux dans des sols légers et bien drainés. D'un autre côté, le mélèze de plantation inclut le mélèze hybride, le mélèze européen, le mélèze japonais, le mélèze sibérien, etc. [13, 30, 32, 33, 34, 35]

#### 3.1.1 Caractéristiques

##### 3.1.1.1 La croissance

Le mélèze adulte peut atteindre une hauteur de 30 à 60 mètres [36]. Son taux de croissance est l'une des caractéristiques qui en fait une essence intéressante à cultiver. En effet, étant donné sa croissance rapide, la culture du mélèze permet une rotation rapide et une production accrue par surface de terrain. Dans les mêmes conditions de croissance, le mélèze surpasse les essences traditionnelles. Par exemple, le mélèze croît trois fois plus vite que le sapin. Aussi, une plantation de mélèze européen âgés de 28 ans

donne un volume total de bois à l'hectare de 348 m<sup>3</sup>; ce qui est de beaucoup supérieur à l'épinette blanche (185 m<sup>3</sup>/ha) et au pin rouge (178 m<sup>3</sup>/ha) [31].

Le Tableau 3-1 montre la croissance du mélèze européen et du mélèze japonais. Le Tableau 3-2 montre la hauteur moyenne du mélèze provenant différentes plantations. De ces tableaux, on constate que la croissance du mélèze varie beaucoup d'une espèce à l'autre. De plus, on trouve que la même espèce de mélèze provenant de différentes plantations présente des taux de croissance différents.

**Tableau 3-1. Croissance du mélèze européen et du mélèze japonais [31]**

Âge (ans)	Hauteur moyenne (m)	Accroissement moyen (cm)	Volume annuel moyen (m <sup>3</sup> /ha)
10	7,5	9,4	5,6
15	12,1	11,5	16,5

**Tableau 3-2. Hauteur moyenne du mélèze [7]**

Provenance	Âge (ans)	Mélèze européen	Mélèze hybride	Mélèze japonais
		Hauteur moyenne, m		
Batiscan	17	-	-	6,8-8,4
Verchères	22	8,5-11,8	9,5-12,9	8,7-11,7
Mastigouche	22	4,9-7,3	6,1-9,2	6,1-7,9
Lotbinière	23	7,8-11,2	-	-
Villeroy	22	5,4-11,1	8,2-11,4	7,8-10,4
Ft-Coulonge	17	5,2-5,9	-	6,1-6,5

Pour le mélèze laricin, le taux d'accroissement du volume marchand est de 10-20 m<sup>3</sup>/ha-an en plantation et de 3,5-6 m<sup>3</sup>/ha-an en milieu naturel; le taux de croissance du mélèze de plantation est donc 3 fois supérieur au mélèze naturel [31].

### 3.1.1.2 Densité

La densité est une caractéristique importante du mélèze. Le bois de mélèze naturel est reconnu pour sa densité élevée. À cet égard, il est nettement supérieur au bois de pin ou d'épinette. Toutefois, pour le mélèze de plantation, la densité de son bois est peu élevé

par rapport au mélèze naturel; ce phénomène est aussi observé chez d'autres espèces résineuses cultivées en plantation. Toutefois, cette densité est encore appréciable en le comparant au bois d'épinette [31].

Le bois est principalement acheté en volume par les usines de pâtes et papiers. Une densité élevée donne un meilleur rendement de mise en pâte par volume unitaire de bois par rapport à une basse densité [17]. Ainsi, le bois ayant une haute densité représente une économie potentielle au niveau de la consommation du bois et elle est avantageuse pour les producteurs de pâtes et papiers.

**Tableau 3-3. Densité des essences de bois [37]**

Espèce	Densité	
	g/volume vert	lb/pi <sup>3</sup>
Pin rouge	0,39	24,3
Pin gris	0,39	24,3
Mélèze japonais	0,48	30,0
Mélèze européen	0,49	30,6
Pin blanc	0,34	21,2
Épinette blanche	0,37	23,1

Tel qu'illustré au Tableau 3-3, le bois du mélèze de plantation permet une production d'environ 25% supérieure par rapport aux essences traditionnelles comme l'épinette et le pin. Cependant, pour un même volume de bois, le mélèze laricin pourrait produire 30% plus de pâte que le sapin baumier [31].

### 3.1.1.3 Morphologie des fibres

Tel qu'illustré au Tableau 3-4, les fibres de bois du mélèze sont plus courtes que celles du pin gris et de l'épinette noire. D'autre part, l'épaisseur de la paroi fibreuse est comparable pour les trois essences de bois de printemps. Cependant, pour le bois d'été, la paroi de la fibre de mélèze est plus épaisse que celle des autres deux essences d'arbre. Évidemment, une paroi plus épaisse rend la fibre plus rigide; ce qui rend le réseau fibreux moins compact et permet la production d'un papier plus bouffant en plus d'en réduire la résistance à la rupture et à l'éclatement. Conséquemment, les fibres provenant

du mélèze sont plus rigides. Aussi, le mélèze possède une masse linéique plus élevée que le pin gris et l'épinette noire.

**Tableau 3-4. Morphologie des fibres du mélèze, du pin gris et de l'épinette noire [38]**

	Mélèze hybride	Pin gris	Épinette noire
Longueur moyenne, mm			
arithmétique	0,87	1,89	1,77
pondérée en longueur	2,24	2,91	2,48
pondérée en poids	2,91	3,31	2,75
Diamètre, $\mu\text{m}$			
bois de printemps	58	34	38
bois d'été	29	19	14
Masse linéique, mg/m	0,327	0,193	0,200
Épaisseur de la paroi, $\mu\text{m}$			
bois de printemps	2,78	2,78	2,78
bois d'été	5,67	4,55	4,09

#### 3.1.1.4 Caractéristiques chimiques

Le mélèze présente une quantité de lignine et un taux de cendres semblables à ceux du pin gris et de l'épinette noire (Tableau 3-5). Les matières solubles dans l'eau chaude ou froide ainsi que dans l'hydroxyde de sodium à 1% sont fortement présentes. Cependant, la solubilité dans le dichlorométhane du mélèze est relativement faible.

**Tableau 3-5. Caractéristiques chimiques du bois [38]**

	Mélèze hybride	Pin gris	Épinette noire
Lignine de Klason, %	28,5	28,5	28,0
Pentosanes, %	6,39	8,15	7,63
Matières extractibles			
au DCM, %	1,54	2,20	1,71
Solubilité, %			
eau froide	4,57	3,76	3,76
eau chaude	4,98	3,09	3,65
1% NaOH	15,0	13,3	12,1
Teneur en cendres, %	0,246	0,244	0,346

**Tableau 3-6. Composition des polysaccharides du mélèze sibérien [39]**

	Aubier		Bois de coeur	
	1	2	1	2
Arabinose, %	5,2	2,1	3,7	3,4
Xylose, %	5,5	6,7	6,3	5,5
Mannose, %	14,7	22,8	18,4	17,5
Galactose, %	2,2	2,1	9,9	10,7
Glucose, %	72,5	66,4	61,5	63,3

La teneur en matières extractibles est l'une des caractéristiques qui distingue le mélèze des autres essences de bois. En effet, le mélèze est reconnu pour la quantité de matières extractibles à l'eau. Il contient beaucoup plus de galactose (Tableau 3-6). En plus, pour la galactose, le principal produit recueilli est l'arabinogalactane [36, 40]. Cette substance se retrouve principalement dans le cœur de l'arbre. La quantité d'arabinogalactane devient plus importante avec l'âge de l'arbre [36]. L'arabinogalactane, dû à sa grande solubilité dans l'eau, se dissout facilement lors de cuissons chimiques; ce qui réduit le rendement et augmente la consommation d'agent chimique. Les autres matières extractibles du bois de mélèze contribuent aussi à rendre sa cuisson difficile en plus de nuire à la blancheur.

### **3.1.2 Caractéristiques des pâtes**

Au cours des décennies, le mélèze de plantation a présenté un certain intérêt pour l'industrie québécoise des pâtes et papiers. Il a été considéré comme une fibre potentielle [13]. Aujourd'hui, le mélèze est utilisé avec succès pour le procédé Kraft. Cependant, il n'est pas compatible avec les procédés de mise en pâte mécanique du fait que les propriétés physiques et optiques des pâtes sont bien inférieures à celles requises par l'industrie papetière.

#### **3.1.2.1 Pâte kraft**

Le procédé kraft est le procédé le plus souvent employé pour la mise en pâte du mélèze. En effet, la pâte kraft du mélèze se caractérise par une grande résistance à la déchirure et

un bouffant supérieur. Toutefois, la résistance à la rupture et à l'éclatement est inférieure. Ces propriétés sont dues à la grande rigidité des fibres de mélèze [5, 6, 41].

**Tableau 3-7. Propriétés des pâtes kraft non tamisées [6]**

Kappa no.= 50	PFI Rev/min	CSF mL	Indice d'éclatement kPa·m <sup>2</sup> /g	Indice de déchirure mN·m <sup>2</sup> /g	Longueur de rupture km
Pin gris	0	725	4,5	17,8	6,30
	1000	705	6,4	15,0	8,31
	5000	510	8,5	12,0	10,82
	6000	455	8,7	11,2	11,10
	7500	345	9,3	10,9	11,15
Mélèze européen	0	720	3,4	19,2	5,68
	1000	680	5,9	16,7	8,51
	5000	505	8,0	11,8	10,16
	6000	445	8,3	11,2	10,96
	7500	365	8,7	11,0	11,15
Mélèze japonais	0	740	3,8	20,5	5,29
	1000	710	6,0	16,5	7,90
	3500	600	7,1	14,0	9,13
	6500	330	7,6	12,3	10,30
	9000	210	8,4	11,3	10,83
Mélèze hybride	0	760	3,1	21,2	5,06
	1000	710	5,2	19,8	7,14
	5000	565	7,2	14,6	9,32
	6500	465	7,3	15,2	9,90
	7500	390	7,6	13,8	9,58

Le Tableau 3-7 montre quelques propriétés des pâtes kraft du mélèze de plantation et du pin gris. Évidemment, les propriétés du mélèze sont semblables à celles du pin gris bien qu'une légère perte des propriétés soit perceptible [5, 9]. Ainsi, quelques modifications doivent être apportées au procédé kraft pour le mélèze. En optimisant les conditions de cuisson Kraft de mélèzes hybrides, Lanouette et al [8] et Gagnon [7] montrent qu'il est possible de remplacer le pin gris par le mélèze de plantation dans le mélange de copeaux, de façon partielle ou totale.

### 3.1.2.2 Pâtes mécaniques

Des travaux d'utilisation du mélèze pour la production de pâtes mécaniques sont été réalisés [10, 11, 12, 13]. Le principal obstacle à l'utilisation du mélèze pour la production de pâtes PMR est la faible blancheur qui en résulte. Comparativement au procédé PTM pour une plage de CSF comprise entre 100 et 300 mL, la pâte PMR de mélèze possède une meilleure blancheur. Elle est de 40-42 %ISO tandis que la pâte PTM a une blancheur de 39-40 %ISO [12]; ce qui est également très bas. De même, le procédé PMR du mélèze produit une pâte faible en propriétés physiques qui sont bien inférieures à celles requises par l'industrie papetière.

Comparé à l'épinette noire et au pin gris (Figure 3-1), la pâte PTM à base de mélèze nécessite moins d'énergie spécifique que celle requise par la pâte d'épinette noire et de pin gris. Cependant, les propriétés de résistance à la rupture et à la déchirure ainsi que la blancheur, sont de loin inférieures à celles obtenues avec des pâtes à base d'épinette et de sapin. Encore une fois, la faible blancheur et les faibles propriétés physiques limitent l'utilisation du mélèze dans le procédé.

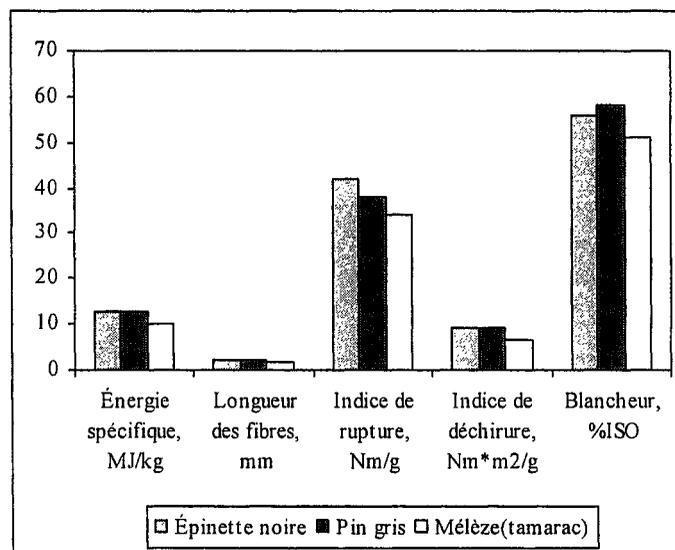


Figure 3-1. Propriétés des pâtes PTM, CSF=130 mL [13]

L'utilisation de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  et de  $\text{NaOH}$  pour le prétraitement chimique améliore significativement la flexibilité des fibres ainsi que les propriétés physiques de pâte en comparaison aux pâtes de mélèze produites par PMR et PTM. Tel qu'illustré au Tableau 3-8, le procédé PCMR produit la meilleure pâte comparativement au procédé PTM et PCTM. Dans ce cas, 9% de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  et 4% de  $\text{NaOH}$  sont minimalement requis. Cependant, à un CSF donné, le prétraitement chimique augmente la consommation en énergie spécifique pendant le raffinage [13].

**Tableau 3-8. Propriétés des pâtes de mélèze, CSF=400mL [13]**

	PCMR	PTM	PCTM
Énergie spécifique, MJ/kg	6,1-6,7	6,5	7,6
Longueur de rupture, km	2,8-3,0	2,0	2,4
Indice de déchirure, $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	7,2-9,5	6,4	6,4-11,0
Blancheur, %ISO	27-37	34,2	26-37

Le prétraitement chimique augmente les propriétés physiques. Toutefois, l'utilisation du  $\text{NaOH}$  entraîne une diminution de la blancheur des pâtes, car il favorise la formation de groupements quinoniques sur la lignine; groupements qui absorbent la lumière visible. Pour atteindre une blancheur d'environ 60 %ISO, les pâtes de mélèze produite par PCMR et PCTM demandent jusqu'à 6% d'agents de blanchiment [13]. Comme pour les autres procédés mécaniques, la blancheur des pâtes de mélèze PCMR et PCTM demeure un facteur limitant pour l'utilisation commerciale.

### 3.2 Bouleau

Le bouleau est un des arbres les plus résistants et robustes. Il pousse dans différents types de sols. Les 30 à 40 espèces connues se localisent dans les zones tempérées. Au Canada, le bouleau est la deuxième essence de feuillus la plus répandue (Tableau 3-9). Au Québec, les bois de feuillus représentent environ 30% du volume marchand de forêt totale. L'espèce dominante est le bouleau qui représente 44,6% de ce volume (Tableau 3-9). Une des espèces, le bouleau blanc, pousse en bon nombre au Canada et s'y étend partout, sauf dans l'extrême nord du pays [30].

**Tableau 3-9. Volume des essences feuillues au Canada et au Québec [14]**

	Volume, Mm <sup>3</sup>		%	
	Canada	Québec	Canada	Québec
Peuplier	3525	322	62	24,9
Bouleau	1198	576	21	44,6
Érable	683	313	12	24,2
Autres	291	81	5	6,3
Total	5699	1292	100	100

### 3.2.1 Caractéristiques

#### 3.2.1.1 Caractéristiques physiques

Le bouleau, tel que le bouleau blanc, est de dimension moyenne et dépasse rarement les 80 pieds de hauteur et 2 pieds de diamètre [30]. Comme le bois de mélèze, le bois de bouleau possède une densité élevée; ce qui permet une économie potentielle au niveau de la consommation du bois tel que mentionné précédemment. Le Tableau 3-10 montre que la densité du bois de bouleau blanc est supérieure à celle de l'épinette noire et du sapin. Pour un même volume de bois, le bois de bouleau blanc permet de produire 20% plus de pâte que le bois d'épinette noire et 30% plus que le sapin.

**Tableau 3-10. Morphologie des fibres du bouleau blanc, de l'épinette noire et du sapin baumier [42]**

	Longueur moyenne des fibres, mm	Diamètre des fibres, µm	Épaisseur de la paroi, µm	Densité (vol. vert)
Bouleau blanc	1,4	18	3,75	0,48
Épinette noire	3,5	25-30	1-3,5	0,40
Sapin baumier	3,5	30-40	1-3	0,34

Comparativement au bois d'épinette noire et de sapin (Tableau 3-10), les fibres du bois de bouleau blanc sont relativement courtes et leur diamètre est faible. Cependant, elles ont une paroi plus épaisse. Les fibres provenant du bouleau blanc sont donc plus rigides que celles de l'épinette noire ou du sapin. Même si les fibres du bois de bouleau blanc ont une paroi épaisse ainsi qu'un faible diamètre, leur masse linéique est peu élevée. Les fibres de bouleau blanc mélangées avec celles de l'épinette et du sapin donnent un réseau

fibreux résistant suite au raffinage; ce qui laisse croire que les petites dimensions des fibres du bouleau blanc joue un rôle déterminant dans la formation de ce réseau [42].

### 3.2.1.2 Caractéristiques chimiques

Le bois de feuillus est très différent du bois de résineux en ce qui a trait à sa composition chimique. Effectivement, la composition chimique et la structure du bois influencent l'imprégnation chimique. Tel qu'illustré au Tableau 3-11, le bouleau blanc contient moins de lignine et plus d'hémicellulose par comparaison à l'épinette noire et au sapin.

**Tableau 3-11. Caractéristiques chimiques du bois de bouleau blanc, d'épinette noire et de sapin baumier [42]**

	Bouleau blanc	Épinette noire	Sapin baumier
Lignine, %	18,4	26,3	27,6
Pentosanes, %	24,0	12,8	9,4
Cellulose, %	60,4	60,9	59,5
Solubilité dans l'eau chaude, %	2,8	3,6	3,6
Alcool / Benzène, %	3,6	2,0	3,0
Solubilité dans 1% NaOH, %	19,0	14,6	12,3

### 3.2.2 Caractéristiques des pâtes

Le bouleau répond bien au procédé Kraft en produisant une pâte possédant de bonnes propriétés physiques [43, 44]. Aujourd'hui, les usines québécoise fabricant le papier journal portent une attention considérable sur l'utilisation de cette essence de feuillus. Malheureusement, l'utilisation du bouleau demeure marginale dans ces usines, même s'il y a une grande disponibilité de cette essence dans les forêts naturelles.

#### 3.2.2.1 Pâte Kraft

Les pâtes Kraft sont l'un des produits les plus importants de l'industrie papetière au Canada. En effet, ces usines emploient une grande variété d'essences de bois pour leur production. Comme il a été mentionné antérieurement, le mélèze s'utilise bien dans le procédé Kraft ainsi que le bouleau. Le Tableau 3-12 montre les propriétés des pâtes

Kraft à base de feuillus. Les pâtes produites à partir d'érables à sucre possèdent des propriétés physiques inférieures aux pâtes de bouleau et de tremble. Aussi, le bouleau produit une meilleure pâte que le tremble selon ses propriétés physiques.

