

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

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

PAR

BEATA SZCZESIUL

**MISE EN PÂTE D'EXPLOSION DU PANIC ÉRIGÉ:
EFFET DU Li_2CO_3 ET ZnCO_3 EN COMPARAISON AVEC Na_2CO_3 , NaHCO_3 ET
 MgCO_3 .**

JUIN 2001

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

Par la présente, je désire remercier mon directeur, le Dr Bohuslav V. Kokta, et mon codirecteur de mémoire, le Dr Kwei N. Law pour leurs conseils, leurs encouragements et l'aide qu'ils m'ont apportée.

Je tiens aussi à remercier très sincèrement le Dr Frantisek Ruzinsky qui m'a guidé et soutenu tout au long de ce projet, tant du point de vue expérimental que théorique.

Je remercie également les étudiants et le personnel du Centre de recherche en pâtes et papiers pour leur amitié et leur aide.

Aussi, j'adresse mes sincères remerciements au Resource Efficient Agricultural Production pour la fourniture de la matière première.

RÉSUMÉ

Le remplacement du bois par la paille du panic érigé, «switchgrass» comme matière première pour l'industrie papetière, est envisageable à condition de démontrer qu'elle possède les qualités requises. Le choix du procédé à utiliser pour sa mise en pâte est important puisqu'il existe une fière compétition pour l'obtention d'un niveau de qualité acceptable au plus faible coût possible. Les pâtes à haut rendement comme les pâtes chimico-mécaniques (PCM) et chimico-thermomécaniques (PCTM) constituent un choix intéressant à condition de trouver la solution au problème de consommation d'énergie de raffinage.

Le nouveau procédé à haut rendement de mise en pâte d'explosion (PE) propose une nouvelle facette en consommant peu d'énergie et en obtenant des qualités de papier supérieures aux pâtes conventionnelles. Ce procédé diffère des mises en pâte conventionnelles par ses conditions de cuisson particulière. En effet, la cuisson s'effectue en phase vapeur sous pression, à une température de 190°C pendant quatre minutes. L'explosion est causée par la brusque chute de pression à la fin de la cuisson. Les autres étapes du procédé demeurent identiques à celles des mises en pâte conventionnelles.

Pour vérifier l'effet du carbonate de lithium (Li_2CO_3) et du carbonate de zinc (ZnCO_3) dans les solutions d'imprégnation à base de sulfite de sodium (Na_2SO_3), on a préparé quatre solutions d'imprégnation: 0%, 0.5%, 1% et 2% de Li_2CO_3 et une de 1% de ZnCO_3 . Tous les types de pâtes (PE, PCM et PCTM) ont été imprégnées avec des solutions identiques pour lesquelles le ratio lessive/pâte (L/P) égale 4.

Afin de vérifier l'impact de la sévérité de cuisson sur le rendement, on a également préparé une pâte PE avec 8% Na_2SO_3 et 1% Li_2CO_3 sur laquelle on a appliqué 1 min de cuisson et un ratio L/P de 3. Après la cuisson, on a effectué le raffinage dans les mélangeurs domestiques et on a calculé l'énergie spécifique de raffinage. La mise en feuille et les tests de propriétés du papier ont été effectués selon les normes de l'ATPPC.

Les résultats obtenus démontrent que le panic érigé constitue une source prometteuse de fibres. La pâte d'explosion imprégnée avec le carbonate de lithium possède de bonnes propriétés. On constate qu'il y a une amélioration des propriétés papetières et une diminution de l'énergie spécifique de raffinage, avec une augmentation de la concentration de Li_2CO_3 . Par contre, le rendement de la PE demeure faible pour une pâte à haut rendement et n'augmente pas avec l'addition de Li_2CO_3 .

L'addition du bicarbonate de sodium comme second agent d'imprégnation engendre une consommation d'énergie de raffinage la plus basse. Cependant, la présence du carbonate de lithium dans la solution d'imprégnation mène aux plus hautes résistances mécaniques et la plus haute blancheur. Les meilleurs résultats du rendement on obtient avec le carbonate de magnésium (MgCO_3). L'addition du ZnCO_3 à la solution qui contient le Na_2SO_3 n'améliore pas des propriétés du papier.

Mots-clés: panic érigé, pâte d'explosion, pâte chimico-mécanique, pâte chimico-thermomécanique, carbonate de lithium, carbonate de zinc, propriétés physiques, mécaniques et optiques.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
 Chapitre 1 - Introduction	 1
 Chapitre 2 - Théorie	 4
2.1 Panic érigé	4
2.1.1 Introduction	4
2.1.2 Graminées vivaces.....	4
2.1.3 Panic érigé - source des fibres.....	5
2.1.4 Structure du panic érigé.....	5
2.1.5 Composition chimique	6
2.1.6 Caractéristique de pâte du panic érigé.....	7
2.2 Pâte d'explosion	8
2.2.1 Pâte d'explosion versus pâte chimico-mécanique et pâte chimico-thermomécanique.	8
2.2.2 Particularités de la pâte d'explosion.....	8

2.3	Effets du prétraitement chimique	9
2.3.1	Sulfonation des pâtes	10
2.3.2	Second agent d'imprégnation	11
Chapitre 3 - Méthodologies expérimentales.....		15
3.1	Matière première	15
3.2	Calcul du taux d'humidité de la paille	15
3.3	Imprégnation avec l'eau déminéralisée.....	15
3.4	Imprégnation avec les agents chimiques	16
3.5	Cuisson en phase vapeur avec décharge explosif.....	18
3.5.1	Procédé de cuisson	18
3.5.2	PH des solutions d'imprégnation et de la liqueur de cuisson	20
3.6	Calcul du rendement.....	20
3.7	Calcul de l'énergie spécifique de raffinage.....	20
3.8	Calcul du taux de contenu en acide sulfonique et carboxylique	21
3.9	Blanchiment de la pe au peroxyde d'hydrogène.....	22
3.9.1	Prétraitement	22
3.9.2	Blanchiment.....	23
3.9.3	Neutralisation	23
3.10	Mise en feuille	23

Chapitre 4 - Résultats et discussions.....	24
4.1 Effet du Li_2CO_3 dans la mise en pâte d'explosion du panic érigé	24
4.1.1 pH des solutions d'imprégnation et de la liqueur de cuisson.....	24
4.1.2 Rendement des pâtes	25
4.1.3 Énergie spécifique de raffinage	26
4.1.4 Propriétés physiques	28
4.1.5 Propriétés mécaniques	32
4.1.6 Propriétés optiques	38
4.1.7 Sulfonation des pâtes	41
4.1.8 Effet du temps de cuisson et du ratio lessive/pâte sur les propriétés de PE.....	44
4.2 Effet du ZnCO_3 dans la mise en pâte d'explosion du panic érigé en comparaison avec Li_2CO_3	45
4.2.1 Rendement des pâtes	45
4.2.2 Énergie spécifique de raffinage	46
4.2.3 Densité.....	48
4.2.4 Propriétés mécaniques	49
4.2.5 Propriétés optiques	51
4.3 Comparaison de différents agents d'imprégnation.....	54
4.3.1 Énergie spécifique de raffinage	54
4.3.2 Rendement.....	55
4.3.3 Propriétés mécaniques	56
4.3.3 Blancheur.....	58

Chapitre 5 - Conclusions	59
Chapitre 6 - Bibliographie	61
Annexes	65
I. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour les pâtes PE, PCM et "PCTM", imprégnées avec 8% Na_2SO_3 et 0%, 0.5%, 1% et 2% Li_2CO_3	66
II. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour la pâte EP, PCM et "PCTM", imprégnées avec 8% Na_2SO_3 et 1% ZnCO_3 ,	72
III. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour la pâte EP imprégnée avec 8% Na_2SO_3 et 1% Li_2CO_3 (temps de cuisson 1 min, ratio lessive/pâte 3).....	74

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Structure du panic érigé [3].	6
Figure 2.2	Section transversale d'une fibre du bois bien gonflée [27].	11
Figure 2.3	Surface spécifique en fonction de la valeur de rétention d'eau pour les fibres imprégnées avec les différents agents chimiques [13].	12
Figure 3.1	Schéma du procédé de cuisson de la pâte d'explosion.	19
Figure 3.2	Graphique de la titration conductimétrique.	22
Figure 4.1	Variations du rendement en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM".	25
Figure 4.2	Les variations de l'énergie de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour les concentrations de Li_2CO_3 0, 0.5, 1 et 2%.	26
Figure 4.3	Énergie spécifique de raffinage en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)	27
Figure 4.4	Variations de la densité en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation	29
Figure 4.5	Densité en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)	30
Figure 4.6	Les variations de la porosité en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation	31
Figure 4.7	Porosité en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)	31
Figure 4.8	Indice de déchirure de la PE en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation.	33

Figure 4.9	Indice de déchirure en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml).....	33
Figure 4.10	Indice d'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation	34
Figure 4.11	Indice d'éclatement en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml).....	35
Figure 4.12	Longueur de rupture en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation	36
Figure 4.13	Longueur de rupture en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml).....	37
Figure 4.14	Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour les pâtes avec l'indice d'égouttage de 100 ml et les différentes concentrations de Li_2CO_3	38
Figure 4.15	Blancheur en fonction de la concentration de Li_2CO_3 des feuilles de 3 et 1,2 g pour les pâtes PE, PCM et "PCTM".	39
Figure 4.16	Variations de l'opacité en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM".	40
Figure 4.17	Variations du coefficient de diffusion de la lumière en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml).	41
Figure 4.18	Taux des ions sulfoniques en fonction du rendement des pâtes PE, PCM et "PCTM" pour différentes concentrations de Li_2CO_3	43
Figure 4.19	Variations de la longueur de rupture en fonction du taux des ions totales pour les PE, PCM et "PCTM".	43
Figure 4.20	Rendement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% Na_2SO_3 et 1% ZnCO_3	45
Figure 4.21	Rendement des pâtes PE, PCM et "PCTM" pour trois solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement (0%), 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	46

Figure 4.22	Variations de l'énergie spécifique de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnée avec de 1% de ZnCO_3	47
Figure 4.23	Énergie spécifique de raffinage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" et pour trois solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement, 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	48
Figure 4.24	Densité des pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement (0%), 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	49
Figure 4.25	Indice d'éclatement des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement (0%), 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	50
Figure 4.26	Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture des pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% de Na_2SO_3 et 1% de ZnCO_3 ou 8% de Na_2SO_3 et 1% Li_2CO_3	51
Figure 4.27	Blancheur en fonction de l'indice d'égouttage pour les pâtes imprégnées avec 8% de Na_2SO_3 et 1% de ZnCO_3	52
Figure 4.28	Blancheur des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement , 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	52
Figure 4.29	Opacité des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement, 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3	53
Figure 4.30	Coefficient de diffusion de la lumière des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement	54
Figure 4.31	Énergie spécifique de raffinage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.	55