**Tableau 3-12. Propriétés des pâtes Kraft à base d'essences feuillues canadiennes**  
[44]

	Bouleau jaune	Bouleau blanc	Tremble	Érable à sucre
<b>Propriétés des pâtes non raffinées</b>				
CSF, ml	688	544	545	452
Densité, cm <sup>3</sup> /g	1,68	1,50	1,47	1,66
Longueur de rupture, Km	4,59	5,65	5,99	4,52
Allongement, %	2,72	3,23	2,95	2,34
Indice de déchirure, mN· m <sup>2</sup> /g	10,6	10,0	6,92	4,43
Coefficient de diffusion de la lumière, cm <sup>2</sup> /g	270	311	317	402
Blancheur, %ISO	91,2	90,1	92,3	93,0
<b>Propriétés des pâtes raffinées</b>				
CSF, ml	324	364	230	270
Densité, cm <sup>3</sup> /g	1,39	1,29	1,27	1,41
Longueur de rupture, Km	11,73	10,30	10,56	7,81
Allongement, %	4,41	4,43	4,23	3,76
Indice de déchirure, mN· m <sup>2</sup> /g	11,45	9,33	8,06	7,40
Coefficient de diffusion de la lumière, cm <sup>2</sup> /g	163	201	215	317

### 3.2.2.2 Pâtes mécaniques

Depuis longtemps, l'industrie papetière québécoise n'utilise que les résineux traditionnels, tels que l'épinette et le sapin comme matière première pour produire les pâtes mécaniques. Ce choix s'explique par le fait que les fibres de feuillus sont plus courtes et plus rigides que celles de résineux. L'essence de bois pourrait avoir un effet significatif sur les propriétés des pâtes PTM [25]. Puisque le bouleau possède de petites fibres à paroi épaisse, il est plus résistant au raffinage que l'épinette et le sapin [45]. Les

fines provenant de pâtes PTM à base de bouleau blanc se composent principalement de fibres, de vaisseaux et de parenchymes. Les fines sont des fragments non fibrillés; ce qui apportent une pauvre capacité à renforcer les liaisons entre les fibres [46].

Tel qu'illustré au Tableau 3-13, les fibres de pâte PTM à base de bouleau blanc, sont plus courtes que celles d'épinette et de sapin. Cependant, le bouleau blanc amène des propriétés physiques inférieures comparativement au mélange d'épinette et de sapin. Law et al. [47] ont montré que, en comparant avec le procédé PTM standard qui utilise une presse à vis, la pâte PTM produite à partir des copeaux comprimés de bouleau réduit l'énergie spécifique d'environ 9% en plus d'améliorer les indices de rupture et d'éclatement.

**Tableau 3-13. Propriétés des pâtes PTM du bouleau blanc et du mélange d'épinette et de sapin [45]**

	Bouleau blanc			Épinette / Sapin		
	1	2	3	1	2	3
CSF, mL	596	360	100	472	218	77
Longueur des fibres, mm	1,41	0,93	0,76	1,95	1,50	1,00
Fines, %(Bauer McNett, P200)	1	19	28	4	12	38
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	1,4	2,1	2,7	9,1	11,5	9,0
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	0	0,25	0,50	0,9	2,2	2,8
Longueur de rupture, km	0,24	0,77	1,4	1,5	3,0	4,1
Allongement, %	0,2	0,9	0,9	1,4	2,0	2,0
Densité, kg/m <sup>3</sup>	210	280	310	230	310	380
Blancheur, %ISO	46	49	50	49	52	54
Opacité, %	95	96	99	94	96	96
Coefficient de diffusion de la lumière, cm <sup>2</sup> /g	405	509	674	402	520	678

Valade et al [42] ont montré que, dans la pâte PCTM de bouleau, l'utilisation de 2,5% de Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> et de 2,5% de NaOH réduit l'énergie spécifique et améliore les propriétés physiques. L'augmentation de la longueur de rupture est particulièrement significative à un bas CSF ou à une haute énergie spécifique. Cependant, l'entraînement de NaOH nuit à la blancheur. Cependant, la réduction de blancheur causée par la présence de NaOH est moins marquée pour le bouleau que pour les résineux.

## Chapitre 4 - Méthodologie

### 4.1 Description des matières premières

Dans notre projet, nous utilisons trois essences de bois : Mélèze hybride, bouleau blanc et épinette noire. Le mélèze hybride provient de la plantation du Ministère des Ressources Naturelles à Drummondville. Le bouleau blanc, feuillu de densité élevée, pourrait avoir un effet abrasif sur les fibres rigides du mélèze hybride au cours du raffinage et ainsi pourrait aider le développement des fibres. Il provient de la scierie Notre-Dame des Anges à Portneuf. L'épinette noire, essence utilisée normalement, peut servir de base au mélange dans une usine et elle provient de l'usine Kruger à Trois-Rivières. Les trois essences de bois ont été échantillonnées après l'écorçage et la mise en copeaux.

Les copeaux du bois reçus sont non uniformes. Ils contiennent des copeaux sur dimensionnés et des sciures qui doivent être enlevés. De ce fait, nous utilisons un classificateur à disque de type Rader, qui classe selon l'épaisseur des copeaux. Une classification Williams au laboratoire est faite en même temps pour évaluer la distribution en grosseur. De plus, les matières extractibles au DCM des copeaux sont déterminées par la méthode standard Tappi. Toutes les données sont montrées au Tableau 4-1. Les copeaux qualifiés possèdent une épaisseur inférieure à 8 mm et sans sciures après la classification Rader. Les proportions des copeaux qualifiés de chaque essence sont :

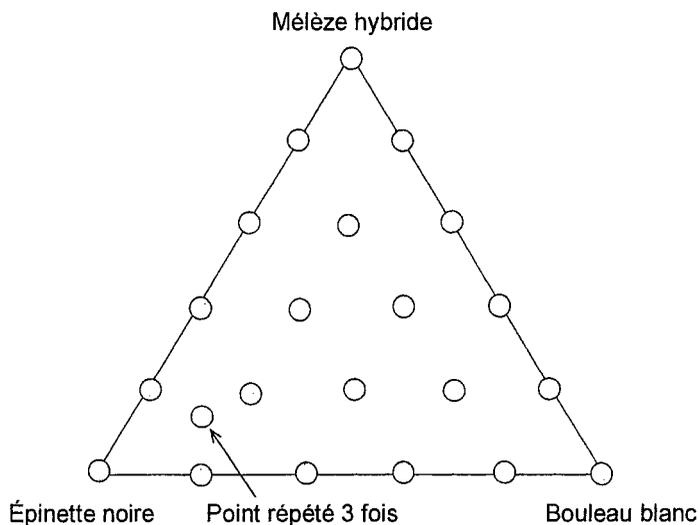
- le mélèze hybride: 97,2%;
- le bouleau blanc: 98,7% et
- l'épinette noire: 90,5%.

**Tableau 4-1. Matières extractibles au DCM et classification des copeaux**

		Mélèze hybride	Bouleau blanc	Épinette noire
Matières extractibles au DCM, %		1,62	2,33	1,78
Classification Rader, %	> 8 mm	2,3	0,2	8,9
	6 – 8 mm	1,9	0,4	7,9
	2 – 6 mm	37,8	27,6	55,7
	Fins	58,2	70,7	26,9
	Sciures	0,5	1,1	0,6
Classification Williams, %	1 1/8"	5,7	1,5	9,9
	7/8"	11,6	8,0	21,9
	5/8"	22,3	20,3	28,4
	3/8"	39,8	46,4	30,1
	3/16"	20,2	23,2	8,4
	Poussières	0,5	0,7	1,2

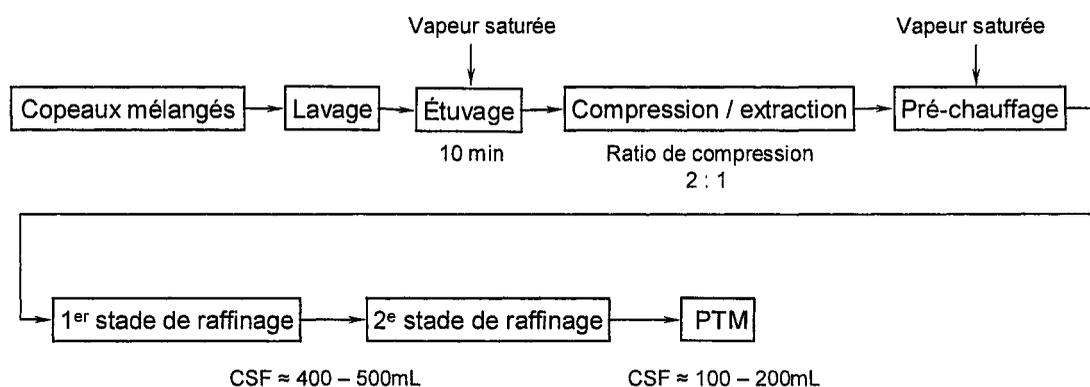
#### 4.2 Méthode de raffinage

Avant le raffinage, les copeaux de chaque essence sont mélangés suivant certaines proportions basées sur un plan d'expérience obtenu à partir d'un logiciel statistique, JMP [48]. Le plan du mélange des copeaux est illustré à la Figure 4-1.

**Figure 4-1. Plan de mélange des copeaux**

La Figure 4-1 nous montre quelles proportions des copeaux ont été choisies, et le point qui est répété 3 fois pour estimer l'erreur expérimentale. Pratiquement, le point répété a été placé au centre de la région la plus intéressante pour une application industrielle, plutôt qu'au centre du plan d'expérience global. Notre plan nous permet d'augmenter le nombre d'essais et ainsi couvrir la totalité du plan. L'ensemble nous donne une couverture de toutes les possibilités de mélanges tandis que la fraction contenant 80% et plus d'épinette noire et la fraction la plus accessible pour l'industrie.

Les copeaux mélangés et lavés sont alors introduit dans le procédé PTM. L'utilisation d'un procédé en deux stades permet de se rapprocher du procédé industriel le plus souvent vu. Un seul stade de raffinage aurait été possible mais une plus grande quantité d'énergie spécifique doit alors être transférée à la pâte dans ce stade unique, causant un taux de coupe plus grand. Dans notre projet, nous prenons un procédé en 2 stades avec une unité pilote de raffinage CD 300 (Metso inc.). Le premier stade est un raffinage pressurisé tandis que le deuxième stade est sous pression atmosphérique. L'indice d'égouttage des pâtes de premier stade est contrôlé entre 400 et 500 mL. Durant le deuxième stade, nous prenons 4 échantillons de pâte avec différents indices d'égouttages, de 100 à 200 mL. La consommation d'énergie spécifique (CES) des deux stades est enregistrée. Le procédé de raffinage est illustré à la Figure 4-2.



**Figure 4-2. Le procédé de raffinage**

### 4.3 Évaluation

Après le raffinage, les pâtes obtenues sont ensuite évaluées. Les fibres des pâtes sont spiralées, tortillées et ondulées ou sont à l'état dit "latent". Les pâtes se présentent souvent avec un indice d'égouttage élevé et de faibles propriétés physiques. Par conséquent, la latence des pâtes doit être éliminée par désintégration à l'eau chaude avant l'évaluation. Les paramètres évalués des pâtes sont illustrés à la Figure 4-3.

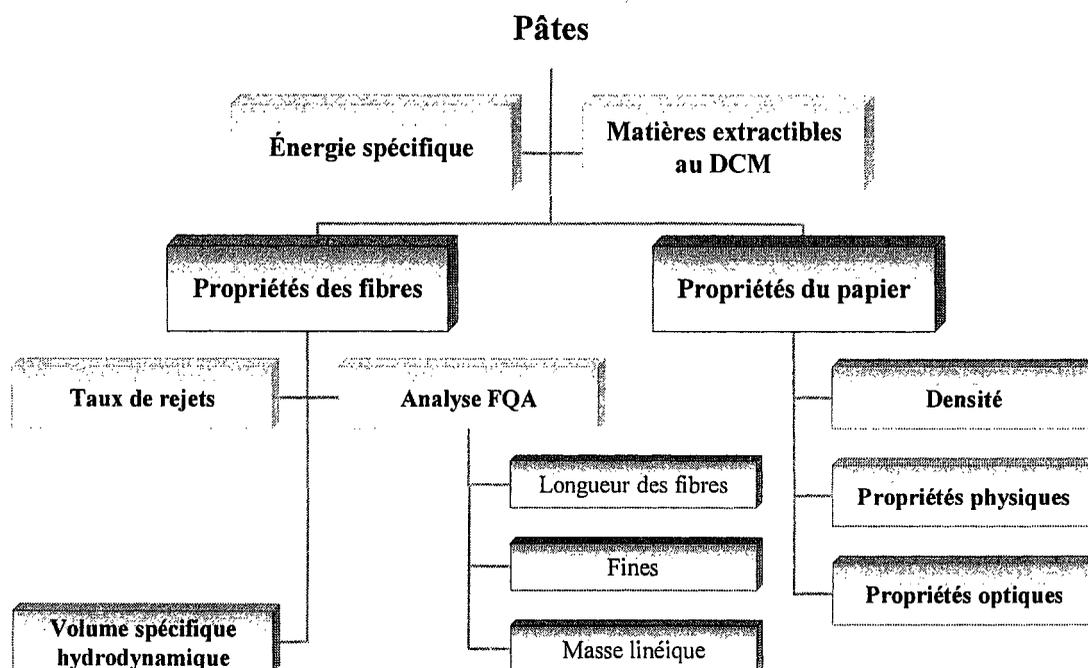


Figure 4-3. Paramètres évalués des pâtes

La consommation d'énergie spécifique (CES) se compose que celle du premier et deuxième stade de raffinage. Le taux de rejets est déterminé par un tamis Pulmac dont les ouvertures sont de 0,006 po ou 0,15 mm. La longueur des fibres, la teneur en fines et la masse linéique sont déterminées à l'aide d'un analyseur de fibres FQA. Le volume spécifique hydrodynamique (VSH) est déterminé selon la méthode qui a été décrite par Marton et Robie [49] et Luukko [50]. Les autres méthodes des paramètres examinées se réfèrent au standard de Tappi.

## Chapitre 5 - Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, nous utilisons tout d'abord le logiciel statistique JMP pour analyser les données. L'ensemble de nos résultats est présenté sous forme de tableaux et de figures. Toutes les propriétés des pâtes sont ramenées à un indice d'égouttage de 150 mL. Cette valeur est choisie car elle correspond à l'indice d'égouttage après le deuxième stade de raffinage. En usine, cette pâte serait tamisée avant de subir un raffinage des rejets, ce qui n'est pas le cas pour nos pâtes.

**Tableau 5-1. Résultat de l'analyse des données**

Propriétés	Moyenne	R <sup>2</sup>	Erreur pure	Erreur total
Énergie spécifique, MJ/kg	8,92	0,69	0,087	1,902
Taux de rejets, %	1,04	0,96	0,006	0,097
Longueur des fibres, mm	1,49	0,99	0,0002	0,0135
Fines, %	8,02	0,95	0,10	3,10
Masse linéique de R48, mg/m	0,205	0,82	0,000003	0,000552
Masse linéique de R100, mg/m	0,176	0,82	0,000002	0,000448
VSH, cm <sup>3</sup> /g	261,25	0,98	348,67	2977,64
Extractibles au DCM, %	1,14	0,97	0,02	0,09
Densité, g/cm <sup>3</sup>	0,33	0,75	0,00007	0,00180
Indice de rupture, N·m/g	31,51	0,997	0,06	5,21
Allongement, %	1,56	0,94	0,03	0,16
AER, g/cm	20,97	0,98	15,09	50,47
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	1,64	0,99	0,004	0,067
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	7,22	0,98	0,05	2,08
Blancheur, %ISO	48,18	0,98	0,43	6,44
Opacité, %	96,89	0,93	0,05	0,74
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	52,83	0,95	0,05	8,76
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /kg	5,57	0,96	0,06	0,88
L*	83,74	0,97	0,14	1,46
a*	1,30	0,92	0,002	0,095
b*	15,99	0,98	0,02	1,28

Afin de modéliser les données, nous avons d'abord généré divers modèles mathématiques représentant le comportement des pâtes. Le Tableau 5-1 présente les résultats de l'analyse des données des différents modèles. Dans ce tableau, la majorité des modèles possèdent un coefficient de régression R<sup>2</sup> élevé. Ces modèles prédisent

assez bien les propriétés mesurées. Ainsi, le résultat de l'analyse des données montre que la majorité des modèles employés sont adéquats.

Toutefois, dans le processus d'analyse, il y a encore des facteurs non significatifs contenus dans les modèles; ce que nous voulons éviter à tout prix, car ils apportent de fausses informations concernant la prédiction. Dans la prochaine étape, nous enlèverons les facteurs non significatifs et nous mesurerons l'impact des essences de bois sur chacune des propriétés. À l'aide de ces analyses sur l'impact des facteurs non significatifs, nous tenterons de révéler l'action du co-raffinage.

### 5.1 Consommation d'énergie spécifique

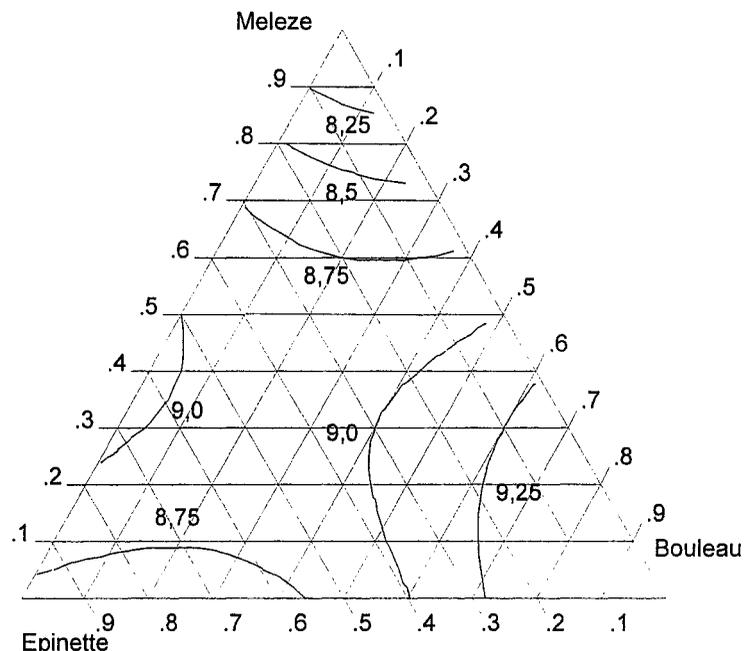


Figure 5-1. Réponse de la CES

$$CES=8,68E+7,91M+10,09B+E*(2,86M -2,23B)$$

Équation 5-1

$$R^2=0,69$$

$$R^2 \text{ ajusté}=0,62$$

**E : Épinette Noire**

**M : Mélèze Hybride**

**B : Bouleau Blanc**

Aujourd'hui, on considère toujours que la consommation d'énergie spécifique (CES) est l'un des paramètres importants pour estimer la qualité des pâtes mécaniques. Dans notre

procédé de mise en pâte PTM, la CES inclut l'énergie consommée dans le premier et le deuxième stade du raffinage. La Figure 5-1 montre la réponse de la consommation d'énergie spécifique.

À un CSF donné, le bouleau blanc (100%) a besoin de beaucoup plus d'énergie spécifique que le mélèze hybride et l'épinette noire (Figure 5-1). Cette constatation s'explique par le fait que le bois de bouleau blanc a une densité beaucoup plus élevée que celle de l'épinette noire et du mélèze. En plus, les fibres du bouleau sont plus courtes et leur paroi est plus épaisse. Il faut une plus grande quantité d'énergie lors du raffinage du bouleau blanc afin d'obtenir un CSF semblable puisque celui-ci est plus résistant.