Figure 4.32 Rendement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.....	56
Figure 4.33 Indice d'éclatement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.....	56
Figure 4.34 Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour la pâte PE du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.	57
Figure 4.35 Blancheur pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Composition chimique du panic érigé [4]:.....	6
Tableau 2.2	Rendement et nombre Kappa pour les procédés kraft, soude et soude-AQ appliqués sur le panic érigé [4]:.....	7
Tableau 2.3	Propriétés physiques des pâtes kraft, soude et soude-AQ du panic érigé. [3]	7
Tableau 3.1	Conditions d'imprégnation et de cuisson des différentes pâtes pour un rapport solution/paille de 4.....	17
Tableau 3.2	Conditions d'imprégnation et de cuisson de la PE pour un rapport solution/paille de 3.	17
Tableau 4.1	Valeurs de pH pour les solutions d'imprégnation et la liqueur de cuisson.....	24
Tableau 4.2	Taux des ions sulfoniques et carboxyliques dans les pâtes EP, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% Na ₂ SO ₃ et 0%, 0.5%, 1% et 2% Li ₂ CO ₃	42
Tableau 4.3	Propriétés de la PE cuite 1 min et 4 min avec les différents ratios L/P.	44
Tableau 5.1	Propriétés des pâtes kraft, PE, et PCM du panic érigé (PE et PCM imprégnées avec 8% de sulfite de sodium et 2% du carbonate de lithium).	59

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ATPPC	Association technique des Pâtes et Papiers du Canada
ID	Indice d'égouttage
PE	Pâte d'explosion
PCM	Pâte chimico-mécanique
PCTM	Pâte chimico-thermomécanique
Na ₂ SO ₃	Sulfite de sodium
AQ	Anthraquinone
MgCO ₃	Carbonate de magnésium
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
NaHCO ₃	Bicarbonate de sodium
Li ₂ CO ₃	Carbonate de lithium
ZnCO ₃	Carbonate de zinc
REAP	Resource Efficient Agricultural Production
ha/année	hectare par année
m	Mètre
mm	Millimètre
µm	Micromètre
%	Pour-cent
C+DED	Chloration, oxydation avec bioxyde de chlore, extraction alcaline et oxydation avec bioxyde de chlore
ODEoD	Oxydation avec oxygène, oxydation avec bioxyde de chlore, extraction oxydation avec bioxyde de chlore
min	Minutes
°C	Degrès de Celsius
DBO	Demande biologique en oxygène
VRE	Valeur de rétention d'eau
CDL	Coefficient de diffusion de la lumière
LiCl	Chlorure de lithium
cm ²	Centimètres carrés

L/P	Lessive/pâte
kWh	Kilowattheure
NaCl	Chlorure de sodium
HCl	Acide chlorhydrique
DTPA	Pentaacétiquediéthylènetriamine
ESR	Énergie spécifique de raffinage
N	Newton
mmol	millimole
ISO	International Standardisation Organisation

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'épuisement des ressources forestières et la longue période de maturation des arbres au Canada, poussent les chercheurs à se tourner vers de nouvelles matières premières pour la fabrication du papier. L'objectif est la découverte d'une source des fibres peu coûteuse pouvant se renouveler facilement. La Bagasse, le bambou, le chanvre, le lin et le kenaf représentent déjà d'importantes sources de matières premières et représentent un important potentiel pour les pays en développement [1].

Dans les graminées vivaces, le panic érigé, «switchgrass», (*Panicum virgatum*), constitue aussi un candidat excellent, grâce à sa composition chimique, un contenu bas en extractibles et en cendres et un contenu haut en holocellulose. En plus, il a un haut rendement et s'adapte bien à la terre de faible qualité [2].

Il a déjà été démontré [3,4] qu'on peut obtenir du panic érigé, une pâte kraft, soda ou soda- anthraquinone (AQ) avec un «kappa number» de 13-14 et un rendement d'environ 50 %. La pâte était caractérisée par les fibres longues et minces avec une grosse paroi cellulaire, une large distribution de la longueur et un haut contenu des fines. À cause du bas rendement de la pâte kraft, on doit se tourner vers les pâtes à haut rendement, comme la pâte chimico-mécanique (PCM) et la pâte chimico-thermomécanique (PCTM). Ces pâtes conventionnelles présentent des propriétés papetières beaucoup plus faibles que les pâtes chimiques et elles consomment plus d'énergie lors du raffinage.

Un nouveau procédé, la mise en pâte d'explosion, permet d'obtenir une pâte à haut rendement et des propriétés papetières compétitives vis-à-vis les pâtes chimiques. Ce procédé s'effectue dans des conditions sévères de cuisson en phase vapeur à une température de 190° C, pendant une courte durée de quatre minutes [5,6]. L'explosion de la pâte se produit lorsqu'on relâche brusquement la pression à la fin de la cuisson. Ce procédé peut être utilisé pour la mise en pâte des plantes sans bois, «non-wood»[7] .

Avant la cuisson, la matière est traitée avec les agents chimiques qui sont responsables du ramollissement, de l'augmentation de la longueur et de la surface spécifique des fibres, ainsi que du décroissement de l'énergie de raffinage [8]. Le prétraitement au sulfite de sodium (Na_2SO_3) est nécessaire pour la protection du matériel lignocellulosique contre l'oxydation et pour le développement des groupes hydrophiliques. Le deuxième agent d'imprégnation est utilisé pour prévenir de l'hydrolyse acide et de la perte en rendement, pour supporter le ramollissement et le gonflement, et pour former des groupes hydrophyliques sur les fibres [9].

Jusqu'à présent, sur le panic érigé, les effets des agents comme les carbonates de magnésium (MgCO_3), de sodium (Na_2CO_3) et le bicarbonate de sodium (NaHCO_3) ont été déterminés [10, 11, 12]. Le NaHCO_3 appliqué dans l'imprégnation a montré une faible amélioration des propriétés de résistance [10]. Les pâtes obtenues après addition du MgCO_3 à la solution d'imprégnation, ont vu leurs propriétés physiques et leur consommation d'énergie spécifique améliorées. L'addition du MgCO_3 a aussi permis d'améliorer le rendement de la pâte d'explosion [12]. L'utilisation comme deuxième agent d'imprégnation du Na_2CO_3 comparativement au MgCO_3 permet d'obtenir des meilleurs propriétés et une consommation d'énergie plus faible.

Selon des études précédentes [13], le carbonate de lithium (Li_2CO_3) et le carbonate de zinc (ZnCO_3), sont de puissants agents de gonflement. L'addition de ces agents, surtout le carbonate de lithium, mène à l'augmentation de la surface spécifique des fibres et de la capacité des liaisons interfibres. Cependant, leurs effets sur les propriétés de la pâte et du papier du panic érigé n'ont pas été déterminés. Donc, on a choisi ces agents comme agents secondaires d'imprégnation pour cette étude.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- ❑ Valoriser la paille du panic érigé pour son utilisation dans l'industrie papetière
- ❑ Étudier si le procédé de mise en pâte d'explosion est avantageux comparativement aux autres procédés conventionnels (PCM et PCTM)
- ❑ Déterminer l'effet du Li_2CO_3 et du ZnCO_3 comme second agent d'imprégnation

En premier lieu, l'effet du carbonate de lithium sur les propriétés des trois pâtes, PE, PCM et PCTM, de panacéol a été étudié en analysant les similarités et les différences dans le comportement de différentes pâtes. Ensuite, l'utilisation du carbonate de zinc comme second agent d'imprégnation a été évaluée. La dernière partie est consacrée à la comparaison des effets de différents agents chimiques.

CHAPITRE 2

THÉORIE

2.1 PANIC ÉRIGÉ

2.1.1 Introduction

Malgré des régimes de régénération et d'amélioration de l'efficacité de la production du bois, on prévoit que la demande future des fibres du bois va excéder les réserves mondiales. De plus, une réduction de la superficie des coupes permis et un fort support public pour des solutions protégeants l'environnement, ont provoqué le développement des sources des fibres des plantes annuelles [1]. Par exemple, en Inde, l'industrie papetière observe une tendance croissante de l'utilisation des plantes annuelles. Celles représentent approximativement de 39 % de la production totale. Présentement, la bagasse, le bambou et la paille constituent les matières premières dominantes parmi les plantes annuelles. De plus, le kenaf représente une source potentielle de fibres en Asie du Sud et du Sud- Est [14].

En Amérique du Nord, on utilise, comme les fibres agricoles, la paille de céréale, le chanvre, le kenaf, le lin et, récemment, les graminées vivaces comme le panic érigé.

2.1.2 Graminées vivaces

Les graminées vivaces n'ont pas besoins d'être ensemencées chaque année. Elles sont catégoriser en deux groupes basés sur leur système photosynthétique, les graminées de la saison froide et chaude. Le panic érigé (*Panicum virgatum*) est une plante de la saison chaude. Il utilise un sentier métabolique de type C_4 pour le transport du dioxyde de carbone dans le procédé de la photosynthèse. Dans des conditions optimales, les herbes C_4 sont approximativement 40% plus efficaces à convertir le rayonnement solaire en biomasse, que les herbes C_3 et consomment environ la moitié d'eau par tonne de biomasse produite. La consommation d'eau réduite des herbes C_4 est une caractéristique

importante pour réduire le niveau de silice dans les herbes, car celle-ci est en grande partie transportée par l'eau [2].

2.1.3 Panic érigé - source des fibres

Le panic érigé donne un bon rendement sur les terres peu fertiles, ce qui constitue un avantage par rapport aux autres cultures de biomasse, car une grande partie de la terre disponible pour la production de biomasse au Canada Centrale sont des terres de qualité inférieure [15].

Le panic érigé est, présentement, à l'étude pour la production de fibres au Canada par un consortium comprenant, Resource Efficient Agricultural Production (REAP), Domtar, Noranda et Ressources naturelles Canada. Le panic érigé a été identifiée comme un produit de remplacement pour les fibres de bois feuillus.

Les attributs du panic érigé pour la production des fibres sont les suivants:

- ❑ Rendements stables et productifs 8-12 hectare par année (ha/année).
- ❑ Tolérant à la sécheresse et bien adaptée aux sols peu fertiles
- ❑ Une teneur en cellulose plus élevée et une teneur en cendres inférieures que les pailles de céréale.
- ❑ Ne pas besoin de concurrencer pour la terre de haute qualité et permet d'accéder la région agricole pour la production des fibres autrement non accessible pour la plantation d'arbre [2].

2.1.4 Structure du panic érigé

Le panic érigé pousse principalement pendant la partie chaude de l'été. C'est une plante de 1 à 2 mètres (m) de hauteur. Elle est composée de tige, de lame de feuille et de tête de graine (figure 2.1). La tige contient de 5 à 7 noeuds durs et denses. La distance entre les noeuds varie de 15 à 20 centimètres (cm) et dépend des conditions climatiques et du type de terre. Les feuilles sont plates et sa taille est de 0,5 à 1 cm de largeur et jusqu'à 70 cm de longueur [3].

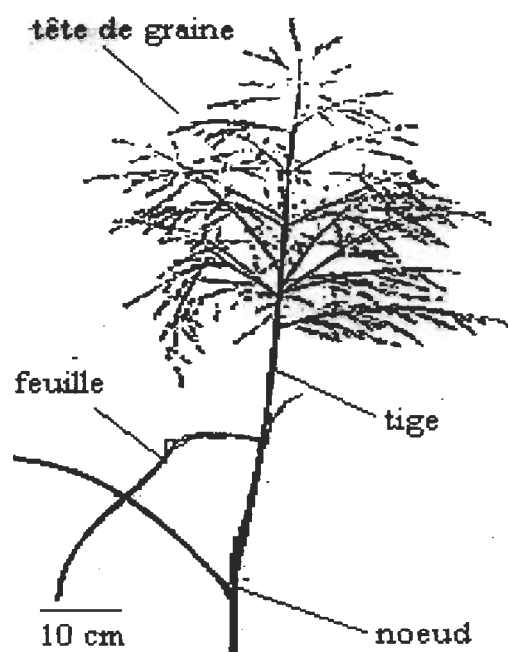


Figure 2.1 Structure du panic érigé [3].

2.1.5 Composition chimique

Le «switchgrass» a un bas contenu en cendres. Le contenu de lignine et des extractibles est également bas (tableau 2.1).

Tableau 2.1 Composition chimique du panic érigé [4]:

Paramètre	Contenu (%)
cendres	1,5
extractibles	1,6
lignine	21,8
holocellulose	75,1
alpha-cellulose	43,4
hémicelluloses	35,9
pentosanes	33,6

2.1.6 Caractéristique de pâte du panic érigé.

Les fibres de la pâte kraft du panic érigé sont longues et minces avec une épaisse paroi cellulaire de 5 à 6 micromètres (μm). Le diamètre de la fibre est de 10 à 15 μm et la longueur moyenne de 1,4 millimètres (mm). Cette pâte contient 23 pour-cent (%) de fines [4].

Le panic érigé peut être facilement mise en pâte en utilisant les procédés kraft, soude où soude -AQ. La pâte obtenue a un bas nombre Kappa et un rendement acceptable.(tableau 2.2)

Tableau 2.2 Rendement et nombre Kappa pour les procédés kraft, soude et soude-AQ appliqués sur le panic érigé [4].

	Kraft	Soude	Soude-AQ (0.025%)
Rendement (%)	49,5	48,5	48,4
Nombre Kappa	13,5	21,3	15,9

La résistance à l'éclatement, à la déchirure et la longueur de rupture du papier sont à la limite inférieure lorsque comparé aux valeurs typiques du bois feuillu tandis que l'indice d'égouttage est inférieur. Les propriétés de force des pâtes de panic érigé obtenues à l'aide de différents procédés sont semblables. (tableau 2.3.)

Tableau 2.3 Propriétés physiques des pâtes kraft, soude et soude-AQ du panic érigé. [3]

	Panic érigé			Feuillu Kraft
	Kraft	Soude	Soude-AQ	
Indice d'égout. (ml)	417	326	319	286
Éclatement ($\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$)	3,6	3,6	4,2	4,4
Déchirure ($\text{Nm} \cdot \text{m}^2/\text{g}$)	5,2	5,4	5,5	6,9
Longueur de rupt. (km)	6,9	7,4	7,7	6,7

La pâte kraft du panic érigé peut être facilement blanchie en utilisant les séquences conventionnelles (C+DED), sans chlore élémentaire (ODEoD) et sans chlore totale (OZEQPo) pour obtenir jusqu'à 85% de blancheur, sans affecter la résistance des fibres [3].

2.2 PÂTE D'EXPLOSION

2.2.1 Pâte d'explosion versus pâte chimico-mécanique et pâte chimico-thermomécanique.

Les pâtes chimico-mécanique (PCM) et chimico-thermomécanique (PCTM) représentent d'excellentes alternatives aux pâtes mécaniques, plutôt faibles en qualité et aux pâtes chimiques, plutôt chères et de faible rendement (45-50%). Les pâtes PCM et PCTM ont un rendement élevé, un coût bas et engendrent peu de problèmes de pollution tout en donnant une pâte ayant de bonnes propriétés mécaniques. Le seul inconvénient principal des pâtes CMP/CTMP est leur énergie de défibrillation relativement élevée [16].

La pâte d'explosion (PE) a été suggérée comme une alternative pour les pâtes PCM et PCTM au début des années 90 dû à la réduction d'énergie requise pour raffiner cette pâte. La PE peut donner des propriétés de pâte et de papier considérablement plus hautes que celles des PCM et PCTM préparés avec la même charge chimique de cuisson. Ces propriétés sont semblables à celles de la pâte blanchie de bois dur. En plus, l'énergie de raffinage est d'environ 30-50% plus basse [17- 19].

2.2.2 Particularités de la pâte d'explosion

La mise en pâte d'explosion est un procédé de mise en pâte à haut rendement, basé sur une cuisson de courte durée (1-4 min) en phase vapeur à une température comprise dans l'intervalle de 180 ° à 210 °C, suivi de la décompression explosive [18]. Le procédé de la PE comprend le prétraitement chimique de la matière première.

Le cœur du procédé de mise en pâte d'explosion est le réacteur, qui permet l'utilisation de haute pression pendant le chauffage et la cuisson. Le réacteur peut être du type

« batch » ou discontinu. Le réacteur discontinu est équipé de valves spéciales de décharge et d'alimentation. Le réacteur commercial de Stake Technology est équipé d'une valve de décharge de Kamyr pour favoriser la défibrillation partielle des copeaux. La libération partielle des fibres des copeaux est attribuée principalement au relâchement brusque de la pression [19, 20]. La défibrillation varie directement avec la pression appliquée. L'utilisation d'une pression de cuisson plus élevée donne une meilleure défibrillation et contribue au gonflement des fibres [21, 22].

La mise en pâte d'explosion utilise une haute pression de la vapeur avec des conditions contrôlées du temps et de la température, pour transformer la structure naturelle des matériaux lignocellulosiques et atteindre des réductions significatives dans les besoins d'agents chimiques et d'énergie de raffinage. En utilisant moins d'énergie de raffinage, il y a moins de découpage des fibres et la distribution des fibres est décalée vers de plus longues fractions de fibre [17]. La pâte d'explosion a une bonne caractéristique de force et répond bien au blanchiment avec le peroxyde d'hydrogène. Ce procédé convient aux fibres des plantes annuelles et des graminées vivaces. Les plus sévères conditions de traitement associées avec l'explosion de la vapeur produisent les pâtes plus fortes [7].

2.3 EFFETS DU PRÉTRAITEMENT CHIMIQUE

La solution d'imprégnation peut protéger les copeaux contre l'oxydation pendant l'étape de cuisson, développer les groupes ioniques hydrophiles sur la fibre pendant le traitement avec la vapeur, faire gonfler les copeaux et empêcher l'hydrolyse acide menant à la perte de rendement [23]. Le traitement chimique est principalement responsable du ramollissement permanent des fibres. Il fait augmenter le contenu des fibres longues, la surface spécifique des fibres et la conformabilité [24].

La présence des agents antioxydants et hydrophyliques aussi bien qu'un agent de gonflement engendrent un changement physico-chimique des fibres pendant l'étape de la cuisson à hautes températures et pressions. Ceci résultent en une pâte et un papier ayant d'excellentes propriétés qui ne s'étaient jamais avant trouvées dans les pâtes à haut rendement de bois durs [17].

2.3.1 Sulfonation des pâtes

Dans la fabrication des pâtes à haut rendement, la lignine ne doit pas être dissoute mais plutôt sulfonée, pour améliorer les caractéristiques papetières des fibres.

Le traitement avec le sulfite de sodium mène à la sulfonation de la lignine et à l'hydrolyse d'ester et des groupes de lactone dans les hémicelluloses et la lignine, ce qui provoque l'augmentation du contenu des ions, sulfonates et carboxylates. La plus grande teneur ionique totale entraîne la présence de fibres plus longues, augmente la surface spécifique des fibres et favorise une plus grande conformabilité. L'introduction d'acide sulfonique brise en effet le réseau ramifié de la lignine et la rend hydrophile, permettant le gonflement de la fibre ce qui lui confère une meilleure flexibilité [25]. Ce phénomène est attribué au ramollissement de la lignine dans la lamelle mitoyenne par les ions sulfonates et carboxylates. Pendant que la lamelle mitoyenne ramollit progressivement, le raffinage à une énergie spécifique donnée, libère plus de fibres, diminuant le contenu en fines. Il permet également une séparation des fibres le long de l'interface de paroi de lamelle-fibre plutôt qu'à travers la paroi de fibre, pour donner un plus grand nombre de fibres intactes [26]. Les changements dans la distribution des fibres longues mène à la production des pâtes avec la meilleure résistance.

La longueur de rupture, l'indice de déchirure, la densité, la longueur de rupture de la toile humide et l'élongation de cette dernière augmente avec la teneur ionique totale. La plus grande conformabilité et une plus faible teneur en fines font baisser les caractéristiques d'opacité [24].

Les pâtes sulfonées à très haut rendement comporte l'avantage d'avoir une forte résistance, ainsi que de produire un effluent ayant une faible demande biologique en oxygène (DBO) [25].

2.3.2 Second agent d'imprégnation

Le gonflement correspond a une fibrillation interne de la paroi cellulaire suite à une action mécanique ou à un gonflement de la paroi en présence d'agent gonflant. Le gonflement de la fibre s'effectue par un clivage tangentiel des fibrilles élémentaires de la microfibrille (figure 2.2).

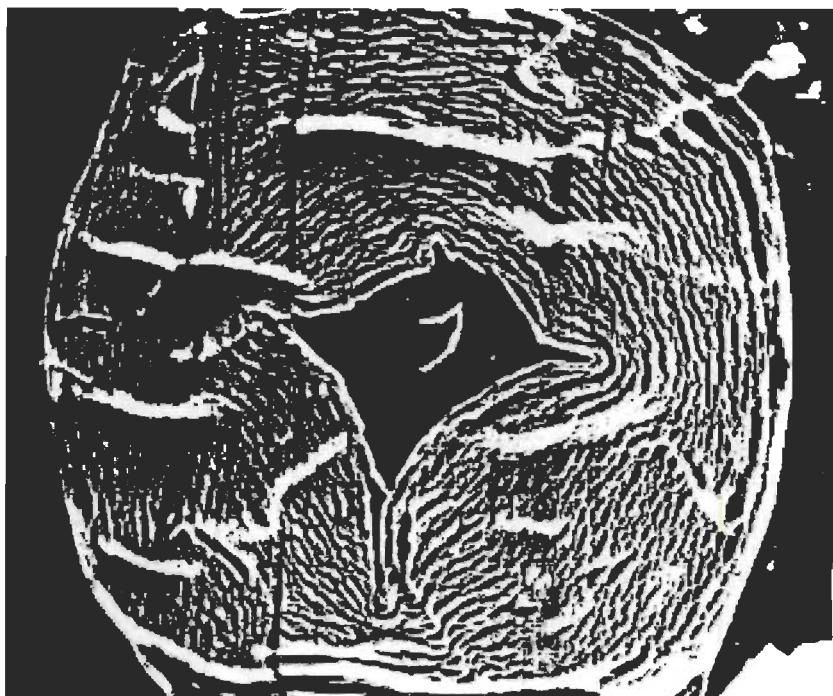


Figure 2.2 Section transversale d'une fibre du bois bien gonflée [27].