De même, nous constatons que la CES chute drastiquement lorsque la proportion utilisée de mélèze hybride est trop élevée; soit plus de 80%. Quant à l'utilisation du bouleau blanc, bien au contraire, lorsque son utilisation atteint une valeur supérieure à environ 60%, la CES augmente rapidement. Il est à remarquer que lorsque l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc atteint une proportion inférieure à 40% et 60% respectivement, la CES change peu.

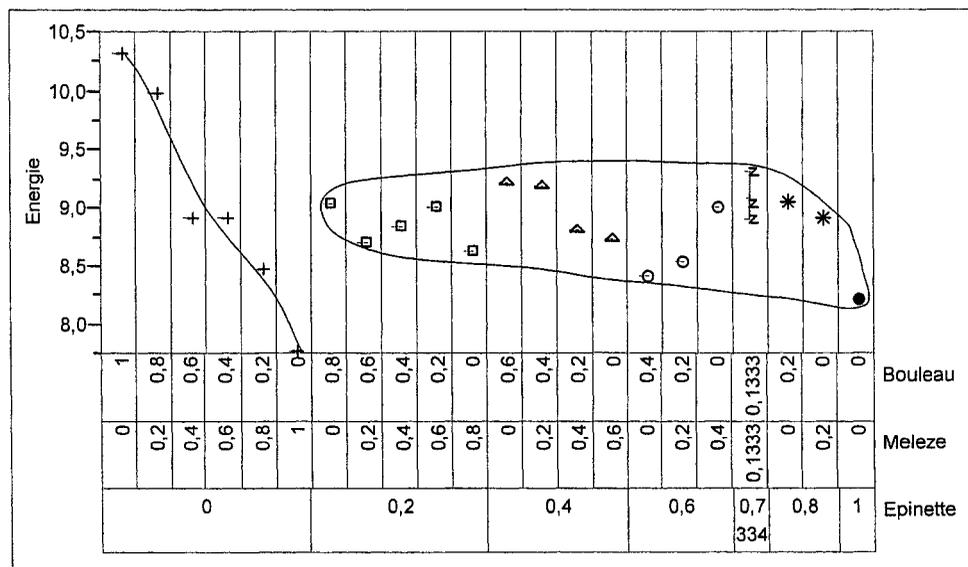


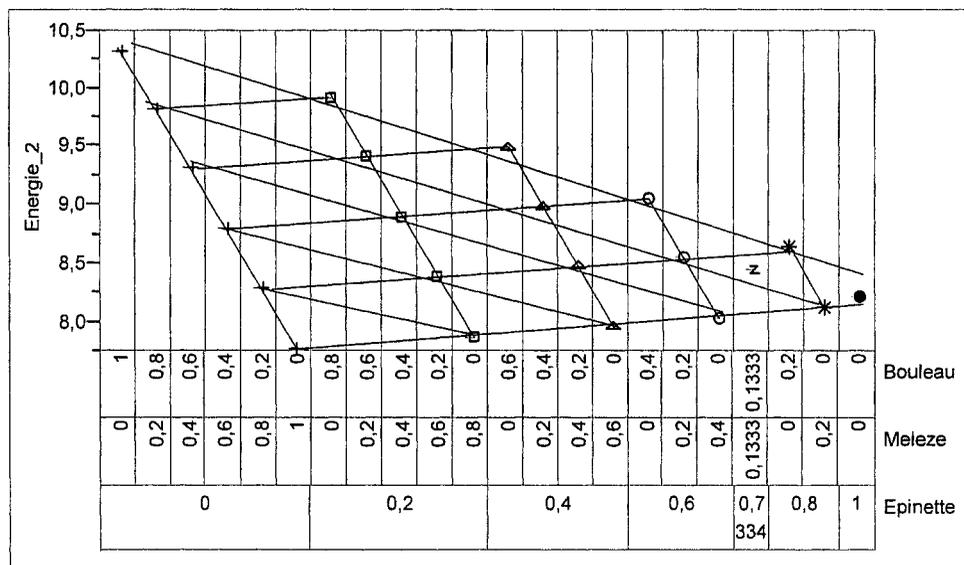
Figure 5-2. Variation de la CES

La Figure 5-2 montre que les pâtes contenant 0% d'épinette noire ont une CES qui chute brusquement suivant l'ajout du mélèze hybride. Le co-raffinage d'une essence feuillue de basse densité avec le bouleau, en utilisant un procédé PCTM, aide à réduire la CES [51]. Dans notre projet, le co-raffinage du mélèze hybride et du bouleau blanc (0% d'épinette noire) nous donne un résultat similaire. Le co-raffinage du bouleau blanc avec les copeaux d'épinette et de sapin d'un procédé PTM réduit la CES [52]. Alors, pour une essence pure qui a besoin d'une CES élevée lors du raffinage, comme le bouleau, le besoin de la CES pourrait être réduite par un co-raffinage avec d'autres essences de bois. Dans ce cas, probablement, la CES des essences ajoutées est moins que celle requise par le co-raffinage.

Toutefois, nous ne voyons pas de variation significative de la CES quand il y a de l'épinette noire intégré aux autres copeaux (Figure 5-2). À la Figure 5-1, il y a aussi un domaine où l'utilisation de l'épinette noire ne fait pas beaucoup varier la CES, juste de 8,75 MJ/kg à 9,0 MJ/kg. L'ajout d'un peu de mélèze hybride et de bouleau blanc aux copeaux d'épinette noire ne change pas tellement la CES. Ces caractéristiques semblent montrer qu'il y a un effet synergique sur la CES pendant le co-raffinage de ces trois essences. L'introduction d'un effet synergique est probablement en raison de la présence des diverses essences qui s'influencent mutuellement durant le co-raffinage. La raison la plus importante est probablement la différence de morphologie entre ces essences de bois.

Normalement, il y a deux façons d'obtenir la pâte mécanique en utilisant des copeaux différents : un procédé de co-raffinage ou un mélange des pâtes mécaniques obtenus après le raffinage. La Figure 5-3 montre le variation de la CES venant des pâtes mélangées directement après le raffinage. Cette figure indique que la CES des pâtes mélangées est bien proportionnelle aux valeurs de chaque pâte prise individuellement. Comparé à la Figure 5-2, ces résultats des deux figures sont totalement différents. La CES des pâtes mélangées est simplement égale à la somme des CES de chaque pâte selon sa proportion; il n'existe pas d'effet synergique lors du mélange. Cette

comparaison vérifiée par la suite d'une manière plus approfondie que dans notre co-raffinage, il y a un effet synergique qui est plus ou moins introduit par la CES.

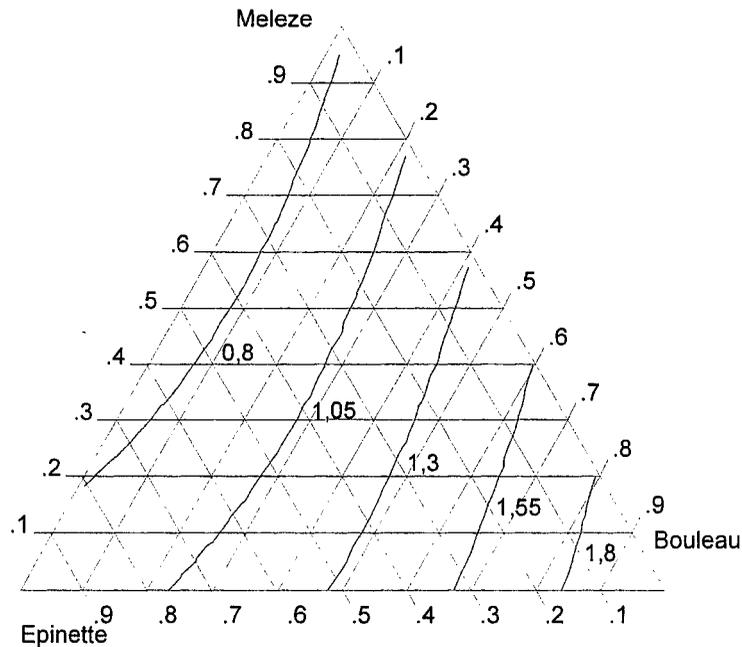


**Figure 5-3. Variation de la CES (M)**

Johal et Hatton [53] ont indiqué qu'à un CSF donné, la substitution des copeaux de tremble par de l'épinette, dans une proportion allant jusqu'à 40%, dans un co-raffinage, pour la mise en pâte PTM ou PCTM, avait juste eu un peu d'influence sur la CES requise. Dans notre travail, nous obtenons un résultat semblable. D'une part une certaine utilisation du mélèze de plantation et du bouleau adoucit l'insuffisance de matière première. D'autre part, elle n'amène pas de variation de la CES et donc n'introduit pas une augmentation du coût énergétique des pâtes produites.

## 5.2 Matières extractibles au DCM

Outre la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, il y a encore d'autres composants nommés matières extractibles dans le bois ou dans les pâtes. Ils peuvent être dissous dans une solution organique, polaire etc. Tel qu'illustrée à la Figure 5-4, nous remarquons que le bouleau blanc apporte une teneur élevée en matières extractibles au DCM. Cependant, suivant l'augmentation d'utilisation de mélèze hybride et/ou de l'épinette noire, les pâtes finales contiennent moins de matières extractibles au DCM.



**Figure 5-4. Réponse de matières extractibles au DCM**

$$ME=0,89E+0,78M+2,07B-E*(0,50M+0,61B)$$

**Équation 5-2**

$$R^2=0,97$$

$$R^2 \text{ ajusté}=0,97$$

**ME : Matières extractibles au DCM**

La teneur en matières extractibles, particulièrement la quantité de matières extractibles à l'eau, est l'une des caractéristiques qui distingue le mélèze des autres essences de bois. En effet, les matières extractibles du bois de mélèze comprennent une grande quantité d'arabinogalactane. Lanouette et al. [8] ont indiqué qu'une haute teneur en matières extractibles est recueillie en utilisant les solutions polaires; ce qui n'est pas le cas avec les solutions organiques, tel que le DCM. Au début du projet, nous avons mesuré les matières extractibles au DCM des trois essences de bois. Les valeurs du bois de mélèze hybride, d'épinette noire et de bouleau blanc sont respectivement 1,62%, 1,78% et 2,33% (Tableau 5-1). Dans l'ensemble, ces valeurs pour les pâtes finales sont proportionnelles aux valeurs contenues dans chacune des essences de bois.

### 5.3 Propriétés des fibres

#### 5.3.1 Taux de rejets

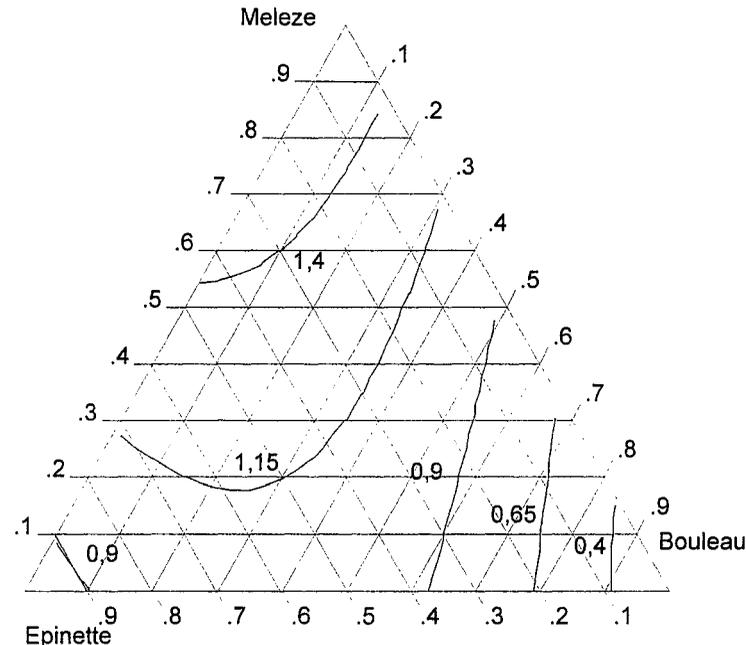


Figure 5-5. Réponse du taux de rejets

$$\text{Taux de Rejets} = 0,76E + 1,58M + 0,17B + E(0,79M + 2,19B)$$

Équation 5-3

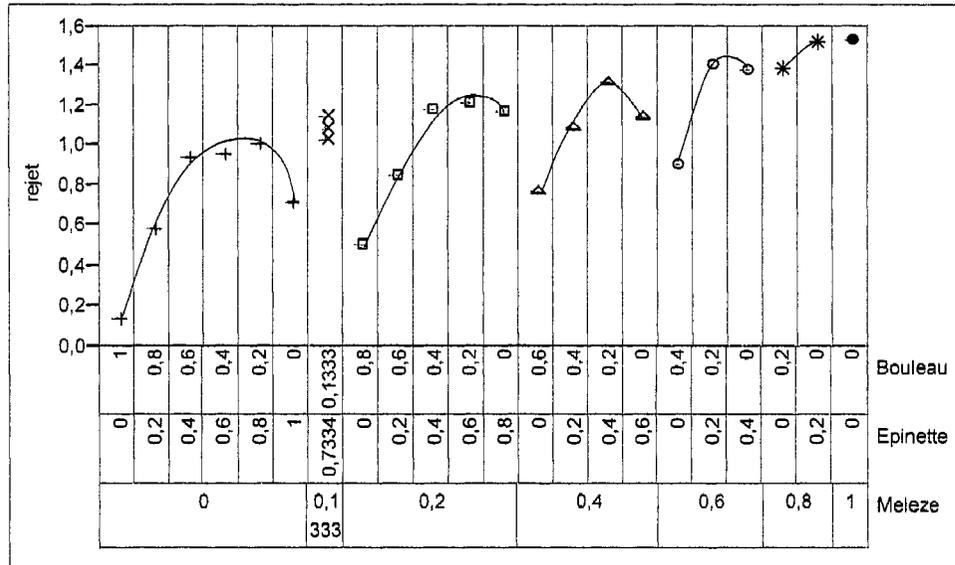
$$R^2 = 0,96$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,95$$

Dans les pâtes PTM, il y a encore des amas de fibres ou des bûchettes non développés qui influencent les liens inter fibres retrouvés dans la structure du papier. Ils peuvent aussi former des points faibles dans le réseau fibreux et, par conséquent, diminuer les propriétés physiques du papier. Nous espérons donc que le taux de rejets dans la pâte sera aussi faible que possible afin d'obtenir un papier plus résistant physiquement.

La Figure 5-5 montre la réponse du taux de rejets. À un CSF donné, la présence du mélèze hybride apporte un taux de rejets élevé tandis que le bouleau blanc amène un taux de rejets plus faible. Nous avons mentionné précédemment (Figure 5-1), que le bouleau blanc a besoin d'une plus grande CES que le mélèze hybride ou l'épinette noire,

de même, les fibres de bouleau blanc sont plus courtes que celles du mélèze hybride et de l'épinette noire; ce qui explique pourquoi la pâte de bouleau blanc a un taux de rejets plus faible.



**Figure 5-6. Variation du taux de rejets**

Le co-raffinage de l'épinette noire avec le bouleau blanc [54] augmente légèrement le taux de rejets par rapport au raffinage de l'épinette seul. Dans notre travail (Figure 5-6), nous voyons qu'une certaine utilisation du bouleau blanc, même en présence de mélèze hybride, augmente un peu le taux de rejets. Cependant, ce n'est pas le cas dans tout notre travail. Wu [54] a montré qu'une substitution allant jusqu'à 40% des copeaux d'épinette noire par du bouleau blanc donne un taux de rejets se situant dans le même domaine que nous avons observé lorsque le mélèze hybride n'a pas été ajouté. Toutefois, les endroits où il n'y a pas d'augmentation du taux de rejets (selon la pâte contenant 100% d'épinette noire) sont causés par le bas taux de rejets du bouleau blanc. En plus, l'introduction du mélèze hybride fait augmenter graduellement cette valeur. Cela nous indique que le mélèze hybride amène un taux de rejets relativement haut.

### 5.3.2 L'analyse des fibres FQA

À l'aide d'un analyseur de fibres FQA, nous déterminons la longueur moyenne des fibres, la teneur en fines et la masse linéique des fractions de pâtes (R48 et R100) obtenues par le Bauer-Mcnett. Nous espérons que les analyses d'influence des propriétés pourraient éclaircir quelques phénomènes sur l'action du raffinage, car ces propriétés reflètent directement l'information des pâtes.

#### 5.3.2.1 La longueur moyenne des fibres

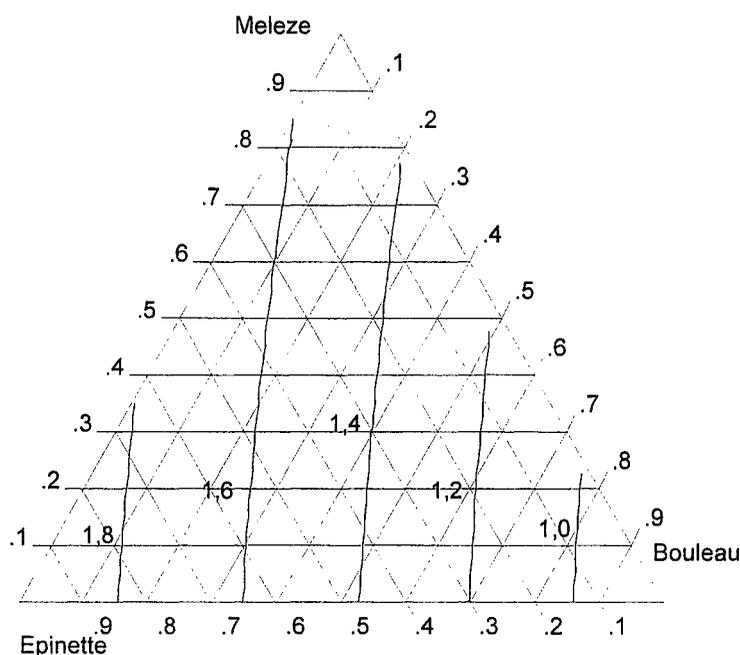


Figure 5-7. Réponse de la longueur moyenne des fibres

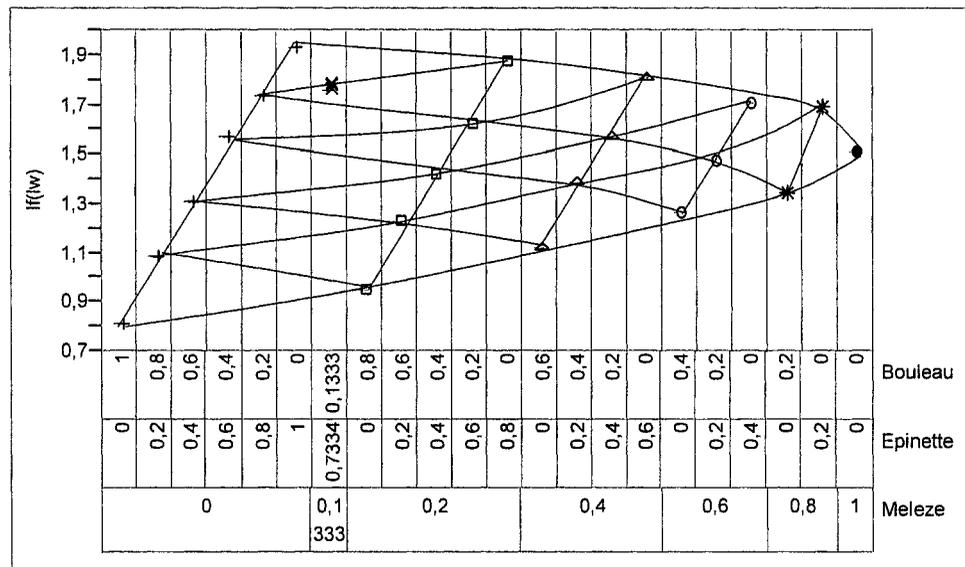
$$\text{Longueur moyenne des fibres} = 1,95E + 1,54M + 0,82B + 0,20E * B \quad \text{Équation 5-4}$$

$$R^2 = 0,99$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,99$$

La longueur des fibres est un facteur important, car plusieurs propriétés physiques du papier en dépendent. C'est le cas notamment de l'indice de déchirure. La longueur des fibres est déterminée à l'aide de l'analyseur de fibres FQA. La figure ci-dessous (Figure 5-7) montre la réponse pour cette propriété.