La fibrillation interne peut se quantifier par une valeur de rétention d'eau de gonflement (VRE.) ou par la méthode d'exclusion de solvant («fibre saturation point»). Le gonflement de la fibre s'effectue progressivement lors de la délignification . L'efficacité des agents de gonflement diminue dans l'ordre suivant: amines, carbonates monovalents, carbonates bivalents, chlorure de lithium (LiCL) et eau.

Quand les fibres sont gonflées, elles sont plus élastiques et elles se conforment mieux pendant la formation de la feuille. En conséquence, de meilleurs liens interfibres sont réalisées. Les liaisons interfibres peuvent être indirectement déterminées par le

coefficient de diffusion de la lumière (CDL), défini comme une ampleur de la surface de fibres non liée. L'augmentation des liens interfibres est associée à la diminution du coefficient de diffusion de la lumière, car plus une surface importante de fibres est impliquée dans les liaisons interfibres, moins efficace elle sera pour la diffusion de la lumière. Les fibres gonflées avec des amines et les carbonates monovalents engendrent le coefficient dans l'intervalle de $250\text{cm}^2/\text{g}$ à $360\text{ cm}^2/\text{g}$ [13]. L'effet de fibrillation est caractérisé par un relâchement des fibrilles et l'apparition de microfibrilles à la surface des fibres. Ce phénomène augmente la surface spécifique des fibres.

La surface spécifique est une variable particulièrement importante du point de vue du développement de la liaison de fibre à fibre. Ainsi, la surface spécifique des fibres a une influence directe sur les propriétés mécaniques et physiques du papier [26]. Les fibres bien gonflées, traitées avec les carbonates, ont une surface spécifique élevée. Comme on peut le voir sur la figure 2.3, l'utilisation du Li_2CO_3 mène à une surface spécifique d'environ $50\text{ m}^2/\text{g}$ et l'eau donne $15\text{m}^2/\text{g}$ [13].

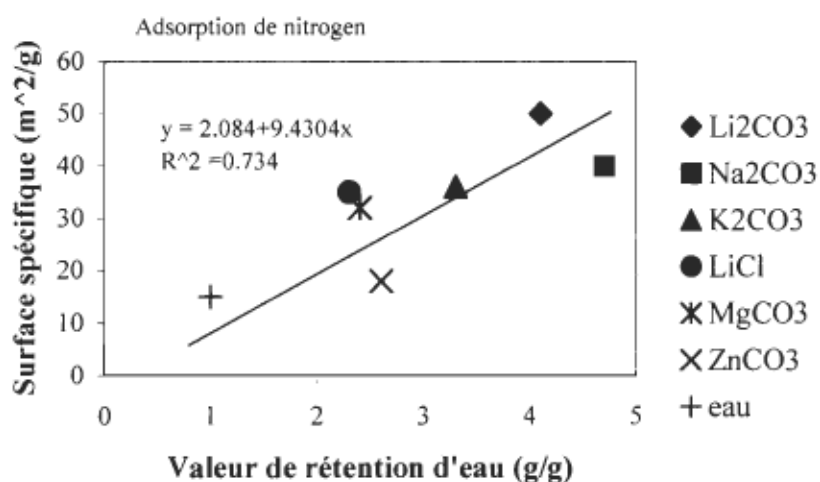


Figure 2.3 Surface spécifique en fonction de la valeur de rétention d'eau pour les fibres imprégnées avec les différents agents chimiques [13].

Les agents de gonflement puissants font libérer une rigide structure du bois pendant le traitement de gonflement et permettre l'accès de la cellulose et des hémiceluloses aux enzymes. Les fibres avec une teneur élevée des polysaccharides sur la surface ont une plus grande capacité de créer les liaisons interfibres. Dans le processus de gonflement, les fibres sont non seulement modifiées chimiquement, mais les changements de la structure poreuse interviennent également [13].

Pour la PE de tremble, par comparaison avec la pâte dont la solution d'imprégnation ne comporte que du sulfite de sodium, l'addition de soude (NaOH), de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) ou de carbonate de magnésium (MgCO_3) conduit à l'obtention des pâtes dont les fibres sont bien séparées, plus longues et plus flexibles. La lamelle mitoyenne, partiellement écaillée, laisse une partie de la paroi secondaire exposée à la surface des fibres. Cette pâte contient plus de fibres longues au même indice d'égouttage que la pâte produite après une imprégnation avec seulement du sulfite de sodium. La valeur de rétention d'eau plus élevée de la pâte produite après addition du NaOH, du NaHCO_3 ou du MgCO_3 à la solution de Na_2SO_3 indique une surface spécifique élevée des fibres, soit une bonne fibrillation, un gonflement et une flexibilité importante d'où l'obtention de bonnes liaisons interfibres [28]. La structure morphologique des fibres contribue à fournir des papiers de haute densité, de basse porosité, présentant une surface lisse, de bonnes liaisons entre les fibres, avec des résistances mécaniques élevées de même qu'un degré de blancheur acceptable [29]. La présence du NaOH, du NaHCO_3 ou du MgCO_3 a mené à plus de carbohydrates et à moins de lignine et d'extractibles exposés sur la surface de fibre, aussi bien qu'à un degré plus élevé de sulfonation de lignine. Ceci a augmenté l'exposition des groupes hydrophyliques sur la surface de fibre et facilite les liaisons d'hydrogènes pendant la formation du papier, ce qui augmente les propriétés des liaisons entre les fibres [9, 30].

La présence du NaOH, du NaHCO_3 ou du MgCO_3 , quand on compare au seul Na_2SO_3 ou d'autres systèmes chimiques, entraîne une consommation d'énergie spécifique relative de raffinage inférieure et produit une pâte ayant des résistances physiques plus élevées. En plus, la présence du NaHCO_3 ou du MgCO_3 augmente le rendement et la blancheur

de la pâte [8]. L'agent d'imprégnation devrait être choisi de façon à ajuster le pH initial de la solution d'imprégnation entre 9 et 10, ce qui améliore normalement le rendement de la PE. Il a été démontré que la présence du MgCO_3 peut protéger les carboxylates contre la dégradation pendant le processus de cuisson à la vapeur, par rapport au Na_2SO_3 seul ou aux autres systèmes chimiques qui ont été étudiés [29].

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIES EXPÉRIMENTALES

3.1 MATIÈRE PREMIÈRE

Le panic érigé utilisé pour les expériences est de la variété Cave-in-Rock. Il a été récolté à Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec, et séché à l'air. La paille est arrivée en ballot compacté et sa longueur est d'environ 70 cm. Pour la rendre utile aux manipulations ultérieures, la paille a été coupée en petits morceaux de 2 à 3 cm. Le matériel a été préparé ainsi pour atteindre un poids nécessaire à la mise en pâte et obtenir la quantité de pâte utile à la réalisation de l'expérience.

3.2 CALCUL DU TAUX D'HUMIDITÉ DE LA PAILLE

On a du déterminer le taux d'humidité de la paille afin de savoir la quantité à peser pour obtenir 50 g sec par échantillon et pour ramener chacun des échantillons à un taux d'humidité fixe pour chacun.

On a calculé le taux d'humidité (H) en utilisant la formule suivante:

$$H = 100 - \text{TMS} (\%)$$

Le taux de masse sèche (TMS) provient du rapport poids sec sur poids humide. Le poids sec a été mesuré après un séchage de 24 heures dans un four à 105°C.

3.3 IMPRÉGNATION AVEC L'EAU DÉMINÉRALISÉE

Cette étape était nécessaire dans le prétraitement des échantillons afin d'ajuster leur taux d'humidité à une valeur constante. On a mis la quantité de paille humide dans un sac de plastique jusqu'à l'obtention de 50 g de matière sèche (siccité de 100 %) d'après le TMS et on a ajouté de l'eau déminéralisée pour ajuster le poids total à 100 g. De cette façon, chaque échantillon contenait 50 g de paille et 50 g d'eau. Pour chaque type de pâte, soit la PE, PCM et la "PCTM", on a préparé 10 sacs pour la mise en pâte et un autre servant

au calcul du rendement. Pour s'assurer que la paille était bien imprégnée et que l'humidité était uniforme, on les a laissés reposer 24 heures avant le traitement chimique.

3.4 IMPRÉGNATION AVEC LES AGENTS CHIMIQUES

Pour chaque échantillon, 150 g de solution chimique composée de 8% de sulfite de sodium (Na_2SO_3) et de 0.5, 1, 2% de carbonate de lithium (Li_2CO_3) ou 1% de carbonate de zinc (ZnCO_3) a été ajoutée. On a utilisé de l'eau déminéralisée pour éviter la présence des ions métalliques qui affectent la blanchibilité des pâtes. En addition avec les 50 g d'eau déjà contenue dans le sac, on a retrouvé un rapport lessive/pâte (L/P) de 4, soit 200 g de solution au total pour 50 g de paille sèche. Le rapport de 4:1 a été déterminé comme étant une condition optimale d'imprégnation de la pâte d'explosion dans une étude déjà réalisée pour le bois de tremble [19]. Ce rapport a été aussi appliqué sur la bagasse (14). On a supposé que cette condition était également applicable pour la paille. Cependant, on a préparé aussi une série d'échantillons dans lesquels le rapport solution/matière est de 3:1 afin de voir son impact sur le rendement de la pâte. Les tableaux 3.1 et 3.2 résument la composition des différentes solutions d'imprégnation, ainsi que les conditions de cuisson des différentes pâtes utilisées pour ce procédé à la vapeur.

Pour la PCTM on utilise le terme "PCTM". Dans un procédé PCTM le raffinage de la matière se fait dans un environnement pressurisé tandis que le procédé "PCTM" dans ce travail est tout à fait différent. En effet, il est un procédé PCM à base température d'environ 125 °C.

Après avoir mis la solution dans les sacs, on s'est assuré que ceux-ci étaient bien scellés pour éviter que l'eau s'infiltre à l'intérieur et ensuite, on les a déposés dans un bain thermique. On a laissé les échantillons dans le bain pour une durée 24 heures à une température de 60°C. Ce traitement thermique permet de ramollir la paille en vue du procédé de cuisson.

Tableau 3.1 Conditions d'imprégnation et de cuisson des différentes pâtes pour un rapport L/P de 4.

Pâte	Na ₂ SO ₃ (%)	Li ₂ CO ₃ (%)	ZnCO ₃ (%)	Temps d'impr. (h)	Tempér. d'impr. (°C)	Temps de cuisson (min)	Tempér. de cuisson (°C)
PE	8	0	1	24	60	4	190
	8	0,5		24	60	4	190
	8	1		24	60	4	190
	8	2		24	60	4	190
	8			24	60	4	190
PCM	8	0	1	24	60	30	150
	8	0,5		24	60	30	150
	8	1		24	60	30	150
	8	2		24	60	30	150
	8			24	60	30	150
"PCTM"	8	0	1	24	60	10	128
	8	0,5		24	60	10	128
	8	1		24	60	10	128
	8	2		24	60	10	128
	8			24	60	10	128

Tableau 3.2 Conditions d'imprégnation et de cuisson de la PE pour un rapport L/P de 3.