La Figure 5-7 nous montre qu'à un CSF donné, la pâte contenant 100% d'épinette noire possède une longueur moyenne des fibres plus grande que celle du mélèze hybride ou du bouleau blanc. Ainsi, suivant l'augmentation d'utilisation du mélèze hybride et/ou du bouleau blanc, la longueur moyenne des fibres descend petit à petit. L'épinette noire contient les plus longues fibres tandis que le bouleau blanc possède les plus courtes. Le mélèze hybride a une longueur de fibres intermédiaire. La longueur de fibres du bois influence directement la longueur de fibre contenue dans la pâte. Donc, le bouleau blanc, par ses fibres courtes, donne une pâte plus fragile. Ainsi, pour assurer une certaine longueur de fibres, la quantité utilisée de bouleau blanc doit être assez faible.



**Figure 5-8. Variation de la longueur moyenne des fibres**

De la Figure 5-8, nous voyons que la longueur des fibres est bien proportionnelle aux valeurs individuelles de chaque essence lorsque l'ajout du mélèze hybride reste faible. Pour un procédé PTM, le travail de Wu sur le co-raffinage de l'épinette noire et du bouleau blanc donne le même résultat [54]. Ainsi, nous pouvons dire qu'il n'y a pas de changements majeurs selon le raffinage; les fibres ont une longueur indépendante du procédé de raffinage. Toutefois, nous ne voyons pas très bien les proportionnalités dans la situation où l'utilisation du bouleau blanc ou de l'épinette noire est sous une certaine quantité; spécialement quand la teneur en mélèze hybride est relativement haute. C'est

comme s'il y avait un effet synergique introduit sur cette propriété qui serait influencé par le mélèze hybride. Il nous semble donc qu'une forte utilisation de mélèze hybride est requise avant de voir apparaître des interactions entre les essences. Ce phénomène nous indique que, dans un sens, l'essence de bois et la proportion composée de copeaux sont les facteurs qui influencent l'effet synergique pendant le co-raffinage. Dans notre travail, en comparant avec les deux autres essences, probablement, le mélèze hybride est le facteur le plus actif.

### 5.3.2.2 Fines

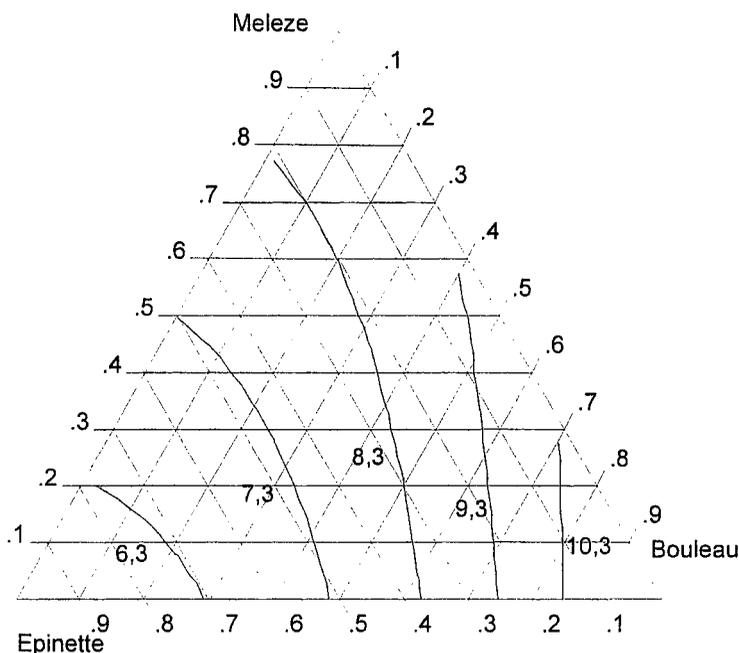


Figure 5-9. Réponse des fines

$$\text{Fines} = 5,58E + 9,05M + 11,97B - (5,56E + 3,41M) * B$$

Équation 5-5

$$R^2 = 0,95$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,94$$

Les particules contenues dans la pâte pouvant passer au travers d'un tamis de 100 ou 200 mailles par pouce du classificateur Bauer-Mcnett ou d'un dispositif semblable sont normalement définies comme les fines [55]. Ces fines sont un indice de qualité essentiel servant à estimer les propriétés des pâtes mécaniques. Dans notre projet, nous

déterminons la quantité de fines contenues dans les pâtes à partir de l'analyseur de fibres FQA.

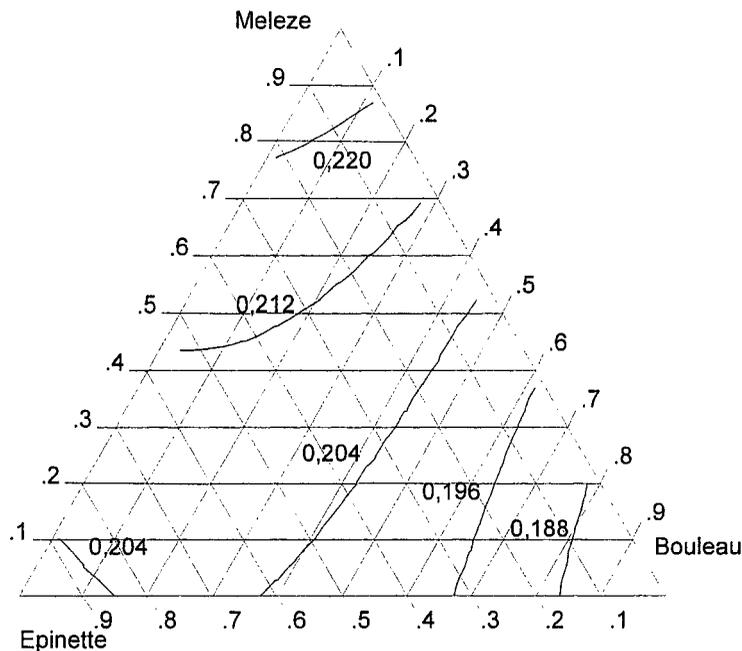
La Figure 5-9 nous montre la réponse des fines. Évidemment, à un CSF donné, les pâtes contenant du mélèze hybride et/ou du bouleau blanc possèdent une haute teneur en fines. Le bouleau blanc amène une teneur en fines plus forte que le mélèze hybride.

Il y a deux sortes de fines dans les pâtes mécaniques: les fines primaires et les fines secondaires. Les fines primaires sont des particules floconneuses qui causent principalement le peluchage et la poussière. Elles apportent un grand coefficient de diffusion au papier. Les fines secondaires sont plutôt fibrillées. Elles sont créées lors du raffinage et elles comportent des débris provenant de la paroi cellulaire  $S_1$  et  $S_2$ ; ce qui joue un rôle important au sein des propriétés de liaison. Dans les pâtes mécaniques, la teneur en fines est considérable et influence fortement la structure et les propriétés du papier. Cette teneur dépend du procédé de défibration et du CSF final de la pâte [55]. Les cellules du bouleau blanc sont composées de fibres, de vaisseaux et de parenchymes. Ainsi, les fines des pâtes contenant du bouleau blanc ont non seulement des débris de la paroi cellulaire  $S_1$  et  $S_2$ , mais elles contiennent également des débris de cellules, de vaisseaux et de parenchymes en plus des fragments non fibrillés; ce qui apportent une pauvre capacité à renforcer les liaisons inter-fibres [46]. Cependant, les fines des pâtes du mélèze hybride contiennent surtout des débris de la paroi. Comparativement aux autres deux essences résineuses, le bouleau blanc a une plus grande teneur en fines. Mais à cause la présence des fragments non fibrillés, des fibres, des vaisseaux et des parenchymes dans les fines, le bouleau blanc ne contribue pas à améliorer les liaisons inter-fibres.

### **5.3.2.3 Masse linéique**

Les fractions R14, R28 et R48 contiennent une part de fibres complètes et une part de fibres coupées qui augmente de plus en plus de R14 à R48. Pour sa part les fractions R100 et R200 contiennent principalement des fragments de fibres [46, 56]. Lors du raffinage les fractions R14 et R28 sont normalement très peu développées tandis que,

dans certaines conditions favorables, il est possible de développer la fraction R48 à un niveau minimum. De son côté, la fraction R100 sera facilement développée lors du raffinage. Le choix des fractions R48 et R100 pour l'analyse permet de suivre les deux fractions qui semblent le plus susceptibles de nous fournir de l'information sur le traitement effectué. Dans notre projet, nous utilisons donc les fractions R48 et R100 pour étudier l'impact sur la masse linéique.



**Figure 5-10. Réponse de la masse linéique de la fraction R48**

$$ML\_R48=0,20E+0,23M+0,18B+0,05B^*E$$

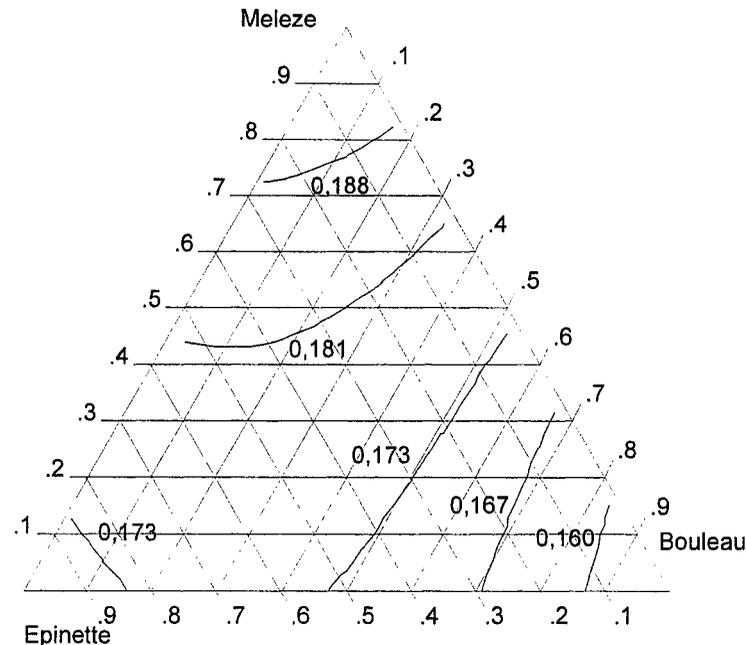
**Équation 5-6**

$$R^2=0,82$$

$$R^2 \text{ ajusté}=0,79$$

**ML\_R48 : Masse Linéique de la fraction R48**

Tel qu'illustrés aux Figure 5-10 et Figure 5-11, les fractions R48 et R100 possèdent une même tendance de la masse linéique. Cela nous indique que l'action de raffinage sur la masse linéique des deux fractions est presque identique. Les fibres de la fraction R48 sont plus longues que celles dans la R100. Ces deux figures indiquent que la masse linéique décroît suivant la diminution de la longueur des fibres.



**Figure 5-11. Réponse de la masse linéique de la fraction R100**

$$ML\_R100=0,17E+0,20M+0,15B+0,05B^*E$$

**Équation 5-7**

$$R^2=0,79$$

$$R^2 \text{ ajusté}=0,76$$

**ML\_R100 : Masse Linéique de la fraction R100**

Les deux figures (Figure 5-10, Figure 5-11) montrent aussi que l'ajout de mélèze hybride augmente la masse linéique des fibres, car les fibres du bois de mélèze, possèdent une paroi épaisse et un grand diamètre; ce qui confère au mélèze une grande masse linéique. Toutefois, le bouleau blanc diminue la masse linéique du mélange considérablement à cause de sa faible masse linéique originale, qui est déterminée par le fait que les fibres de bouleau sont épaisses mais de faible diamètre.

En plus, dans les figures (Figure 5-10, Figure 5-11), il y a un domaine relativement grand où la masse linéique ne varie pas trop, de 0,173 mg/m à 0,181 mg/m. Les deux figures (Figure 5-12, Figure 5-13) montrent aussi que la masse linéique ne suit pas une tendance claire. La valeur de la masse linéique des pâtes n'est pas proportionnelle aux valeurs

individuelles de chaque essence. Ainsi, il y a un effet synergique sur cette propriété. Cela indique aussi que la séparation de la paroi des fibres est probablement due au hasard.

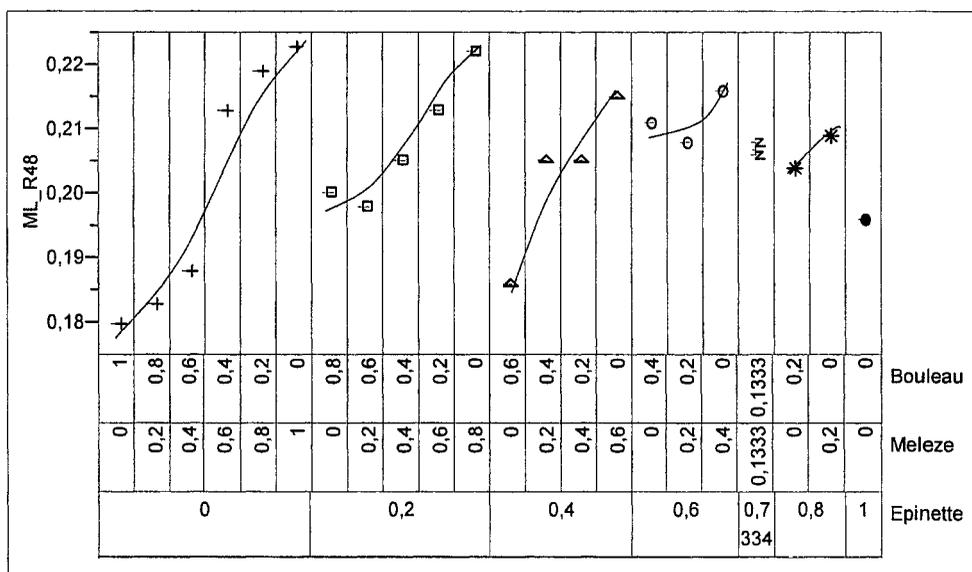


Figure 5-12. Variation de la masse linéique de la fraction R48

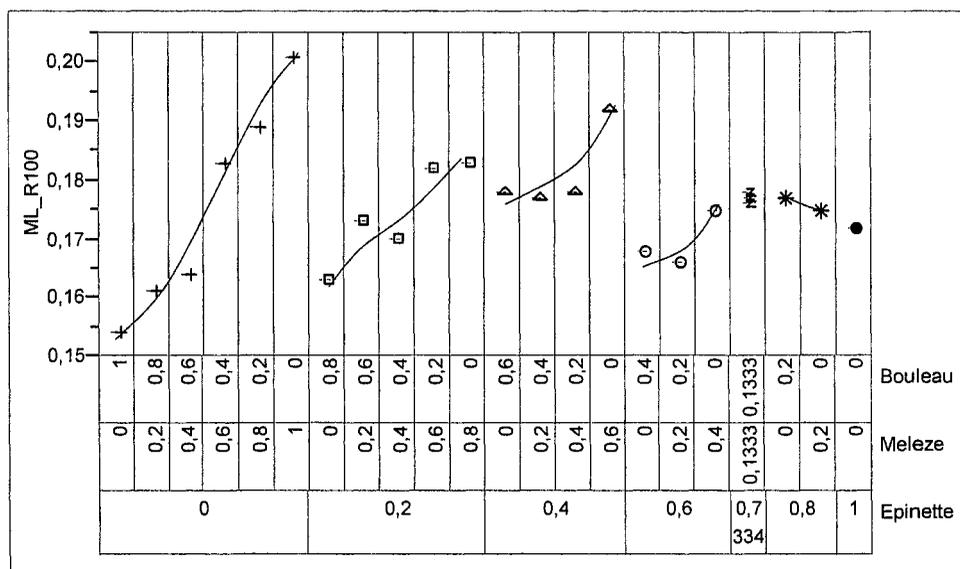


Figure 5-13. Variation de la masse linéique de la fraction R100

### 5.3.3 Volume spécifique hydrodynamique (VSH)

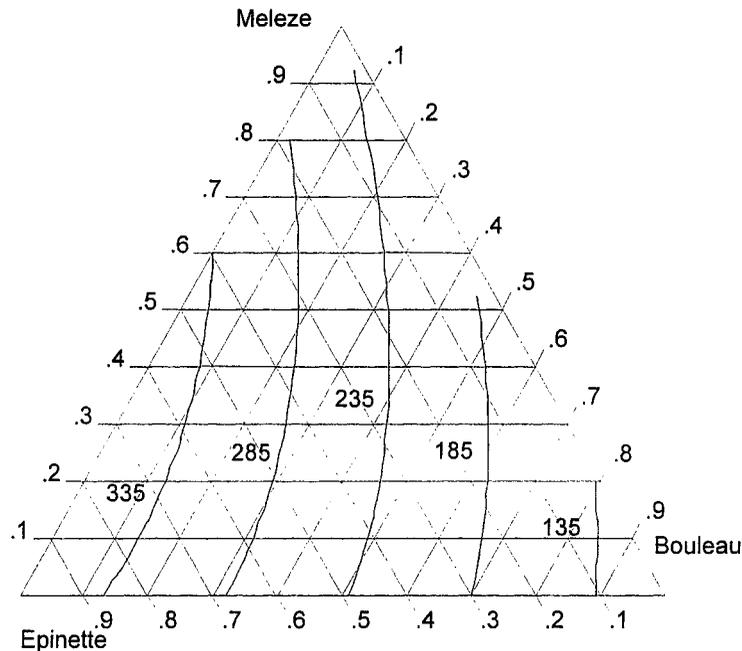


Figure 5-14. Réponse du volume spécifique hydrodynamique

$$\text{VSH} = 369,43E + 237,42M + 107,11B + 190,02M * E$$

Équation 5-8

$$R^2 = 0,98$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,98$$

Tel qu'illustré à la Figure 5-14, à un CSF donné, le VSH des pâtes finales diminue avec l'augmentation du mélèze hybride et du bouleau blanc. Cela nous indique que pendant le co-raffinage, les fibres de mélèze hybride et de bouleau blanc possèdent une pauvre capacité de développement; c'est-à-dire que les copeaux de mélèze hybride et de bouleau blanc nuisent à la fibrillation. Alors, l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc doit demeurer restreinte afin d'obtenir de bonnes propriétés physiques.