Pâte	Na ₂ SO ₃ (%)	Li ₂ CO ₃ (%)	Temps d'imprég nation (h)	Température d'imprégnation (°C)	Temps de cuisson (min)	Température de cuisson (°C)
PE	8	1	24	60	1	190

3.5 CUISSON EN PHASE VAPEUR AVEC DÉCHARGE EXPLOSIF

3.5.1 Procédé de cuisson

La figure 3.1 permet de visualiser le système de cuisson à la vapeur. Une pompe puise de l'eau déminéralisée et l'entraîne dans une chaudière à vapeur pour y former de la vapeur saturée. Celle-ci est emmagasinée dans un réservoir à vapeur permettant de régulariser le débit de vapeur. Le réservoir alimente un réacteur discontinu de laboratoire fabriqué par Stake Technology, d'une capacité de 300 millilitres (ml). Le réservoir de décharge permet de recueillir les échantillons cuits.

Avant de préchauffer l'appareil, il faut retirer le condensat d'eau du réservoir de vapeur. On enlève la liqueur résiduaire après l'imprégnation des échantillons. Quand le réacteur est bien réchauffé, on peut y introduire l'échantillon à traiter. Un panneau de contrôle permet de lire la température dans le réacteur et le réservoir de vapeur. Selon le type de pâte à produire, on règle la température du réacteur à l'aide de la vanne de sûreté du générateur de vapeur. On doit maintenant purger le réacteur pendant environ une minute afin de chasser l'air. Autrement, l'air pourrait mener à l'oxydation du matériel et à la perte de la température. Les systèmes ouverture/fermeture de l'entrée et la sortie du réacteur, ainsi que l'entrée de vapeur au réacteur, sont équipés de vannes à air comprimé. Un panneau de contrôle sert à actionner ces vannes et facilite les opérations de fonctionnement. Lorsque la température désirée dans le réacteur est atteinte, on active le chronomètre pour respecter le temps et les conditions de cuisson. Une fois que le temps est écoulé, on coupe l'alimentation de vapeur et on relâche la pression en ouvrant la vanne de décharge. La chute de pression provoquée donne l'effet d'une explosion permettant le ramollissement des fibres et le soufflage de l'échantillon dans le réservoir de décharge. L'explosion est vraiment accentuée pour la pâte d'explosion, car plus la température est élevée, plus la pression dans le réacteur est grande. Ce phénomène d'explosion conduit déjà à un défibrage partiel des fibres. Une fois la cuisson des échantillons terminée, on effectue une explosion à vide dans le but de récupérer toute la paille restante dans le réacteur.

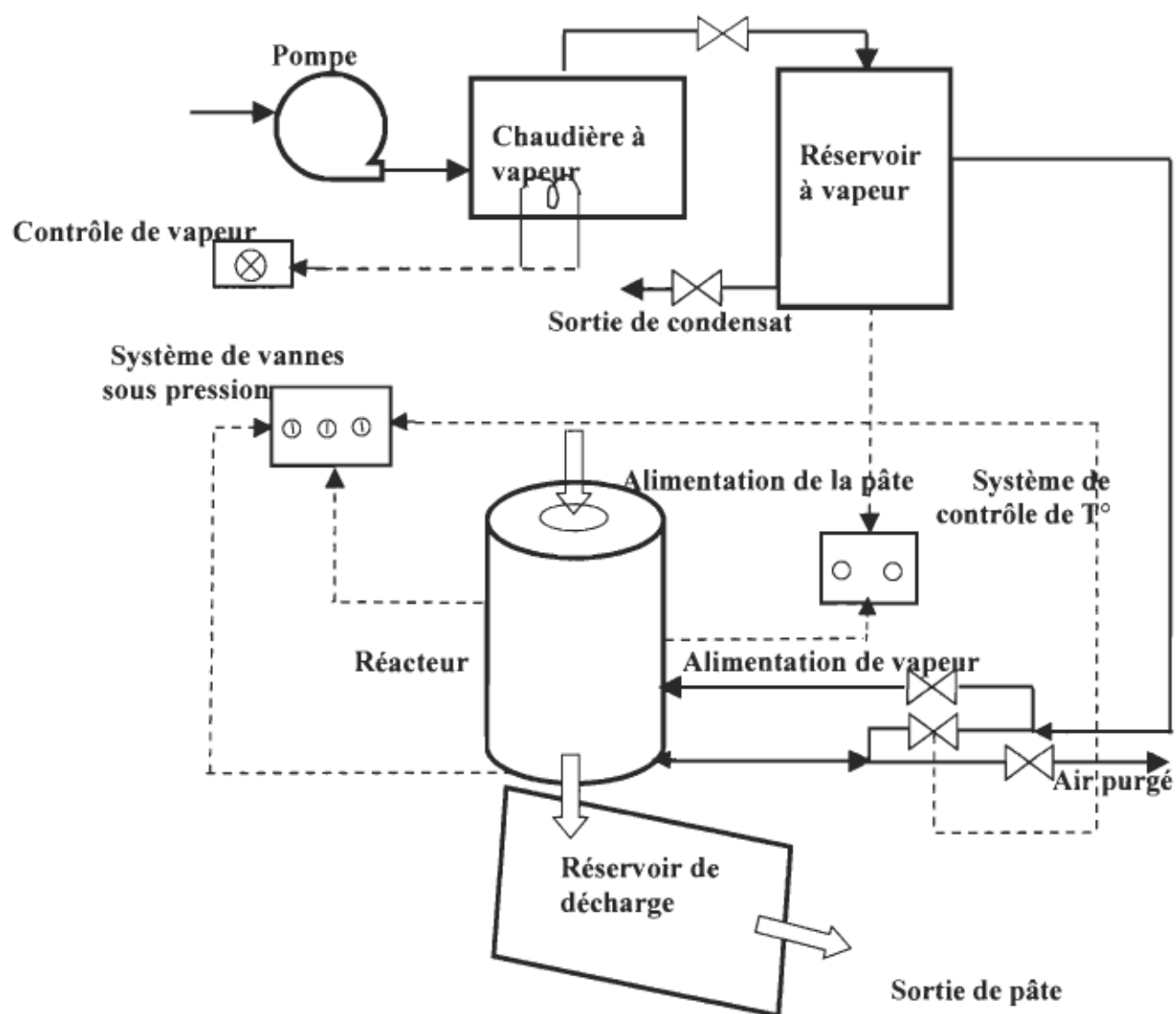


Figure 3.1 Schéma du procédé de cuisson de la pâte d'explosion.

3.5.2 PH des solutions d'imprégnation et de la liqueur de cuisson

On a déterminé le pH pour chaque solution d'imprégnation et aussi pour les liqueurs avant et après la cuisson.

3.6 CALCUL DU RENDEMENT

Pour déterminer le rendement d'un type de pâte, on a raffiné la pâte cuite dans un mélangeur de laboratoire pendant trois minutes (concentration de la pâte de 2%). Ensuite, on a lavé la pâte et on l'a filtré. La pâte lavée a été séchée dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. On a comparé ce poids au poids sec initial de la paille (50 g).

3.7 CALCUL DE L'ÉNERGIE SPÉCIFIQUE DE RAFFINAGE

On a effectué le raffinage à partir du mélangeur domestique de marque Proctor-Silex à 14 vitesses en utilisant une consistance de pâte de 2%. Des études comparatives ont démontré que les propriétés et l'énergie spécifique de raffinage par mélangeurs domestiques donnent des résultats très près de ceux obtenus sur des raffineurs Sunds ou un raffineur pilote Bauer dans le cas de la mise en pâte par explosion du tremble [30, 31]. De plus, Dr. Shaw a démontré que le raffinage par mélangeur produit des propriétés du papier similaires à ceux obtenus avec des pâtes préparées par des raffineurs de grandeur industrielle [32].

On a mesuré l'énergie requise à la défibration en kilowattheure (kWh) en fonction du temps, à l'aide d'un appareil Hioki Digital Power (modèle 3181-01). On a noté les lectures d'énergie à toutes les cinq minutes jusqu'à l'obtention d'une plage de différence d'énergie, pour deux lectures consécutives, constante et minimale. L'énergie spécifique de raffinage a été calculée à partir de l'équation suivante:

$$E = \left[\frac{e * 10^3 - t * \Delta e * 10^3 / \Delta t}{m} \right] * 3.6$$

où

E (MJ/kg) - énergie spécifique de raffinage (méga joule/kilogramme)

e (kWh) - énergie de raffinage au temps donné

Δe (kWh) - valeur minimale obtenue de la différence d'énergie entre deux lectures successives

t (min) - temps de raffinage

Δt (min) - différence de temps entre deux lectures successives (constante à 5 minutes)

m (g) - masse sèche de pâte raffinée

3.8 CALCUL DU TAUX DE CONTENU EN ACIDE SULFONIQUE ET CARBOXYLIQUE

La détermination du contenu en acide sulfonique et carboxylique se fait par la titration conductimétrique [33]. Avant de commencer la titration, la pâte fut lavée afin d'enlever toute trace de produits chimiques provenant de l'imprégnation et de la cuisson. Pour ce faire, on a laissé tremper environ 3 g de pâte sèche dans l'acide chlorhydrique 0.1 M pendant 45 minutes. On a enlevé l'acide en lavant plusieurs fois avec de l'eau distillée. On a répété la procédure pour s'assurer que le lavage était efficace. Ensuite, on a mis la pâte dans une solution du chlorure de sodium (NaCl) 0.001 M. On a ajouté 5 ml d'acide chlorhydrique (HCL) 0.1 M pour se donner une marge de lecture acceptable. L'appareil utilisé pour titration automatique est un Metrohm 660 relié à un système informatique. On a titré avec du NaOH 0.1 M. Le programme de titration mesure la conductivité en fonction du volume de NaOH. L'allure du graphique (figure 3.2) était caractérisée par deux droites, la première de pente négative et la deuxième de pente positive, séparées par un plateau. À la fin de la titration, on a pesé la pâte dans le but de connaître la quantité de matière sèche analysée.

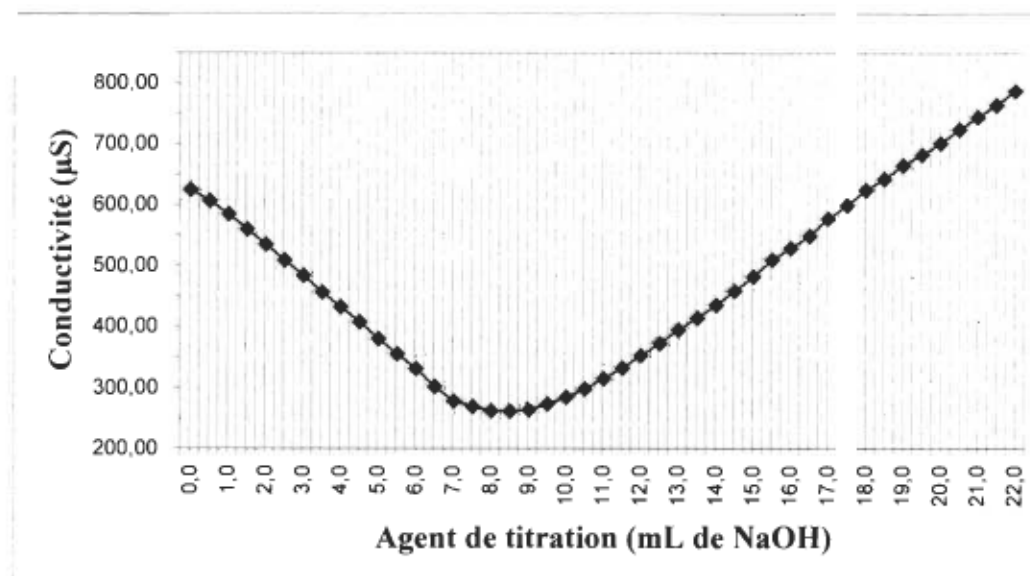


Figure 3.2 Graphique de la titration conductimétrique.