De la Figure 5-15, nous constatons qu'il n'y a pas de régularité sur le développement du VSH pour différentes quantités de bouleau blanc. C'est comme s'il y avait un effet synergique sur le VSH. Cependant, tel qu'illustré à la Figure 5-16, le VSH est bien proportionnel aux valeurs individuelles du mélèze hybride et du bouleau blanc lorsque l'épinette noire se retrouve en même quantité dans ce mélange. Le co-raffinage, dans ce



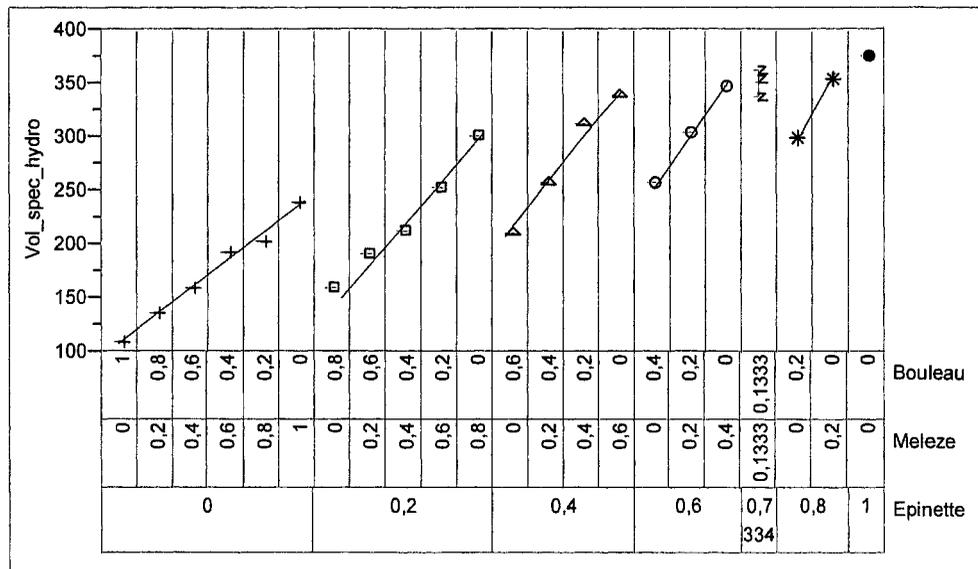


Figure 5-16. Variation du volume spécifique hydrodynamique (2)

## 5.4 Propriétés du papier

### 5.4.1 Densité

La densité est un indice important du papier, car elle permet d'estimer certaines propriétés comme la résistance à la rupture, le module élastique et le coefficient de diffusion de la lumière [55]. Tel qu'illustrée à la Figure 5-17, à un CSF donné, l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc diminue la densité du papier. Comparativement à l'épinette noire, les bois de mélèze hybride et de bouleau blanc possèdent une densité basale plus élevée, donc des fibres plus rigides qui ont tendance à produire une faible densité du papier. Autrement dit, les copeaux mélangés contenant une bonne quantité de bois de densité basale élevée donnent un papier plus bouffant. Ce phénomène a été confirmé par Law et al [51] avec le co-raffinage d'un procédé de mise en pâte PCTM.

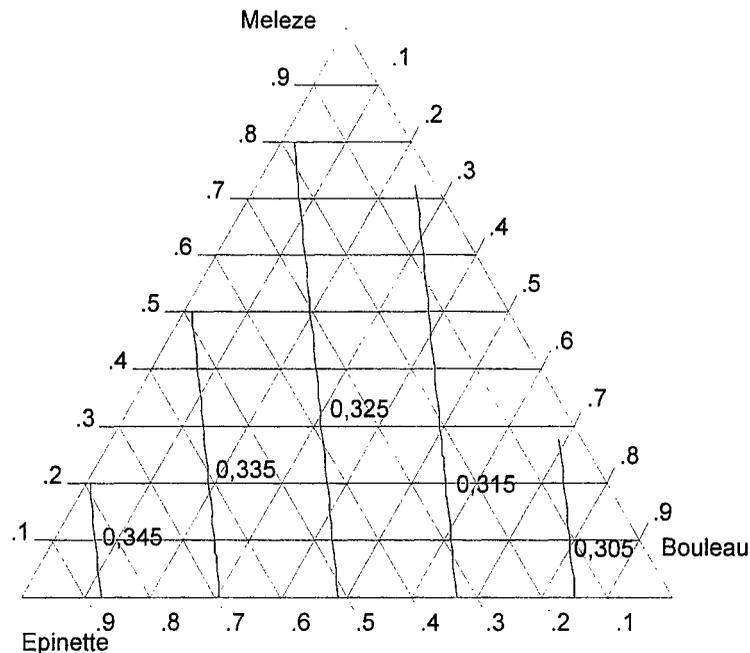


Figure 5-17. Réponse de la densité

$$\text{Densité} = 0,35E + 0,32M + 0,30B$$

Équation 5-9

$$R^2 = 0,70$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,67$$

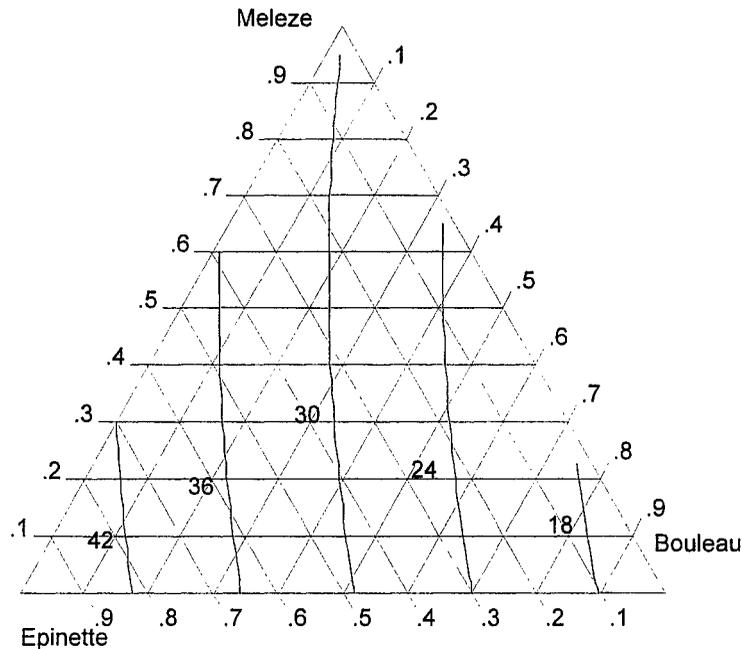
#### 5.4.2 Propriétés physiques

Dans cette partie, nous employons l'indice de rupture, l'indice d'éclatement, l'indice de la déchirure, l'allongement et l'absorption d'énergie de rupture pour analyser l'impact des essences de bois sur ces propriétés pendant le co-raffinage. L'effet du raffinage sur les propriétés pourra donc être révélée.

##### 5.4.2.1 Indice de rupture

La Figure 5-18 montre la réponse de l'indice de rupture. De cette figure, nous constatons que l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc amène une diminution de l'indice de rupture. Parmi les trois essences utilisées, le bouleau blanc apporte le plus bas indice de rupture. Pour une pâte constituée d'une essence pure, ces indices sont de 30,1 N·m/g, 14,8 N·m/g et 48,5 N·m/g pour le mélèze hybride, le bouleau blanc et l'épinette noire

respectivement. Selon cet indice, l'utilisation du bouleau blanc doit être restreinte selon les exigences attendues du papier fabriqué.



**Figure 5-18. Réponse de l'indice de rupture**

$$IR=48,54E+30,14M+14,97B-4,55M*E-4,54B*E-6,10B*M$$

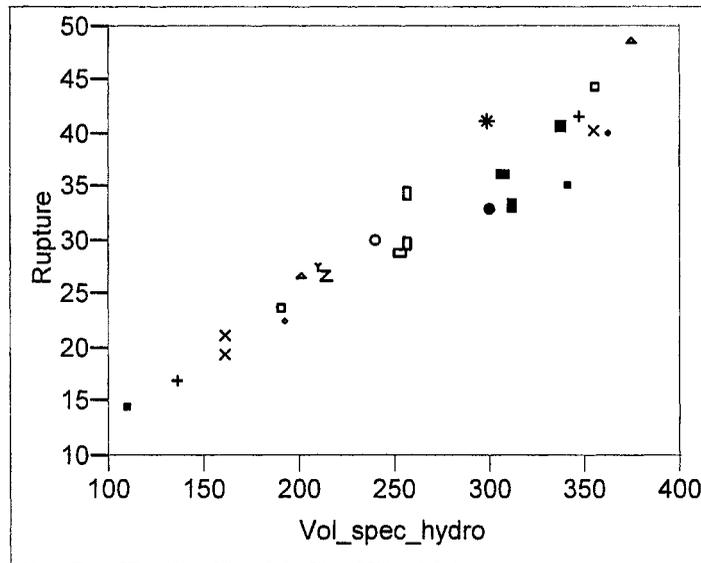
**Équation 5-10**

$$R^2=1,00$$

$$R^2 \text{ ajusté}=1,00$$

**IR : Indice de rupture**

Le mélèze hybride, quant à lui, apporte moins d'influence sur l'indice de rupture même lorsqu'il est introduit en grande quantité dans le mélange; ce qui n'est pas le cas pour le bouleau blanc qui fait chuter la résistance drastiquement. Dans notre travail, si la somme d'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc demeure inférieure à 30%, les indices de rupture des pâtes diminuent d'un maximum de 23% par rapport à celui de la pâte contenant 100% d'épinette noire. Cette diminution n'est pas manifeste et pourrait être tolérée par l'industrie.



**Figure 5-19. Corrélation entre l'indice de rupture et le VSH**

L'indice de rupture dépend principalement de la surface de liaisons. Le VSH reflète le degré de fibrillation des fibres. Le mélèze hybride et le bouleau blanc nuisent à la fibrillation (Figure 5-14). Alors, l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc ne favorise pas le développement de la surface des fibres et n'augmente pas la résistance à la rupture de la pâte. De plus, les pâtes ayant une haute valeur de VSH donnent des papiers plus résistants à l'indice de rupture. La Figure 5-19 montre bien la corrélation entre l'indice de rupture et le VSH. Suivant l'augmentation du VSH, l'indice de rupture des papiers augmente linéairement.

De la Figure 5-20, l'indice de rupture est bien linéairement proportionnel aux valeurs attribuées à chaque essence. Cela nous indique que l'action de raffinage des trois essences sur l'indice de rupture est indépendante de l'action du raffinage lui-même. L'introduction des copeaux et l'utilisation dans différentes proportions des copeaux n'apportent pas un effet synergique sur l'indice de rupture. Probablement que la proportion des copeaux dans le mélange et les essences de bois (peut-être justement limitées à trois) ne sont pas des facteurs influençant l'action du raffinage. Ils n'apportent pas un effet synergique pendant le co-raffinage.



bouleau blanc qui est plus résistant au raffinage et gaspille en quelque sorte l'énergie spécifique de raffinage.

#### 5.4.2.2 Allongement

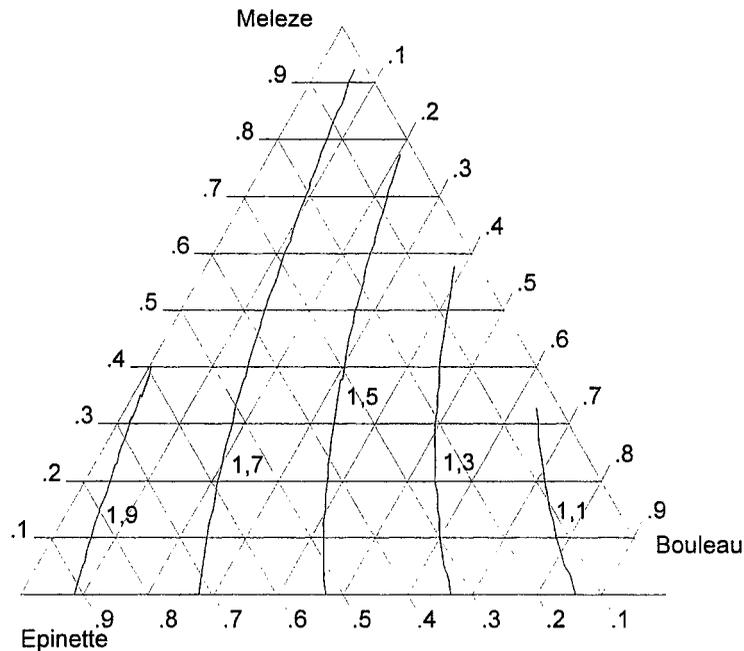


Figure 5-22. Réponse de l'allongement

$$\text{Allongement} = 1,99E + 1,79M + 0,96B - 0,78B * M$$

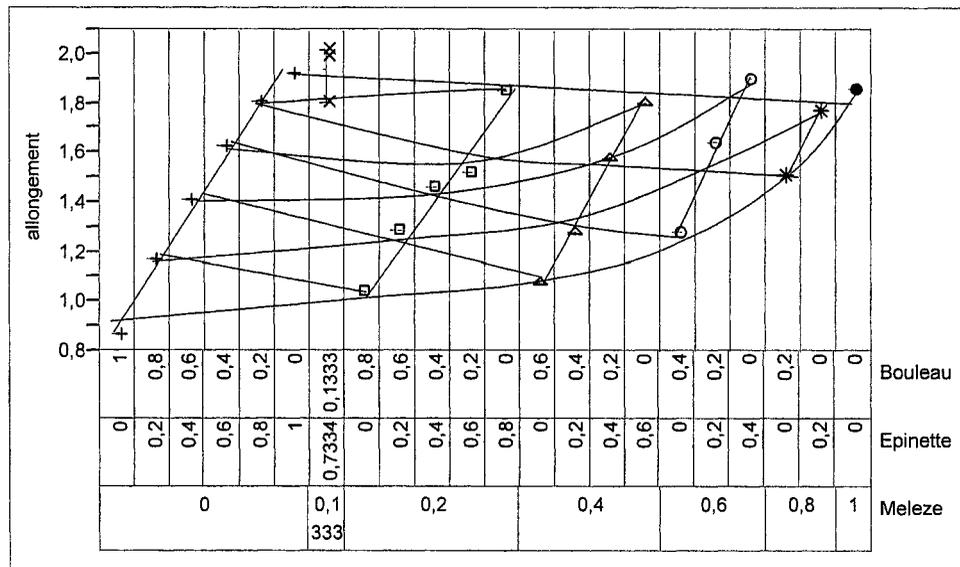
Équation 5-11

$$R^2 = 0,92$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,91$$

Généralement, le papier avec un allongement important est plus ductile et celui qui s'allonge moins bien est plus stable dimensionnellement. Tel qu'illustré à la Figure 5-22, le bouleau blanc confère au papier une faible valeur d'allongement tandis que le mélèze hybride n'amène qu'une influence légère à la baisse sur cette propriété. Lorsque la quantité de mélèze hybride utilisé est constante, l'allongement du papier, dans l'ensemble, diminue linéairement suivant l'augmentation du bouleau blanc. Nous pouvons bien voir ce phénomène à la Figure 5-23. Ainsi, nous pouvons déterminer si l'utilisation d'une certaine quantité de mélèze hybride en co-raffinage avec le bouleau blanc et l'épinette noire présente une action de raffinage indépendante de l'allongement.

Malheureusement, ce phénomène est justement observé dans les mêmes quantités utilisées de mélèze hybride. Dans les différentes quantités utilisées de mélèze hybride, l'action du raffinage sur l'allongement n'est pas très distincte. Probablement qu'il y a un peu d'effet synergique produit pendant le co-raffinage des trois essences. La présence de mélèze hybride devient un facteur qui influence l'effet synergique, ce qui prouve encore une fois que le mélèze hybride est plus actif que les autres deux essences et l'essence de bois est un facteur influençant l'effet synergique.



**Figure 5-23. Variation de l'allongement**

#### 5.4.2.3 Absorption d'énergie à la rupture

Tel qu'illustrée à la Figure 5-24, l'absorption d'énergie à la rupture (AER) diminue lorsque l'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc augmente. Cette diminution est plus marquée avec l'ajout de bouleau, en raison de l'AER qui est défini comme la surface sous la courbe rupture-allongement. Comparé aux figures (Figure 5-18, Figure 5-22), elles possèdent une tendance de développement semblable.

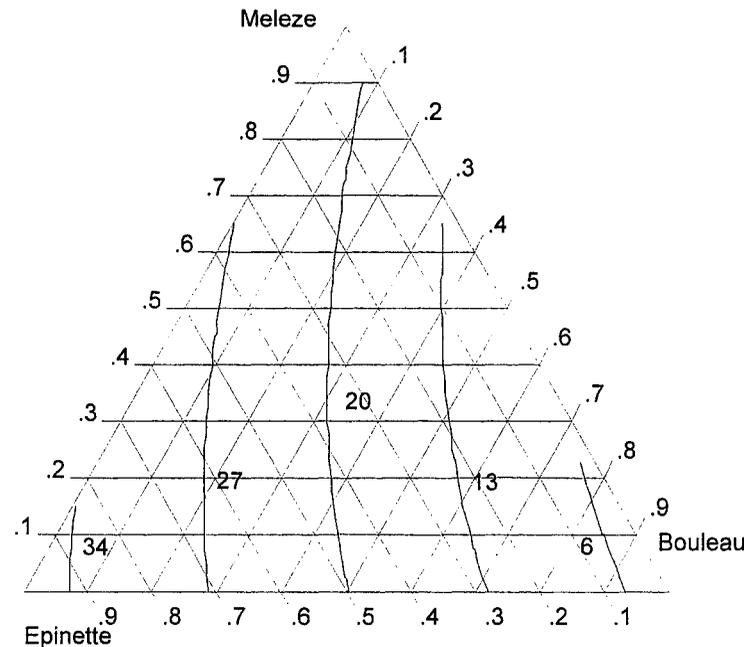


Figure 5-24. Réponse de l'absorption d'énergie à la rupture

$$\text{AER} = 36,29E + 22,24M + 3,95B - 16,69B * M$$

Équation 5-12

$$R^2 = 0,97$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,96$$

**AER : Absorption d'énergie à la rupture**

De la Figure 5-25, nous pouvons voir que lorsque la quantité utilisée de mélèze hybride ou de bouleau blanc est constante, l'AER est linéairement proportionnel à celle des autres essences. Dans ce cas, cela nous indique que le co-raffinage présente une action de raffinage indépendante sur l'AER. Malheureusement, ce phénomène n'est pas bien observé pour les mêmes quantités utilisées d'épinette noire. Dans les domaines où l'utilisation de l'épinette noire est en différentes proportions, il semble y avoir plus ou moins d'effet synergique sur l'AER. La variation d'utilisation de mélèze hybride ou de bouleau blanc apporte une interaction pendant le co-raffinage démontrant que l'essence de bois est un des facteurs qui influencent l'effet synergique.

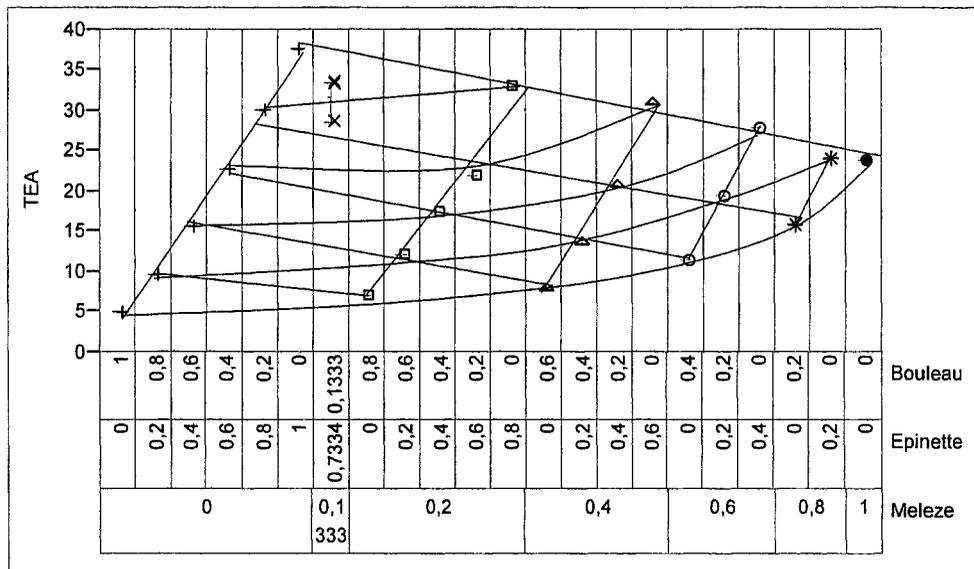


Figure 5-25. Variation de l'AER

#### 5.4.2.4 Indice d'éclatement

La Figure 5-26 nous montre la réponse de l'indice d'éclatement. Selon cette figure, l'indice d'éclatement diminue avec l'augmentation des quantités de mélèze hybride et de bouleau blanc utilisées. Dans notre travail, l'indice d'éclatement de la pâte contenant 100% d'épinette noire ou 100% de mélèze hybride est égale à  $2,86 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$  ou  $1,55 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ , respectivement. Toutefois, la pâte contenant 100% du bouleau blanc est plus faible, soit  $0,53 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ .

De même que l'indice de rupture, l'utilisation du mélèze hybride influence moins grandement l'indice de rupture lorsqu'il est en bonne quantité. Afin de ne pas diminuer excessivement l'indice d'éclatement, l'utilisation du bouleau blanc doit conséquemment être faible. Si la somme de mélèze hybride et de bouleau blanc demeure inférieure à 30%, l'indice d'éclatement des pâtes diminue d'un maximum de 30% par rapport à celui de la pâte contenant 100% d'épinette noire.

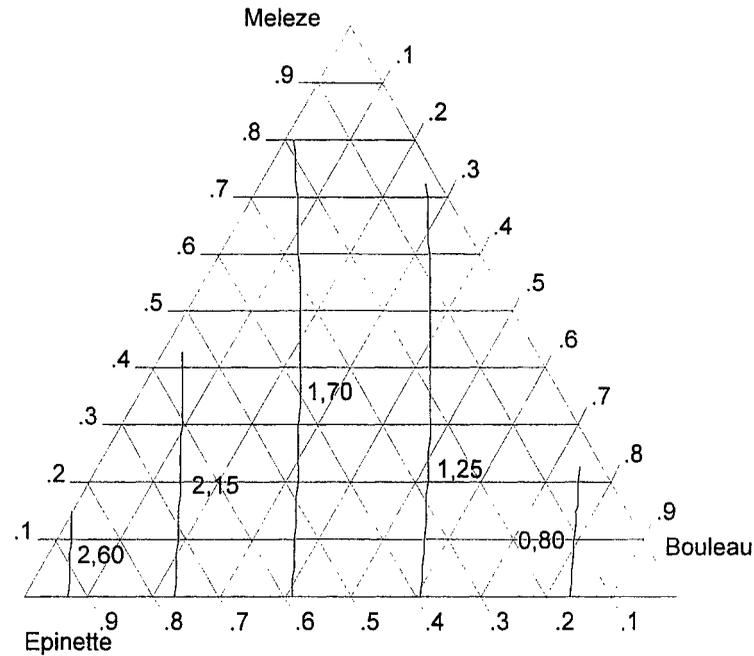


Figure 5-26. Réponse de l'indice d'éclatement

$$IE = 2,80E + 1,47M + 0,53B - 0,69B \cdot E$$

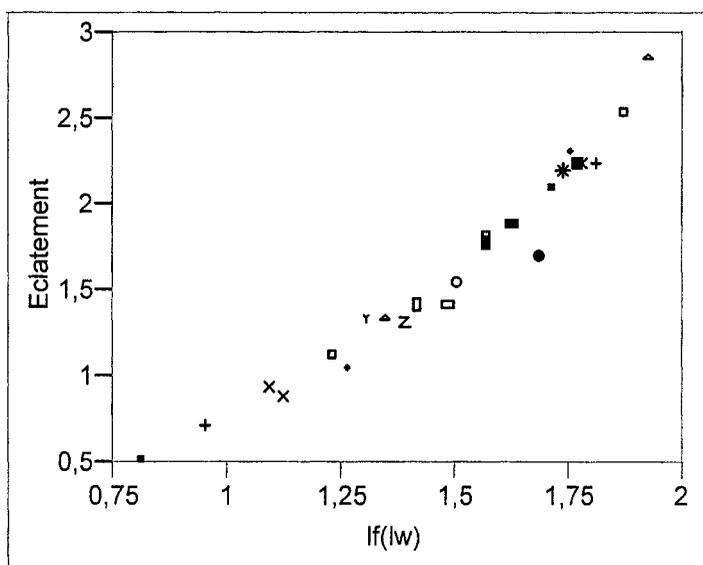
Équation 5-13

$$R^2 = 0,99$$

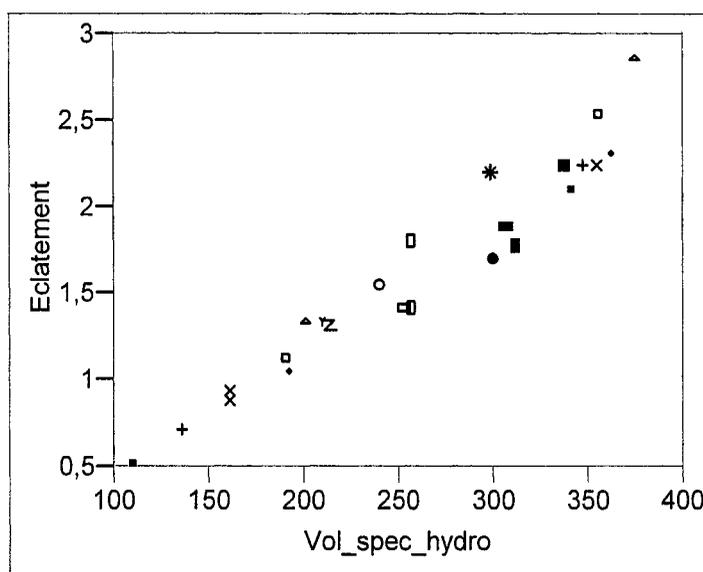
$$R^2 \text{ ajusté} = 0,99$$

**IE : Indice d'éclatement**

Normalement, l'indice d'éclatement dépend de la longueur de fibre et des liaisons inter fibres. Les pâtes possédant de plus longues fibres et un VSH élevé donnent un papier ayant un indice d'éclatement élevé. La Figure 5-27 et la Figure 5-28 reflètent bien ces relations.



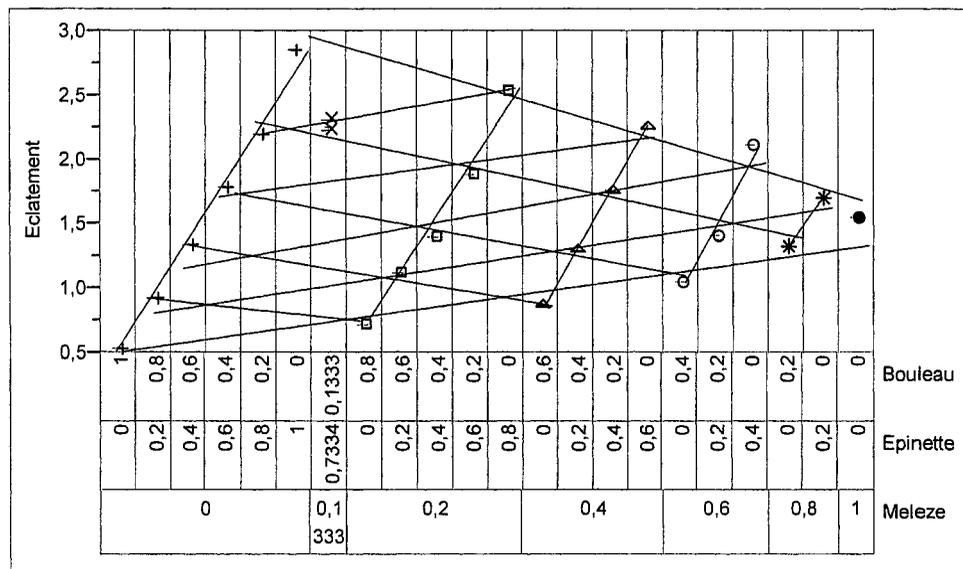
**Figure 5-27. Corrélation entre l'indice d'éclatement et la longueur des fibres**



**Figure 5-28. Corrélation entre l'indice d'éclatement et le VSH**

Dans l'ensemble, la Figure 5-29 montre que l'indice d'éclatement est proportionnel aux valeurs prises individuellement pour chaque essence. Cela nous indique encore une fois que l'action du raffinage conjoint des trois essences sur l'indice d'éclatement est indépendante de l'action du raffinage lui-même. Il n'y a pas d'effet synergique introduit sur cette propriété pendant le co-raffinage. L'utilisation d'un mélange de copeaux ne

produit pas d'interaction pendant le co-raffinage. Le résultat final de l'indice d'éclatement lors d'un co-raffinage montre une influence proportionnelle à la proportion des copeaux de chaque essence dans le mélange.



**Figure 5-29. Variation de l'indice d'éclatement**

#### 5.4.2.5 Indice de déchirure

Comme l'indique la Figure 5-30, nous constatons que le mélèze hybride et le bouleau blanc apportent une diminution de l'indice de déchirure. Comme avec l'indice de rupture et l'indice d'éclatement, le bouleau blanc diminue de beaucoup l'indice de déchirure tandis que le mélèze hybride influence moins grandement pour une quantité utilisée relativement grande. Lorsque la somme de mélèze hybride et de bouleau blanc est contrôlée sous les 30%, les pâtes obtenues diminuent d'un maximum de 23% d'indice de déchirure par rapport à celui de la pâte contenant 100% d'épinette noire.

Ce même principe s'applique pour l'indice de déchirure qui est fonction du degré de liaison inter-fibres et de la longueur des fibres. Les pâtes possédant les plus longues fibres et un VSH élevé donnent les papiers avec les plus hauts indices de déchirure.

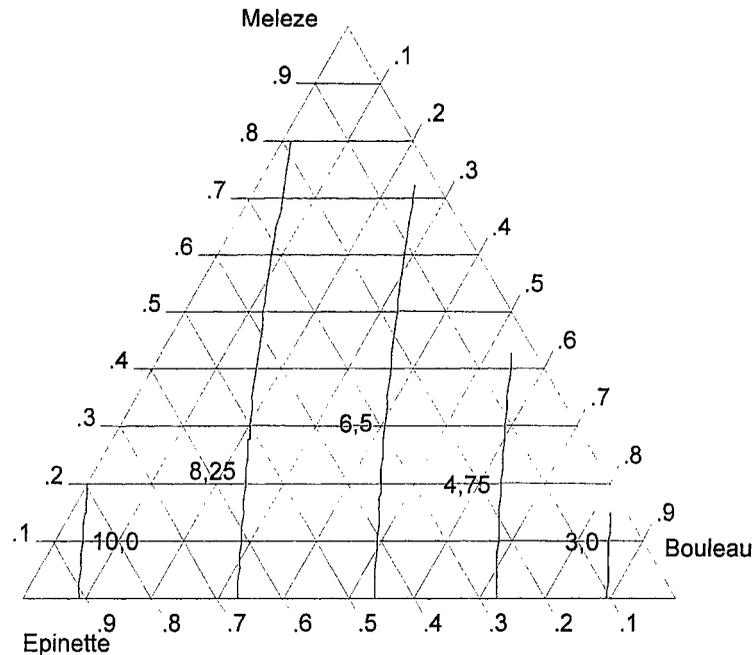


Figure 5-30. Réponse de l'indice de déchirure

$$ID=10,56E+7,84M+1,85B-4,55M^*E+2,64B^*E$$

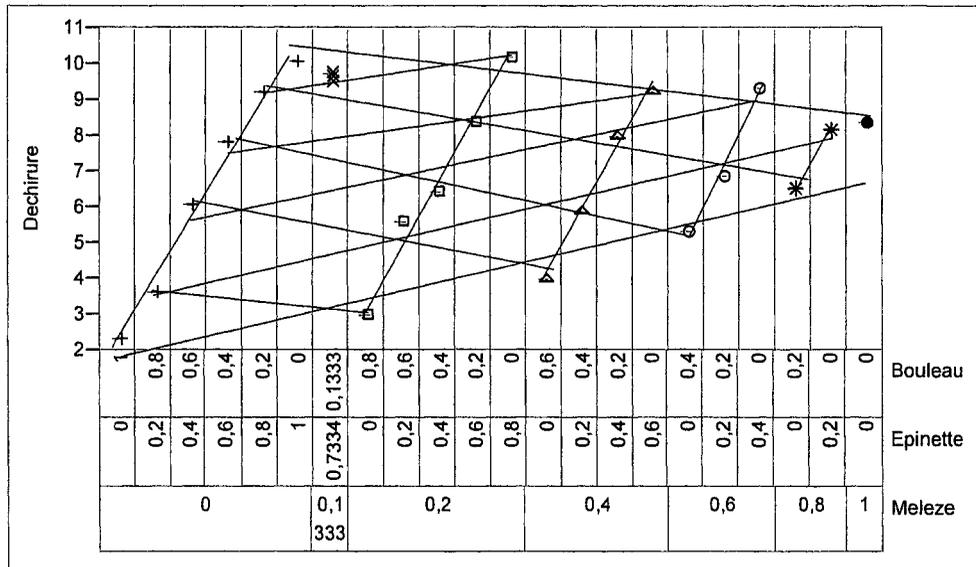
Équation 5-14

$$R^2=0,98$$

$$R^2 \text{ ajusté}=0,98$$

**ID : Indice de déchirure**

De même que l'indice de rupture et l'indice d'éclatement, nous constatons que l'indice de déchirure est, dans l'ensemble, linéairement proportionnel aux valeurs de chaque essence prise séparément (Figure 5-31). C'est-à-dire que l'action du raffinage des trois essences sur l'indice de la déchirure obéit indépendamment de l'action du raffinage lui-même. L'effet synergique n'est pas présent. Encore une fois, cela nous indique que l'introduction des copeaux et l'utilisation de différentes proportions dans le mélange ne sont pas les facteurs qui influencent le co-raffinage.



**Figure 5-31. Variation de l'indice de déchirure**

### 5.4.3 Propriétés optiques

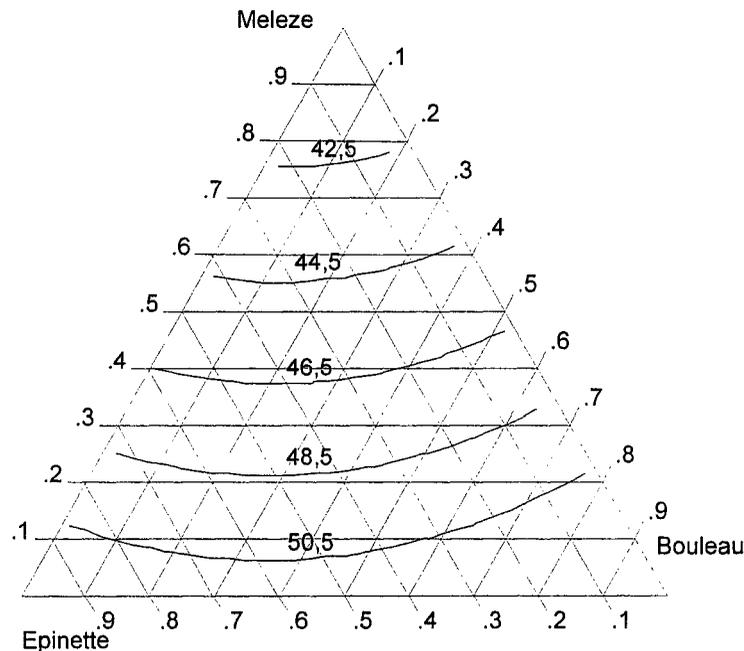
Dans cette partie, nous estimons des propriétés optiques comprenant la blancheur, l'opacité, le coefficient de diffusion de la lumière et le coefficient d'absorption de la lumière.

#### 5.4.3.1 Blancheur

La blancheur est l'une des propriétés optiques les plus importantes pour la pâte. Elle est déterminée lorsque le papier est placé sous une lumière bleue à 457 nanomètres. La blancheur dépend principalement de la nature des fibres et de la couleur naturelle des essences.

La Figure 5-32 montre la réponse de la blancheur. Les niveaux de blancheur des pâtes contenant 100% d'essence de bois sont : 40,5 %ISO pour le mélèze hybride, 52,4 %ISO pour l'épinette noire et 55,3 %ISO pour le bouleau blanc. La blancheur obtenue pour le mélèze hybride est très basse; ce qui nuit évidemment à la blancheur du papier produit. Le bois de mélèze est plus coloré que les deux autres essences étudiées et sa teneur élevée en matières extractibles donne une piètre blancheur. Il doit donc être présent en

faible quantité dans le mélange de copeaux. Toutefois, l'utilisation du bouleau blanc améliore la blancheur du papier étant donnée sa couleur naturelle. De la même figure, si nous maintenons une quantité supérieure à 80% d'épinette noire, la blancheur devient supérieure à 50 %ISO.



**Figure 5-32. Réponse du niveau de blancheur**

$$\text{Blancheur} = 52,64E + 40,52M + 54,69B - 5,33M * E - 8,74B * E - 5,92B * M \quad \text{Équation 5-15}$$

$$R^2 = 0,98$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,97$$

Aussi, nous constatons que la baisse de blancheur causée par l'ajout de mélèze hybride est presque parallèle à la proportion d'utilisation du mélèze hybride. Dans le cas où la somme de l'utilisation du mélèze hybride est fixée, le niveau de blancheur ne varie pas beaucoup suivant la variation de la proportion du bouleau blanc et de l'épinette noire. Ainsi, une certaine quantité de mélèze hybride permet d'accroître la quantité en bouleau blanc afin de ne pas trop abaisser la blancheur tout en évitant d'altérer les propriétés physiques désirées.

### 5.4.3.2 Opacité

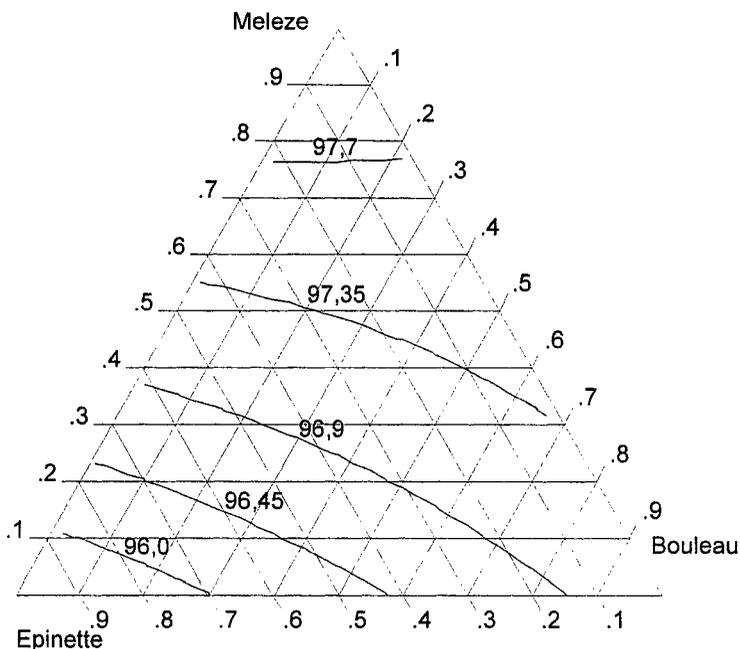


Figure 5-33. Réponse de l'opacité

$$\text{Opacité} = 95,51E + 97,87M + 97,14B + 2,18M * E$$

Équation 5-16

$$R^2 = 0,92$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,91$$

En comparant avec les pâtes chimiques, les pâtes mécaniques et tout particulièrement les pâtes PTM possèdent une haute opacité. Tel qu'illustré à la Figure 5-33, le mélèze hybride et le bouleau blanc amènent une bonne opacité du papier. Le mélèze hybride exerce une plus grande influence sur cette propriété optique que le bouleau.