À l'aide des graphiques, on a pu calculer les taux avec les équations suivantes:

$$\text{Sulfonique} = \frac{X - 5}{\text{poids}} * 100 \text{ (mmol/kg)}$$

$$\text{Carboxylique} = \frac{Y - X}{\text{poids}} * 100 \text{ (mmol/kg)}$$

X (ml) - volume de NaOH donné par le point d'intersection de la première droite et du plateau

Y (ml) - volume de NaOH donné par le point d'intersection du plateau et de la deuxième droite

3.9 BLANCHIMENT DE LA PE AU PEROXYDE D'HYDROGÈNE

3.9.1 Prétraitement

Le blanchiment de la PE a été précédé par un traitement qui élimine les ions métalliques (chélation). L'agent chélatant utilisé était le sel de pentasodium de l'acide

pentaacétiquediéthylènetriamine (DTPA) [34]. L'agent chélatant a été ajouté à une concentration 0.5% par rapport à la pâte sèche. Le prétraitement a été effectué à une consistance de pâte de 5% 20 min, à 60°C.

3.9.2 Blanchiment

Le blanchiment a été effectué dans un stage pendant 120 min, à 70°C et à une consistance moyenne de 15%. On a utilisé une concentration de peroxyde d'hydrogène de 3%. L'alcalinité de la solution de blanchiment a été obtenue en ajoutant 5% de silicate de sodium (Na_2SiO_3) et 1,5 % d'hydroxyde de sodium (NaOH). On a ajouté aussi 0,5% d'agent chélatant, DTPA et 0,05% d'un agent protecteur contre oxydation, sulfate de magnésium (MgSO_4) [35].

3.9.3 Neutralisation

Lorsque le traitement au peroxyde d'hydrogène a été terminé, un excès de peroxyde et de l'alcali est demeuré en solution pour s'assurer d'atteindre le maximum de la blancheur. Le pH de la suspension s'est situé à 9,0. La pâte fut neutralisée à un pH 5,0-5,5. Cette neutralisation permettra de stabiliser la blancheur, d'éviter le noircissement par les alcali et d'éliminer le peroxyde résiduel. La pâte a été neutralisée en ajoutant 1% de métabisulfite de sodium.

3.10 MISE EN FEUILLE

Des feuilles de 1.2 g ont été préparées à l'aide d'une formette standard et on les a mis à l'essai pour déterminer les propriétés physiques, mécaniques et optiques selon les normes de l'ACPP. Ces feuilles ont été préparées avec l'eau de robinet. On a également préparé des feuilles de 3g en utilisant de l'eau déminéralisée pour effectuer des essais de blancheur. Les résultats sont présentés dans les annexes I, II et III.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 EFFET DU Li_2CO_3 DANS LA MISE EN PÂTE D'EXPLOSION DU PANIC ÉRIGÉ

4.1.1 pH des solutions d'imprégnation et de la liqueur de cuisson

Le pH initial des solutions dépend fortement de la composition des solutions d'imprégnation. On utilise la même charge chimique pour chaque type de pâte. Les valeurs de pH se trouvent dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Valeurs de pH pour les solutions d'imprégnation et la liqueur de cuisson.

Pâte	Agents d'imprégnation			pH		
	Na_2SO_3 (%)	Li_2CO_3 (%)	ZnCO_3 (%)	Avant imprég.	Après imprég.	Après cuisson
PE	8	0		10,0	7,7	6,9
	8	0,5		10,9	8,2	7,6
	8	1		11,1	8,6	8,3
	8	2		11,2	9,5	9,4
	8		1	11,0	8,1	6,9
PCM	8	0		10,0	7,7	7,1
	8	0,5		10,9	8,3	7,5
	8	1		11,1	8,7	8,3
	8	2		11,2	9,1	9,3
	8		1	11,0	7,9	7,3
"PCTM"	8	0		10,0	7,7	7,4
	8	0,5		10,9	8,3	8,1
	8	1		11,1	8,7	8,6
	8	2		11,2	9,1	9,5
	8		1	11,0	8,0	7,7

Le pH initial est de 10,0 pour la solution contenant seulement du Na_2SO_3 et augmente pour les solutions contenant du Li_2CO_3 ou du ZnCO_3 à 11,0 - 11,2. Le pH diminue durant l'imprégnation à 7,7 (Na_2SO_3 seul) et 8,0-9,5 pour d'autres solutions. Après la

cuisson, le pH diminue encore d'environ 0,3-1 unité sauf le pH de la solution avec 2% de Li_2CO_3 , qui augmente de 0,4 d'unité. Cependant, le pH n'a pas diminué suffisamment pour aller dans la région acide. Il est demeuré neutre ou faiblement alcalin.

4.1.2 Rendement des pâtes

La mise en pâte chimique par un procédé Kraft a pour but d'obtenir un papier d'une qualité supérieure. On doit maximiser le rendement tout en éliminant principalement la lignine. Dans le procédé de mise en pâte à haut rendement comme la PE, on doit conserver la lignine en la ramollissant suffisamment pour permettre une défibrage plus facile et obtenir de bonnes propriétés du papier. Cependant, les traitements à la vapeur à des températures élevées causent des pertes de matière par dégradation des hémicelluloses et aussi par la dissolution de la lignine.

La figure 4.1 présente le rendement pour les pâte PE, PCM et "PCTM" avec différentes concentrations de Li_2CO_3 .

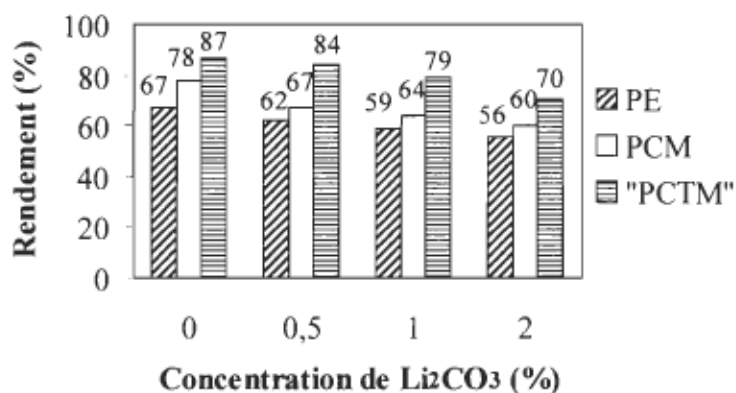


Figure 4.1 Variations du rendement en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM".

La pâte ayant les plus haut rendements est la "PCTM" avec 87 % (sans Li_2CO_3) et 70 % (plus 2% Li_2CO_3). la PCM suit avec 78%(sans Li_2CO_3) et 60% (plus 2% Li_2CO_3). La PE présente les rendements les plus faibles avec 67% et 56%. Le rendement diminue avec la sévérité du traitement. Celle-ci augmente avec la température de cuisson et avec l'augmentation de la concentration de l'agent d'imprégnation, Li_2CO_3 . Il est

probable que la perte de rendement est due à une dégradation des hémicelluloses et de la lignine. Les conditions expérimentales utilisées pour produire la pâte d'explosion du panic érigé sont trop sévères alors elles devraient être améliorées.

4.1.3 Énergie spécifique de raffinage

Les variations de l'énergie spécifique de raffinage (ESR) en fonction de l'indice d'égouttage (IE) de la pâte PE, pour chaque concentration de Li_2CO_3 , sont illustrées à la figure 4.2.

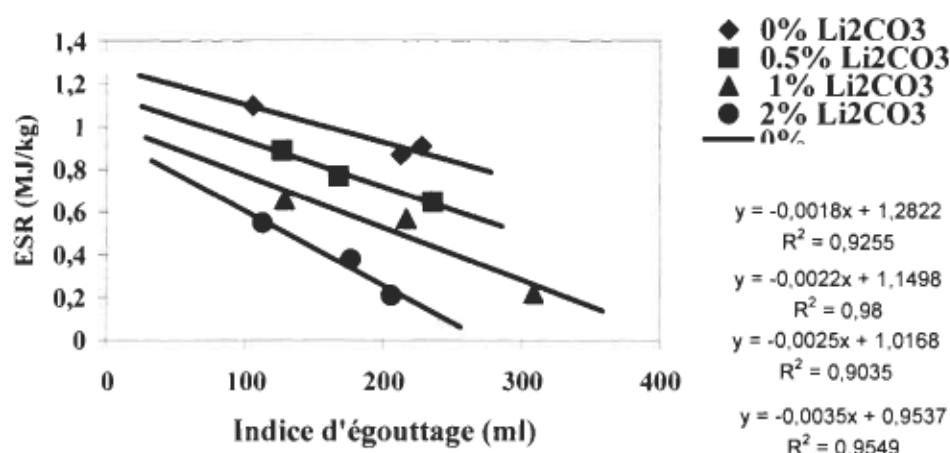


Figure 4.2 Les variations de l'énergie de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour les concentrations de Li_2CO_3 0, 0.5, 1 et 2%.

Pour chaque concentration de l'agent d'imprégnation, Li_2CO_3 , on observe une augmentation de l'énergie de raffinage avec la diminution de l'indice d'égouttage (IE). Pour le même IE, l'ESR diminue avec l'augmentation de la concentration de l'agent d'imprégnation. Moins d'énergie a été nécessaire pour la mise en pâte de l'échantillon contenant 2% de Li_2CO_3 . La même tendance on a observé pour les pâtes PCM et "PCTM". L'erreur expérimentale $2\sigma = 5\%$ (avec 95% de confiance).

La figure 4.3 présente la consommation d'énergie de raffinage en fonction de la concentration du Li_2CO_3 pour les trois pâtes avec l'indice d'égouttage de 100 ml.

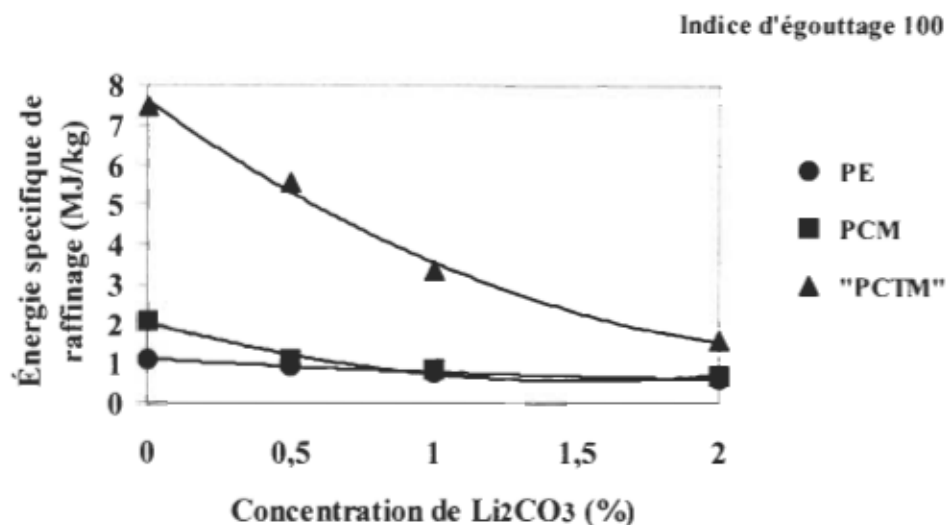


Figure 4.3 Énergie spécifique de raffinage en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

Pour obtenir un indice d'égouttage de 100 ml avec seulement Na_2SO_3 , la PE requiert le moins d'énergie ($1,1 \pm 0,1$ MJ/kg). La PCM a besoin de deux fois plus ($2,1 \pm 0,1$ MJ/kg) et la "PCTM" encore plus d'énergie ($7,5 \pm 0,4$ MJ/kg). La présence d'un deuxième agent d'imprégnation (Li_2CO_3) diminue l'énergie requise pour les pâtes PCM et "PCTM". L'énergie spécifique de la PE ne change pas avec l'augmentation de la concentration du Li_2CO_3 . Pour les concentrations 1 et 2 % de Li_2CO_3 , la consommation d'énergie par les PE et PCM est presque la même.

Les résultats sont influencés par la température de cuisson et la concentration du carbonate de lithium. La température contribue au ramollissement de la lignine, qui retient les fibres de cellulose ensemble durant la cuisson et facilite par conséquent le raffinage. La paille cuite à haute température voit sa lignine subir un ramollissement additionnel permanent et la séparation des fibres en fibrilles se fait plus facilement lors du raffinage [25]. Les températures de cuisson des PE et PCM, 190° et 150°C

respectivement, dépassent la température de transition vitreuse de la lignine et les déformations de celle-ci passe de l'état élastique à plastique.

Le traitement au sulfite de sodium permet une sulfonation et une dissolution de la lignine . La présence du Li_2CO_3 , un puissant agent de gonflement [13], provoque une diffusion chimique plus rapide dans les échantillons. Les fibres se ramollissent encore plus en se gonflant et favorise une hausse en contenu total d'ions sur les fibres. Ceci facilite la défibration et nécessite une énergie spécifique de raffinage plus basse [19]. Cette action est beaucoup plus marquée à 2% de Li_2CO_3 qu'à une concentration plus basse comme 1%. Dans le cas d'utilisation du carbonate du lithium, la PCM consomme presque la même quantité d'énergie que la PE.

L'explosion à la vapeur permet un défibrage partiel des fibres en microfibrilles. Lors du relâchement de pression, l'eau infiltrée dans la paille prend une expansion adiabatique et afflige des fissures dans la structure des fibres. La structure de la lamelle mitoyenne se retrouve élargie de 2 à 3 fois l'épaisseur des fibres originales par l'explosion causant un ramollissement des parois des cellules [35]. L'agent de cuisson à diffusion chimique rapide et à concentration élevée aura déjà fait le ramollissement à ce moment-là. Voilà pourquoi l'explosion rapporte plus d'effet à 1% alors que l'écart entre la PE et les autres pâtes est plus marqué. Cependant, il ne faut pas négliger qu'un défibrage peut aussi survenir lorsque la paille passe à travers le trou étroit de la vanne de décharge et lorsqu'il y a impact dans le réservoir de décharge par la force de l'explosion ou du soufflage [36].

4.1.4 Propriétés physiques

La densité et la porosité permettent une mesure indirecte de la flexibilité et de la conformabilité des fibres. L'augmentation de la densité indique une augmentation de la conformabilité et de la flexibilité des fibres. Et tout ceci contribue à l'amélioration des propriétés de liaison entre les fibres, mais aussi à celle des propriétés physiques [37].

Les fibres flexibles sont facilement amenées en contact avec des fibres voisines par la tension superficielle de l'eau. Au moment de la formation du papier, elles permettent

donc des grandes surfaces de contact procurant des conditions favorables à l'établissement de nombreuses liaisons. Cette structure morphologique devrait permettre l'obtention de papiers de haute densité, de basse porosité, de surface lisse, présentant des résistances mécaniques élevées [28].

On voit à la figure 4.4 que la densité de PE augmente avec la diminution de l'indice d'égouttage. L'erreur expérimentale $2\sigma = 4\%$ (avec 95% de confiance). Le carbonate de lithium comme un deuxième agent d'imprégnation provoque aussi une amélioration de la densité du papier. Le papier avec 2% de Li_2CO_3 possède la meilleure densité comparativement aux autres concentrations d'agent. La même tendance on a observé pour les deux autres pâtes, les PCM et "PCTM".

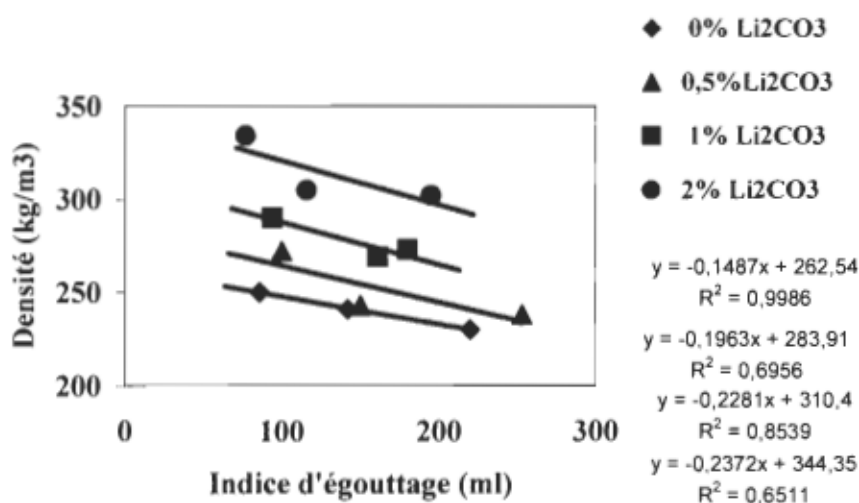


Figure 4.4 Variations de la densité en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation .

Pour le même indice d'égouttage de 100 ml, la pâte "PCTM" présente la plus petite densité (figure 4.5). Les deux autres pâtes PE et PCM possèdent des densités plus élevées, presque les mêmes pour les trois premières concentrations, de $250 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ (Na_2SO_3 seul) à $290 \pm 12 \text{ kg/m}^3$ (1% de Li_2CO_3). La haute densité est une preuve de la flexibilité des fibres. Les fibres des PE et PCM sont plus flexibles grâce au

ramollissement de la lignine qui se produit lors de la cuisson à haute température (190°C et 150°C).

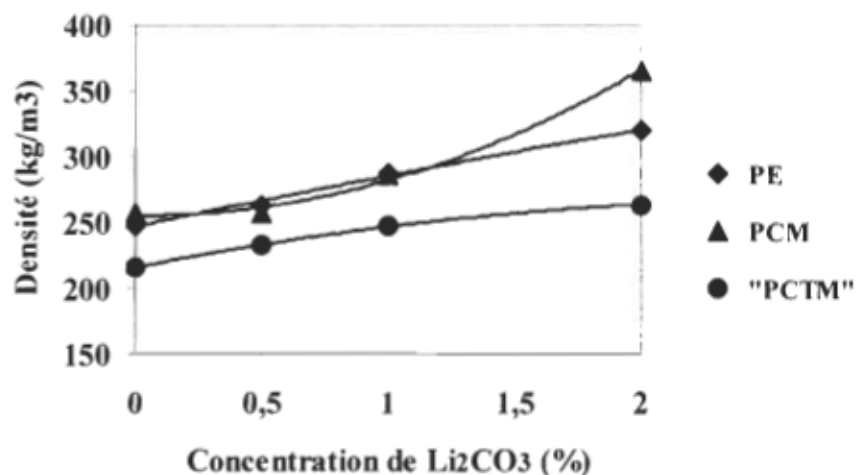


Figure 4.5 Densité en fonction de la concentration de Li₂CO₃ pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

La porosité accroît avec l'augmentation de l'indice d'égouttage pour chaque concentration de Li₂CO₃, comme on voit sur la figure 4.6. La plus haute porosité a été obtenue avec la pâte imprégnée avec seulement 8% Na₂SO₃ (0% de Li₂CO₃). D'autres concentrations de Li₂CO₃ mènent à la plus faible porosité. Cependant, on ne voit pas beaucoup de différences dans les résultats pour 0,5%, 1% et 2% de Li₂CO₃.

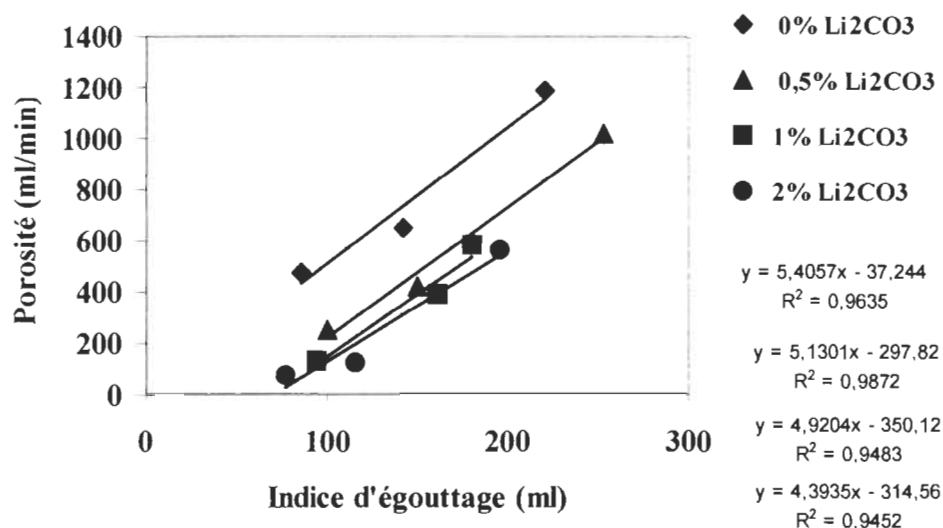


Figure 4.6 Les variations de la porosité en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation .

Pour le même IE de 100 ml, la porosité diminue avec augmentation de la concentration de Li_2CO_3 (figure 4.7).