### 5.4.3.3 Coefficient de diffusion de la lumière

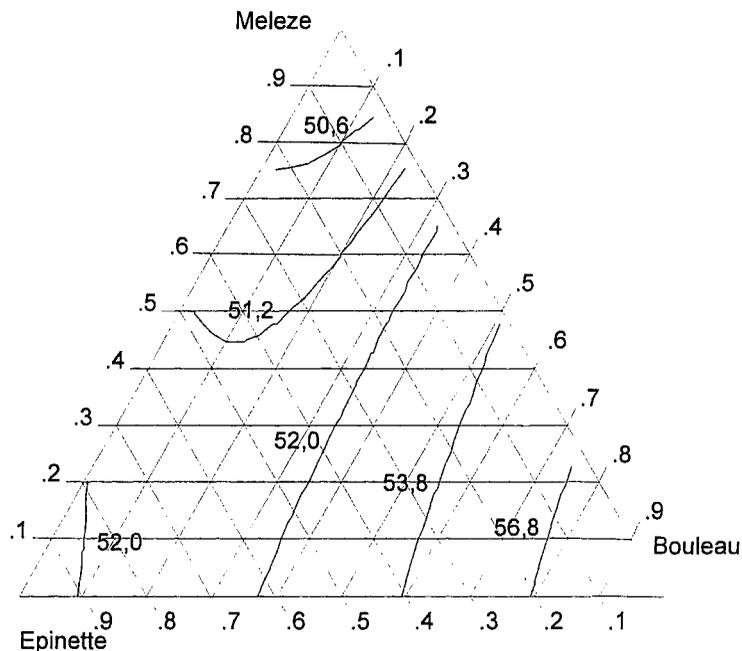


Figure 5-34. Réponse du coefficient de diffusion

$$\text{Coef\_diff} = 52,56E + 49,98M + 61,21B - 16,17B * E - 7,50B * M$$

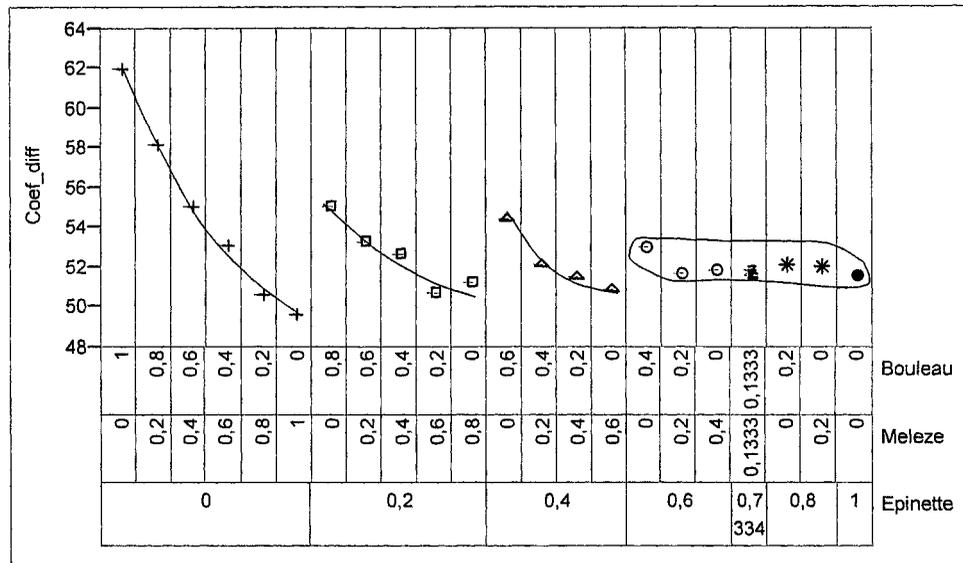
Équation 5-17

$$R^2 = 0,95$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,93$$

**Coef\_diff** : Coefficient de diffusion de la lumière

La Figure 5-34 montre la réponse du coefficient de diffusion de la lumière. De cette figure, le mélèze hybride n'amène pas beaucoup de changement au coefficient de diffusion sinon une faible réduction de cette propriété. Cependant, le bouleau blanc en quantité importante augmente significativement le coefficient de diffusion; les cellules de bouleau étant composées de fibres, de vaisseaux et de parenchymes. Les cellules de parenchymes sont plus petites que les autres cellules. Au cours de la formation du papier, ces cellules servent principalement d'agent de remplissage entre les fibres et les fines. À cause de la haute surface spécifique, les fines donne un papier ayant un bon coefficient de diffusion. Ainsi, le papier du bouleau blanc possède un plus haut coefficient de diffusion que le papier fabriqué à partir des deux autres essences.



**Figure 5-35. Variation du coefficient de diffusion**

De la Figure 5-35, nous constatons que l'amplitude de la variation du coefficient de diffusion n'est pas importante lorsque l'épinette noire s'y trouve en grande quantité. Dans ce cas, le co-raffinage de ces trois essences produit une interaction. Ce phénomène indique une fois de plus qu'il y a présence d'un effet synergique sur le coefficient de diffusion pendant le co-raffinage.

#### 5.4.3.4 Coefficient d'absorption de la lumière

Le coefficient d'absorption de la lumière est une mesure de la capacité des composantes chimiques des fibres d'absorber de la lumière. Ainsi, une bonne blancheur confère au papier un bas coefficient d'absorption. Tel qu'illustrée à la Figure 5-36, le mélèze hybride apporte une augmentation de coefficient d'absorption tandis que le bouleau blanc diminue le coefficient d'absorption. Comme s'était le cas pour la blancheur (Figure 5-32), leurs valeurs sont presque parallèles à la proportion utilisée de mélèze hybride sauf que la blancheur diminue et le coefficient d'absorption augmente suivant l'augmentation de la proportion de mélèze hybride.

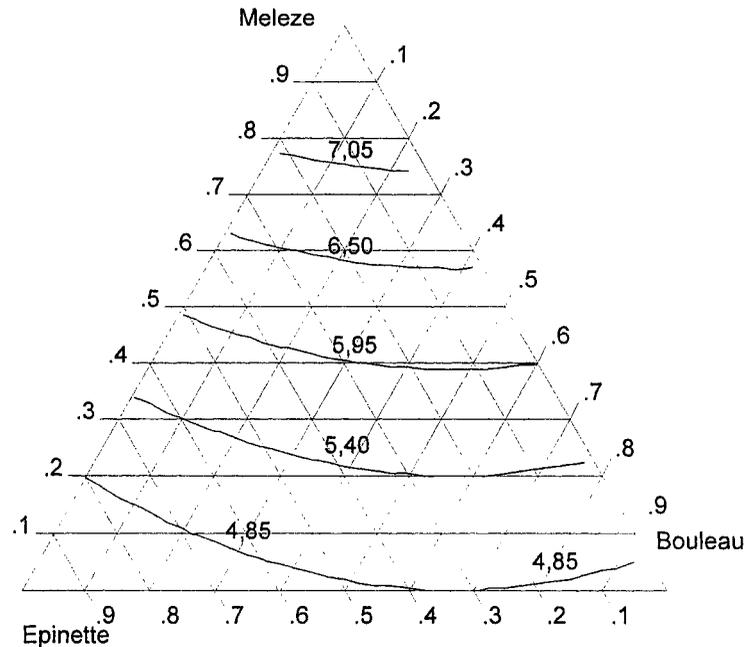


Figure 5-36. Réponse du coefficient d'absorption

$$\text{Coef\_abs} = 4,11E + 7,89M + 4,67B + 1,65B * M$$

Équation 5-18

$$R^2 = 0,96$$

$$R^2 \text{ ajusté} = 0,95$$

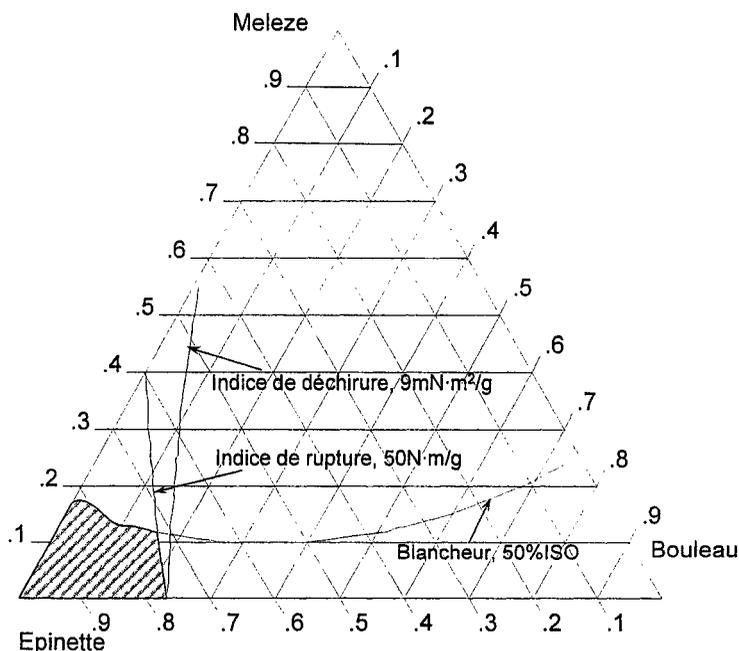
Coef\_abs : Coefficient d'absorption de la lumière

### 5.5 Potentiel d'utilisation

Nous constatons que l'utilisation conjointe de l'épinette noire en quantité relativement grande avec le mélèze hybride et le bouleau blanc n'apporte pas de changements significatifs sur la CES (Figure 5-1), juste de 8,75 MJ/kg à 9,0 MJ/kg. L'existence d'une région spécifique, là où une bonne quantité de mélèze hybride et de bouleau blanc est incorporé au mélange, montre l'absence de variation significative sur la CES. Malheureusement, cela est limité autant par les propriétés physiques que les propriétés optiques (surtout dans le cas de la blancheur). D'après l'analyse des propriétés, nous pouvons connaître la quantité optimale de mélèze hybride et de bouleau blanc. Cette valeur, limitée par les propriétés physiques et les propriétés optiques (surtout la

blancheur), la proportion correspondant au mélèze hybride et au bouleau blanc ne doit pas dépasser 20 à 30%.

Tel qu'illustré à la Figure 5-37, si nous prenons l'indice de rupture de 50 N·m/g, l'indice de déchireur de 9 mN·m<sup>2</sup>/g et la blancheur de 50 %ISO, à l'aide de l'analyse du logiciel de JMP, nous pouvons obtenir une région ombrée. Quand l'utilisation de mélèze hybride et de bouleau blanc se maintient dans cette région ombrée, l'indice de rupture, l'indice de déchireur et la blancheur du papier seront supérieur à 50 N·m/g, 9 mN·m<sup>2</sup>/g et 50 %ISO respectivement. De même, de la figure, nous pouvons déterminer la somme maximum d'utilisation de mélèze et de bouleau blanc est presque égale à 30%. Quand il n'y a pas d'utilisation de mélèze hybride ou de bouleau blanc, la somme utilisée exceptant l'épinette noire est d'environ 20%, ce qui confirme ce qui a été démontré précédemment. Ainsi, nous pouvons dire que l'utilisation de mélèze hybride et de bouleau blanc est possible, la somme d'utilisation de ces deux essences doit être conservée dans cette région.



**Figure 5-37. Possibilité d'utilisation des essences**

Cependant, quant à la proportion exacte des deux, elle est difficile à définir parce que les essences de bois ont une influence différente sur les propriétés et que les usines ont des demandes diverses en termes de propriétés. Comparativement au bouleau blanc, le mélèze hybride affecte moins les propriétés physiques mais plus fortement la blancheur; qui peut être améliorée par l'ajout de bouleau blanc. Si nous voulons obtenir des pâtes ayant de bonnes propriétés physiques, nous devons sacrifier un certain niveau de blancheur. Ainsi, nous avons besoin de faire un compromis entre les propriétés physiques et optiques. Pour élaborer le meilleur mélange possible d'essences de bois (épinette noire, bouleau blanc et mélèze hybride), il importe que chaque usine de pâtes et papiers analyse concrètement sa situation selon ses besoins et ses exigences.

## Chapitre 6 - Conclusions

- De l'analyse des résultats et l'analyse de la possibilité, nous constatons qu'il est possible d'utiliser le mélèze et le bouleau. Sous une quantité utilisée relativement large, le co-raffinage avec le mélèze et le bouleau n'apporte pas de variation significative sur la CSE, de 8,75 MJ/kg à 9,0 MJ/kg. L'utilisation de mélèze et de bouleau, d'une part, pourrait adoucir l'insuffisance de matières premières. D'autre part, en terme de consommation énergétique, elle n'apporte pas d'augmentation du coût de production finale.
- L'utilisation du mélèze hybride et du bouleau blanc apporte une influence différente sur les propriétés physiques et sur le niveau de blancheur. Le mélèze hybride affecte moins les propriétés physiques mais nuit plus à la blancheur que le bouleau blanc. Le choix des proportions des deux essences doit se baser sur un compromis. En contrôlant la somme de mélèze hybride et de bouleau blanc dans le mélange final sous un pourcentage de 20 à 30%, les pâtes obtenues diminuent d'un maximum de 23% d'indice de rupture, de 30% d'indice d'éclatement et de 23% d'indice de la déchirure par rapport à ceux de la pâte contenant 100% d'épinette noire. Cependant, le niveau de blancheur des pâtes finales pourrait être maintenu au-dessus de 50 %ISO.
- En raison d'une densité élevée, d'une faible longueur des fibres, d'une grande épaisseur de la paroi et d'un petit diamètre, le bouleau est plus résistant au raffinage donc requiert une haute CES et apporte une basse masse linéique. Pendant le co-raffinage, les fibres de bouleau blanc possèdent une plus pauvre capacité au développement, elles nuisent à la fibrillation. Le bouleau donne des pâtes ayant une résistance mécanique plus faible. Les fines du bouleau contiennent beaucoup de fragments non-fibrillés ayant une pauvre capacité à renforcer les liaisons inter-fibres mais confèrent au papier un haut coefficient de diffusion.

- Les fibres de mélèze possèdent une longueur des fibres élevée et une grande épaisseur de paroi donc sont plus rigides. Pendant le co-raffinage, le mélèze nuit aussi à la fibrillation. Comparé au bouleau, une essence contenant une haute teneur en fibres courtes, le mélèze affecte moins la longueur des fibres et les propriétés physiques. Cependant, il nuit plus à la blancheur. La présence du mélèze induit un effet synergique sur des propriétés, elle devient un facteur important lors du co-raffinage.
- Pendant le co-raffinage, la présence d'essences différentes, spécialement à cause de leur différente morphologie, il y a un certain effet synergique qui est introduit sur la consommation d'énergie spécifique, le taux de rejets, la longueur des fibres, la masse linéique, l'allongement, l'absorption d'énergie à la rupture et le coefficient de diffusion. Toutefois, il n'y a pas d'effet synergique sur l'indice de rupture, l'indice d'éclatement et l'indice de déchirure. Parmi les facteurs influençant l'effet synergique pendant le co-raffinage, l'essence de bois est le facteur le plus important. En même temps, sur des propriétés, le niveau d'effet synergique n'est pas pareil suivant la variation des proportions d'essence composant le mélange. Ainsi, la proportion d'essences est probablement également un facteur non négligeable influençant l'effet synergique. Dans notre travail, le mélèze est le facteur le plus actif pour produire un effet synergique. En plus, l'effet abrasif d'un feuillu dense (le bouleau) peut également induire un effet synergique.
- L'analyse des résultats nous montre qu'il y a d'effet synergique en regard des propriétés. La comparaison de la CES entre les pâtes co-raffinées et les pâtes mélangées après le raffinage permet de le vérifier. Si nous pouvions comparer les propriétés des pâtes obtenues en mélange de pâtes raffinées individuellement à nos résultats de co-raffinage, nous pourrions probablement mieux comprendre l'action du co-raffinage sur les effets synergiques. Les propriétés des pâtes obtenues des pâtes mélangées après le raffinage ne sont simplement pas égales à la somme des propriétés selon la proportion des pâtes individuelles après le

raffinage. Pendant le travail, nous n'avons pas fait les propriétés des pâtes mélangées après le raffinage, et ne pouvons donc malheureusement pas faire la comparaison entre les propriétés des pâtes co-raffinées et les propriétés des pâtes mélangées après le raffinage. Cette comparaison serait probablement d'un certain intérêt pour un prochain travail.

## Bibliographie

- 1 Rouleau, D., "L'industrie des Pâtes et Papiers au Québec, un Bilan", Les Papetières du Québec, Mars/Avril: 8-12 (2004).
- 2 <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques.jsp>
- 3 Hakkila, P., Nikki, M. and Palenius, I., "Suitability of Larch as Pulpwood for Finland", Paperi Ja Puu, No. 2: 41-58 (1972).
- 4 Beaulieu, G., "Le mélèze", Forêt Conservation, 14-19 (Juin, 1982).
- 5 Isebrands, J.G., Einspahr, D.W., Phelps, J.E. and Crist, J.B., "Kraft Pulp and Paper Properties of Juvenile Hybrid Larch Grown under Intensive Culture", Tappi Journal, 65(9): 122-126 (1982).
- 6 Einspahr, D.W., Mcdonough, T.J. and Joachimides, T., "Kraft Pulping Characteristics of European, Japanese, and European X Japanese Larch Hybrids", Tappi Journal, 66(8): 72-76 (1983).
- 7 Gagnon, P.F., "Determination of the Papermaking Potential of Hybrid Larch: Lab-scale and Mill Trials", Pulp and Paper Canada, 100(3): 62-66 (1999).
- 8 Lanouette, R., Valade, J.L., Gagnon, P.F. and Law, K-N., "Effect of the Introduction of Hybrid Larch within the Jack Pine / Spruce Mixture Used in Kraft Pulping", 1998 Tappi proceedings, pulping conference, book 2: 975-981 (1998).
- 9 Hatton, J.V., Hunt, K., GEE, W.Y. and Johal, S.S., "Kraft and Mechanical Pulps from softwood Commercial Thinnings", Tappi pulping conference 1996 : 499-513 (1996).
- 10 Law, K., Valade, J.L., and Daneault, C., "Utilisation du mélèze dans la fabrication des pâtes à haut rendements", Prétirés Conférence Technologique Estivale 1986 (Pointe-au-Pic, Québec), 73-80 (5-6, Juin, 1986).

- 
- 11 Law, K., Valade, J.L., and Daneault, C., "Pâtes Mécaniques de Mélèze RMP-CRMP-TMP-CTMP Propriétés", *Revue ATIP*, 41(4): 187-192 (April, 1987).
  - 12 Law, K.N., Valade, J.L., and Lapointe, M., "Mechanical Pulping (RMP and TMP) of Young Larches", *Cellulose Chemistry and Technology*, 25(1/2): 41-47 (1991).
  - 13 Valade, J.L., "The Potential Use of Larch in the Canadian Pulp and Paper Industry: A Review", *Pulp and Paper Canada*, 99(12): 156-159 (1998).
  - 14 Statistics Canada, "Canadian Forestry Statistics 1995", Minister of Industry, Catalogue no. 25-202-XPB, pp.4 (July, 1998).
  - 15 Eöhmer, E., "The Production and Use of Mechanical and Chemimechanical Pulps", *International Mechanical Pulping Conference 1985*: 5-18 (1985)
  - 16 Hu, Shouzu, "Development of High yield Pulping", '97 Nanjing International Symposium on High Yield Pulping Proceedings: 1-16, Chinese Academy of Forestry (1997).
  - 17 Sundholm, J., "Mechanical Pulping", *Papermaking Science and Technology*, Book 5(1999).
  - 18 Karnis, A., "The Mechanism of Fiber Development in Mechanical Pulping", *Journal of Pulp and Paper Science*, 20(10): 280-288 (1994).
  - 19 Petit-Conil, M., Robert, A. and Pierrard, J. M., "Fundamental Principles of Mechanical Pulping from Softwoods and Hardwoods", *Cellulose Chemistry and Technology*, 31(1-2): 93-104 (1997).
  - 20 Mackie, D. M. and Taylor, J. S., "Review of the Production and Properties of Alphabet Pulps", *Pulp and Paper Canada*, 89(2): 58-66 (1988).

- 
- 21 Stationwala, M. I. and Karnis, A., "Pulp Grinding - a New Method for Producing Mechanical Pulp", *Tappi Journal*. 73(12): 187-195 (1990).
  - 22 Argger, H., "RTS Brings a New Intensity to TMP", *Pulp and Paper Europe*, 2(6): 16-19 (1997).
  - 23 Heinrich Münster, Humbert Köfler, "Latest Development in Mechanical Pulping", '97 Nanjing International Symposium on High Yield Pulping Proceedings: 217-225, Chinese Academy of Forestry (1997).
  - 24 Lanouette, R., "Pâtes Mécaniques (ou Fabrication des Pâtes)", Notes de cours et recueil de publications, Département de génie chimique / «pâtes et papiers», Université du Québec à Trois-Rivières, Canada (Hiver, 2004).
  - 25 Jackson, M., "The Interaction of Wood Species and Wood Quality with the TMP process - A Review", 1998 Tappi Processions, Pulping Conference, Book 1, Tappi Press, 455-465 (1998).
  - 26 Brill J.W., "Effects of Wood and Chip Quality on TMP Properties", *International Mechanical Pulping Conference 1985*: 153-161 (1985)
  - 27 Reme, P.A., and Helle, T., "Quantitative Assessment of Mechanical Fibre Dimensions during Defibration and Fibre Development", *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(1):1-6 (2001).
  - 28 Laliberté, D., Shallhorn, P.M. and Karnis, A., "Comparison of TMP and CTMP Properties from Spruce and Pine Sawmill Chips", *Pulp and Paper Canada*, 88(3): 94-100 (1987).
  - 29 Corson, R.S., "The Mechanics of Making Better Pulp with Less Energy", *Pulp and paper International*, 39(5): 61-65 (1997).

- 
- 30 Canada Ministère des Forêts, “Arbres Indigènes du Canada”, (1961).
- 31 Beaulieu, G., “Le mélèze”, Forêt Conservation, 14-19 (Juin, 1982).
- 32 Kubes, G. and Swan, H.S.D., “The Availability and Suitability of Larch as Pulpwood - Its Extractives and their Uses”, Pulp and Paper Research Institute of Canada, Laboratory report No. 287 (1974).
- 33 Balatinecz, J.J., “Properties and Utilisation of Larch Grown in Canada - An Overview”, Larch Symposium - Potential for the future, Toronto, Canada (1983).
- 34 Hansmann, A. and Sugden, E.A.N., “The Chemistry and Kraft Pulping of Larch”, Ontario Research Foundation, Canada (1983).
- 35 Graham, C.M., Farintosh, H.L. and Graham, B.J., “Larch Symposium Potential for the Future”, Proceedings of a symposium sponsored by the Ontario Ministry of Natural Resources and the Faculty of Forestry, University of Toronto, Toronto, Ontario, November 9, 1982: 65-167 (March, 1983).
- 36 Nevalainen, K. and Hosia, M., “The Suitability of Larch as Fibre Raw Material, Part I: Larch and its Properties”, *Paperi Ja Puu*, 51(5): 433-438 (1969).
- 37 Isenberg, I.H., “Pulpwood of the United States and Canada”, Vol. 1, *Connifers*, p. 219, *Inst. Pap. Chem.*, Appleton. (1980).
- 38 Lanouette, R., Valade, J.L., Gagnon, P.F. et Law, K-N., “Optimisation des Conditions de Cuisson Kraft de Mélèze hybride (*Larix eurolepis Henry*)”, *Prétirés Conférence Technologique Estivale 1998 (Château Frontenac, Québec)*, 81-86 (3-5, Juin, 1998).
- 39 Nevalainen, K., Hosia, M., “The Suitability of Larch as Fibre Raw Material, Part II: Larch as Fibre Raw Material”, *Paperi Ja Puu*, 51(6): 503-510 (1969).

- 
- 40 Giwa, S.A.O., Swan, E.P., “Heartwood Extractive of a Western Larch Tree (*Larix occidentalis nutt.*)”, *Wood and Fibre*, 7(3): 216-221 (1975).
- 41 Valade, J.L., Law, K.-N. and Mondor, D., “From Kraft to Ultra-High Yield Sulfite Pulps of Larch - An Interaction with Black Spruce”, *International Sulfite Pulping Conference*: 95-103 (1989).
- 42 Valade, J.L., Law, K.N. and Lanouette, R., “Upgrading Softwood CTMP by the Use of Hardwood”, *Pulp and paper Canada*, 94(4): 28-36 (1993).
- 43 Macleod, J.M., “Kraft Pulps from Canadian Wood Species”, *Pulp and Paper Canada*, 87(1): 76-81 (1986).
- 44 Gurnagul, N., Page, D.H. and Seth, R.S., “Dry Sheet Properties of Canadian Hardwood Kraft Pulps”, *Journal of Pulp and Paper Science*, 16(1): J36-J41 (1990).
- 45 Koran, Z., “Thermomechanical Pulp Properties of White Birch”, *Wood and Fiber Science*, 27(2): 98-104 (April, 1995).
- 46 Giertz, H.W., “Basic Wood Material Properties and their Significance in Mechanical Pulping”, *International Mechanical Pulping Conference*, Helsinki, 1977, volume V: 37-51 (1977)
- 47 Law, K-N., Lanouette, R. and Yang, K.C., “Effect of Compression on Refining Energy and Pulp Properties of Birch TMP”, *Appital Journal*, 53(4): 296-299, (June, 2000).
- 48 Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, C. and Wold, S., “Mixture design”, *Design of Experiments - Principles and Application*, p.229-238, Umetrics Academy (2000).

- 
- 49 Marton, R. and Robie, J. D., "Characterization of Mechanical Pulps by a Settling Technique", *Tappi Journal*, 52(12): 2400-2406 (1969).
  - 50 Luukko, K., "Fines Quantity and Quality in Controlling Pulp and Paper Quality", 1999 International Mechanical Pulping Conference, 67-75 (1999).
  - 51 Law, K.-N., Lanouette, R. and Valade, J. L., "Properties of CTMP from Mixtures of Aspen, Birch and Maple", *Pulp and Paper Canada*, 100(12): 117-122 (1999).
  - 52 Proulx, R. et Valade, J.L., "Les Caractéristiques d'un Raffinage en Mélanges de Sapin / Épinette et de Bouleau Blanc", Conférence Technologique Estivale 1990 (Pointe-au-Pic, Québec), 59-69 (31 Mai-1er Juin, 1990).
  - 53 Johal, S. S. and Hatton, J. V., "Chemi-thermomechanical and Thermomechanical Pulps from Thermbing Aspen / White Spruce Chip Mixtures", *Pulp and Paper Canada*, 93(12): 112-117 (1992).
  - 54 Wu, M., "Production of Newsprint Furnish from Mixtures of White Birch and Black Spruce", Dr. En Génie Papetier, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada (2003).
  - 55 Kaarlo, N., "Paper Physics", *Papermaking Science and Technology*, Book 19, Chapter 3, 88-115 (1999).
  - 56 Gooding, R.W., and Olson, J.A., "Fractionation in a Bauer-Mcnette Classifier", *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(12): 423-428 (2001)

## Annexe 1. Plan d'essais

Code d'essai	Pourcentage d'essence de bois (%)		
	Épinette noire	Mélèze hybride	Bouleau blanc
1	0	0	100
2	0	20	80
3	0	40	60
4	0	60	40
5	0	80	20
6	0	100	0
7	20	0	80
8	20	20	60
9	20	40	40
10	20	60	20
11	20	80	0
12	40	0	60
13	40	20	40
14	40	40	20
15	40	60	0
16	60	0	40
17	60	20	20
18	60	40	0
19	80	0	20
20	80	20	0
21	100	0	0
22	73.3	13.3	13.3
23	73.3	13.3	13.3
24	73.3	13.3	13.3

## Annexe 2. Propriétés des pâtes et papiers.

### Propriétés des pâtes et des papiers

CSF=150mL	1	2	3	4	5	6
Énergie spécifique, MJ/kg	10,33	9,99	8,92	8,92	8,47	7,78
Matière extractible au DCM, %	2,05	1,91	1,57	1,27	1,13	0,74
<b>Propriétés des pâtes</b>						
Taux de rejets, %	0,14	0,50	0,77	0,90	1,39	1,53
Longueur des fibres						
Moyenne arithmétique, mm	0,44	0,49	0,54	0,56	0,57	0,58
Pondérée en longueur, mm	0,81	0,95	1,12	1,27	1,35	1,51
Pondérée en poids, mm	1,08	1,34	1,60	1,91	2,02	2,28
Masse linéique, mg/m						
Bauer-Mcnett de R48	0,180	0,183	0,188	0,213	0,219	0,223
Bauer-Mcnett de R100	0,154	0,161	0,164	0,183	0,189	0,201
Fines						
Arithmétique, %	44,0	44,6	43,1	44,3	44,1	47,0
Pondérée en poids, %	12,44	11,14	9,82	9,51	9,16	9,63
Volume spécifique hydrodynamique, cm <sup>3</sup> /g	109	136	160	193	202	240
<b>Propriété du papier sec</b>						
Grammage, g/m <sup>2</sup>	61,9	61,4	60,2	59,8	60,2	60,6
Volume spécifique, cm <sup>3</sup> /g	3,24	3,35	3,31	3,30	3,00	3,02
Densité, g/cm <sup>3</sup>	0,31	0,30	0,30	0,30	0,34	0,33
Indice de rupture, N·m/g	14,8	17,0	19,3	22,6	26,6	30,1
Longueur de rupture, km	1,51	1,73	1,96	2,31	2,71	3,07
Allongement, %	0,87	1,04	1,08	1,28	1,51	1,86
TEA, g/cm	5,03	6,92	7,90	11,35	15,99	23,78
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	0,53	0,72	0,87	1,05	1,33	1,55
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	2,35	2,98	3,99	5,35	6,51	8,40
Blancheur, %ISO	55,3	50,7	47,0	46,0	42,2	40,5
Opacité, %	97,2	97,6	97,4	97,2	97,7	98,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	62,0	58,2	55,1	53,1	50,6	49,6
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /g	4,57	5,70	6,04	6,06	7,24	7,90
L*	86,1	84,6	83,5	83,1	81,3	80,3
a*	1,98	1,60	1,36	1,31	1,28	1,38
b*	12,25	14,25	16,52	17,16	18,42	18,80

## Propriétés des pâtes et des papiers

CSF=150mL	7	8	9	10	11	12
Énergie spécifique, MJ/kg	9,04	8,71	8,85	9,01	8,63	9,22
Matière extractible au DCM, %	1,7	1,4	1,12	1,03	0,68	1,45
<b>Propriétés des pâtes</b>						
Taux de rejets, %	0,58	0,85	1,09	1,41	1,52	0,94
Longueur des fibres						
Moyenne arithmétique, mm	0,58	0,58	0,62	0,61	0,66	0,61
Pondérée en longueur, mm	1,09	1,23	1,39	1,48	1,69	1,31
Pondérée en poids, mm	1,49	1,77	2,03	2,18	2,44	1,89
Masse linéique, mg/m						
Bauer-Mcnett de R48	0,200	0,198	0,205	0,213	0,222	0,186
Bauer-Mcnett de R100	0,163	0,173	0,170	0,182	0,183	0,178
Fines						
Arithmétique, %	39,8	42,1	41,1	43,9	44,5	41,1
Pondérée en poids, %	8,9	8,79	7,92	8,56	7,95	8,22
Volume spécifique hydrodynamique, cm <sup>3</sup> /g	160	191	213	252	301	211
<b>Propriété du papier sec</b>						
Grammage, g/m <sup>2</sup>	60,0	59,8	61,2	60,6	60,1	60,8
Volume spécifique, cm <sup>3</sup> /g	3,22	3,24	3,13	3,19	3,20	3,21
Densité, g/cm <sup>3</sup>	0,31	0,31	0,32	0,31	0,31	0,31
Indice de rupture, N·m/g	21,0	23,7	26,5	28,8	33,1	27,6
Longueur de rupture, km	2,14	2,42	2,70	2,94	3,38	2,81
Allongement, %	1,17	1,29	1,28	1,64	1,77	1,41
TEA, g/cm	9,77	12,09	13,76	19,41	24,03	15,62
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	0,92	1,12	1,30	1,41	1,70	1,34
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	3,64	5,56	5,88	6,87	8,19	6,08
Blancheur, %ISO	52,6	49,1	46,2	44,3	41,6	51,1
Opacité, %	96,6	96,7	97,4	97,3	97,9	96,8
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	55,1	53,3	52,7	50,7	51,2	54,4
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /g	4,70	5,34	6,11	6,29	7,46	5,10
L*	85,2	84,1	82,9	82,3	81,1	84,6
a*	1,56	1,39	1,33	1,25	1,38	1,52
b*	13,50	15,46	16,65	17,89	18,75	14,10

## Propriétés des pâtes et des papiers

<b>CSF=150mL</b>	13	14	15	16	17	18
Énergie spécifique, MJ/kg	9,20	8,81	8,74	8,42	8,53	9,01
Matière extractible au DCM, %	1,11	0,96	0,7	1,27	1,05	0,72
<b>Propriétés des pâtes</b>						
Taux de rejets, %	1,18	1,32	1,38	0,96	1,21	1,14
Longueur des fibres						
Moyenne arithmétique, mm	0,64	0,66	0,70	0,70	0,69	0,74
Pondérée en longueur, mm	1,42	1,57	1,71	1,57	1,62	1,81
Pondérée en poids, mm	2,05	2,29	2,40	2,25	2,37	2,51
Masse linéique, mg/m						
Bauer-Mcnett de R48	0,205	0,205	0,215	0,211	0,208	0,216
Bauer-Mcnett de R100	0,177	0,178	0,192	0,168	0,166	0,175
Fines						
Arithmétique, %	41,0	42,1	43,2	39,4	43,8	41,0
Pondérée en poids, %	7,78	7,65	7,13	6,87	7,58	6,64
Volume spécifique hydrodynamique, cm <sup>3</sup> /g	257	312	340	257	305	347
<b>Propriété du papier sec</b>						
Grammage, g/m <sup>2</sup>	61,4	61,1	60,7	61,3	59,7	61,2
Volume spécifique, cm <sup>3</sup> /g	3,21	3,10	3,06	3,04	2,98	2,87
Densité, g/cm <sup>3</sup>	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,35
Indice de rupture, N·m/g	29,5	33,0	35,5	34,2	36,2	41,6
Longueur de rupture, km	3,01	3,36	3,62	3,48	3,69	4,24
Allongement, %	1,46	1,58	1,90	1,63	1,52	1,80
TEA, g/cm	17,43	10,81	27,90	22,7	21,8	31,1
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	1,40	1,76	2,12	1,78	1,88	2,25
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	6,44	7,99	9,30	7,83	8,40	9,23
Blancheur, %ISO	48,5	46,2	44,1	52,4	48,9	47,4
Opacité, %	96,9	97,1	97,4	96,2	96,5	96,9
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	52,1	51,5	50,9	53,0	51,7	51,9
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /g	5,39	5,85	6,43	4,56	5,19	5,51
L*	83,8	83,0	81,6	85,2	84,1	83,7
a*	1,30	1,27	1,08	1,37	1,33	1,11
b*	15,58	16,86	18,08	14,01	15,88	16,65

## Propriétés des pâtes et des papiers

CSF=150mL	19	20	21	22	23	24
Énergie spécifique, MJ/kg	9,06	8,92	8,22	9,04	9,31	8,90
Matière extractible au DCM, %	1,02	0,77	0,81	1,07	0,92	0,88
<b>Propriétés des pâtes</b>						
Taux de rejets, %	1,01	1,17	0,72	1,14	1,08	1,03
Longueur des fibres						
Moyenne arithmétique, mm	0,75	0,78	0,83	0,75	0,76	0,76
Pondérée en longueur, mm	1,74	1,87	1,93	1,76	1,77	1,78
Pondérée en poids, mm	2,42	2,54	2,58	2,42	2,43	2,46
Masse linéique, mg/m						
Bauer-Mcnett de R48	0,204	0,209	0,196	0,208	0,206	0,206
Bauer-Mcnett de R100	0,177	0,175	0,172	0,176	0,178	0,177
Fines						
Arithmétique, %	38,8	40,4	38,0	40,4	38,8	39,1
Pondérée en poids, %	6,24	6,25	5,55	6,51	6,10	6,15
Volume spécifique hydrodynamique, cm <sup>3</sup> /g	299	355	376	363	337	354
<b>Propriété du papier sec</b>						
Grammage, g/m <sup>2</sup>	60,0	60,5	60,6	60,0	60,0	59,2
Volume spécifique, cm <sup>3</sup> /g	2,88	2,92	2,83	2,90	2,93	2,94
Densité, g/cm <sup>3</sup>	0,35	0,34	0,35	0,35	0,34	0,34
Indice de rupture, N·m/g	41,3	44,4	48,5	40,2	40,5	40,2
Longueur de rupture, km	4,21	4,53	4,94	4,10	4,13	4,10
Allongement, %	1,81	1,85	1,92	2,02	1,99	1,80
TEA, g/cm	30,1	33,0	37,6	33,5	33,2	28,6
Indice d'éclatement, kPa·m <sup>2</sup> /g	2,20	2,53	2,86	2,31	2,23	2,23
Indice de déchirure, mN·m <sup>2</sup> /g	9,22	10,19	10,07	9,45	9,75	9,66
Blancheur, %ISO	52,0	48,7	52,4	49,2	50,0	50,0
Opacité, %	95,9	96,6	95,3	96,4	96,2	96,1
Coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> /kg	52,1	52,0	51,6	51,9	51,7	51,6
Coefficient d'absorption, m <sup>2</sup> /g	4,41	5,11	3,90	5,09	4,76	4,85
L*	85,5	84,2	86,0	84,2	84,7	84,6
a*	1,12	1,01	0,94	1,11	1,04	1,07
b*	14,92	16,13	15,38	15,56	15,54	15,39