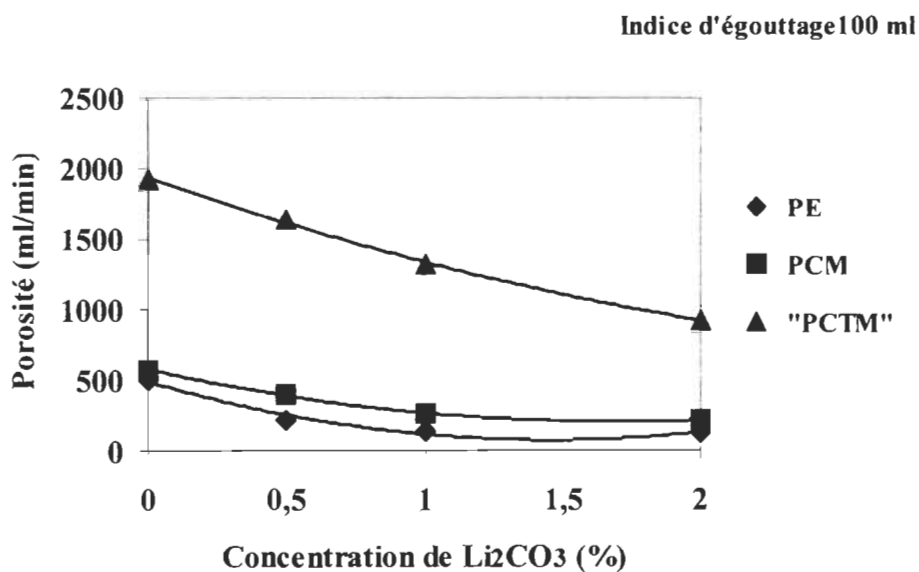


Figure 4.7 Porosité en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

Les plus grandes valeurs de la porosité ont été obtenues avec la pâte "PCTM" (de 2000 ± 140 à 900 ± 67 ml/min). Les deux autres pâtes, PE et PCM, démontrent une porosité similaire et de beaucoup inférieure (d'environ 500 ± 35 à 200 ± 14 ml/min) à celle obtenue avec la "PCTM".

4.1.5 Propriétés mécaniques

La résistance à la déchirure est fortement influencée par la longueur des fibres mais dépend aussi de la force des liens fibre à fibre [17]. L'explosion contribue à la défibrillation sans endommager la longueur des fibres [23]. Grâce à ce défibrage partiel, le temps de raffinage de la PE pour obtenir un indice d'égouttage donné, est moins élevé que les autres pâtes. La coupe due au raffinage, occasionne une diminution flagrante de la longueur des fibres . Un temps de raffinage plus court préserve donc une longueur moyenne des fibres plus élevée.

On voit à la figure 4.8 que l'indice de déchirure diminue avec la diminution de l'indice d'égouttage. De plus, une augmentation de la concentration de l'agent de cuisson entraîne aussi une diminution du temps de raffinage, puisqu'il aide à la défibrillation en ramollissant la lignine. L'agent de cuisson permet également de renforcer les liens interfibrilles. On observe que l'addition de 0,5% de Li_2CO_3 a très peu d'influence sur l'indice de déchirure si l'on compare ces résultats à 0% de carbonate de lithium. Cependant, les résultats à 1 et 2% de Li_2CO_3 une augmentation significative de l'indice de déchirure. L'erreur expérimentale $2\sigma = 4 \%$ (avec 95% de confiance).

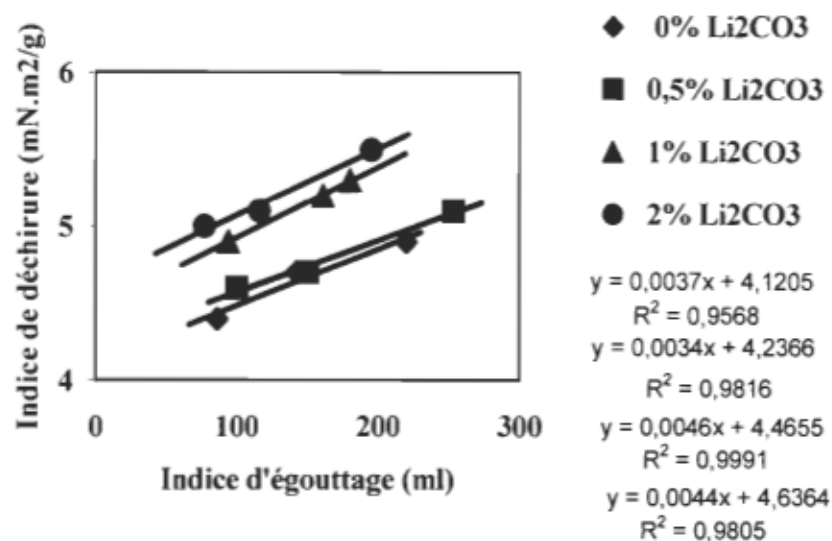


Figure 4.8 Indice de déchirure de la PE en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation.

Tel qu'il est présenté à la figure 4.9, pour la concentration 0% de Li_2CO_3 , la PE et la PCM montrent la résistance à la déchirure similaire ($4,5 \pm 0,2 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ - PE, $4,1 \pm 0,2 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ -PCM), mais plus grande que la PCTM. ($2,4 \pm 0,1 \text{ mN.m}^2/\text{g}$).

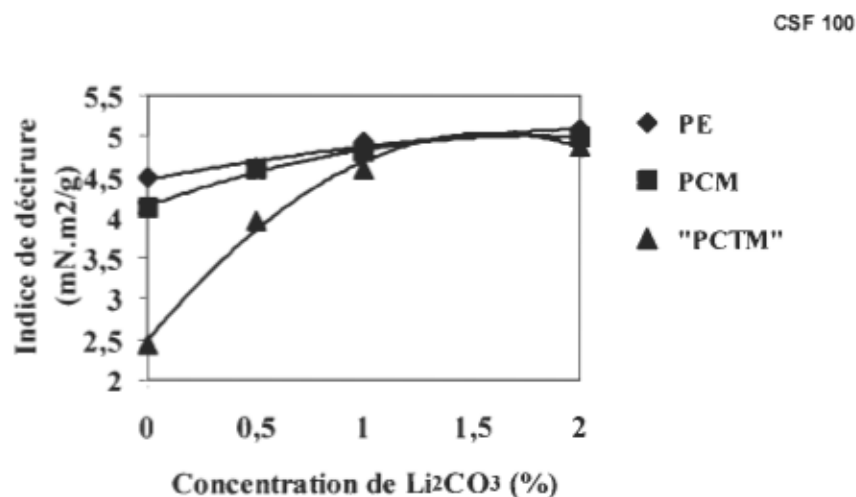


Figure 4.9 Indice de déchirure en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

Lorsqu'on augmente la concentration du Li_2CO_3 , les valeurs de l'indice de déchirure augmentent pour toutes les pâtes et l'écart de résistance entre ces trois pâtes diminue. Pour 2% de Li_2CO_3 , l'indice de déchirure des trois pâtes demeure sur le même niveau ($5.1 \pm 0,2 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ pour la PE, $5.0 \pm 0,2 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ pour la PCM et $4.9 \pm 0,2 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ pour la "PCTM").

La résistance à l'éclatement est en fonction de la longueur des fibres et surtout de l'adhésion fibre à fibre [34]. À la figure 4.10, on observe une diminution de l'indice d'éclatement avec une augmentation de l'indice d'égouttage. Un temps de raffinage plus long améliore la résistance à l'éclatement.

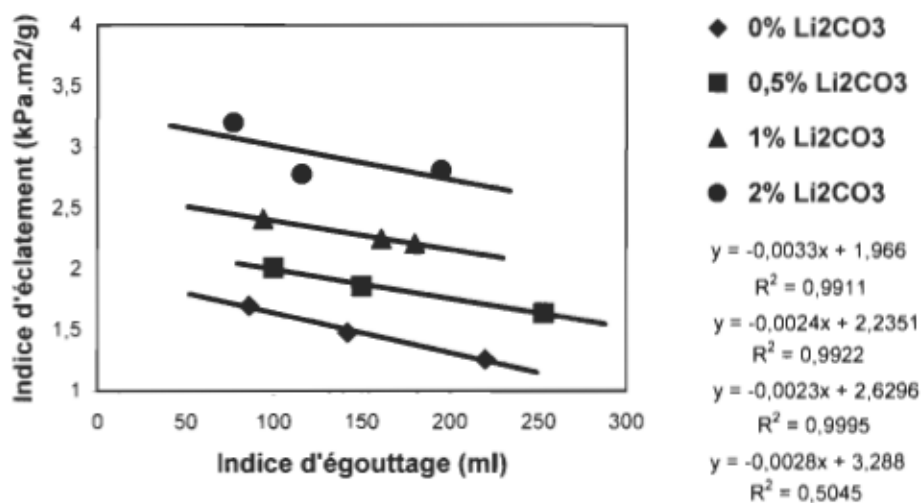


Figure 4.10 Indice d'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li_2CO_3 dans la solution d'imprégnation .

La figure 4.11 présente les variations de l'indice d'éclatement en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" avec l'indice d'égouttage de 100 ml. À 8% de Na_2SO_3 on distingue un petit écart en faveur de la PE par rapport aux deux autres pâtes. Pour la PE, l'indice d'éclatement est $1,64 \pm 0,1 \text{ kPa.m}^2/\text{g}$ et, pour la PCM, il est égal $1,27 \pm 0,08 \text{ kPa.m}^2/\text{g}$. Ceci porte à croire que l'explosion de la paille a eu un effet significatif favorable à la création de contact entre les fibres. L'explosion

d'une pâte favorise l'augmentation de la surface spécifique des fibres à cause de la défibration partielle déjà imposée avant le raffinage. Une grande surface spécifique permet de meilleurs contacts et une meilleure adhésion entre les fibres.

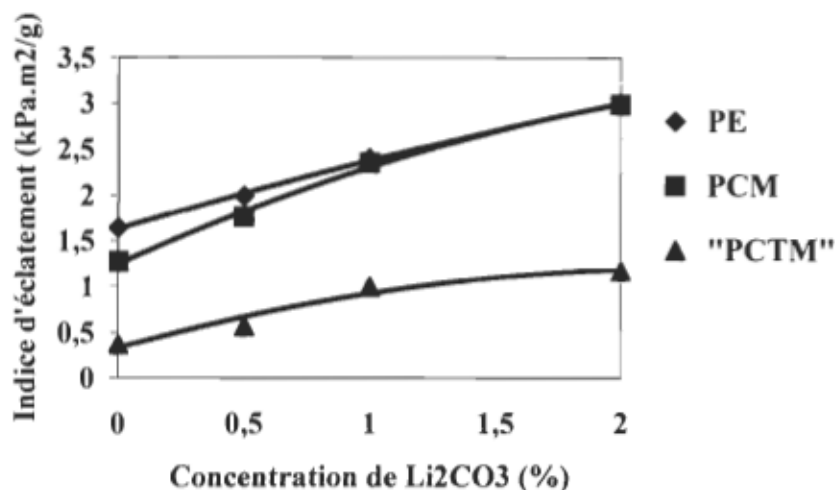


Figure 4.11 Indice d'éclatement en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

À une concentration de Li_2CO_3 de 2 %, les valeurs de l'indice d'éclatement pour la PE et la PCM sont égales de $3,0 \pm 0,2 \text{ kPa.m}^2/\text{g}$. L'agent chimique conditionne alors davantage les fibres que l'explosion peut le faire. Les fibres sont bien gonflées, plus souples, mieux ramollies pour favoriser les enchevêtrements et l'adhésion. De plus, elles sont mieux conditionnées pour le raffinage.

Les mêmes paramètres qui influencent le plus l'indice d'éclatement et la longueur de rupture soit la longueur des fibres et surtout les liaisons entre les fibres.

Les variations de la longueur de rupture en fonction de l'indice d'égouttage de la pâte PE sont illustrées à la figure 4.12.

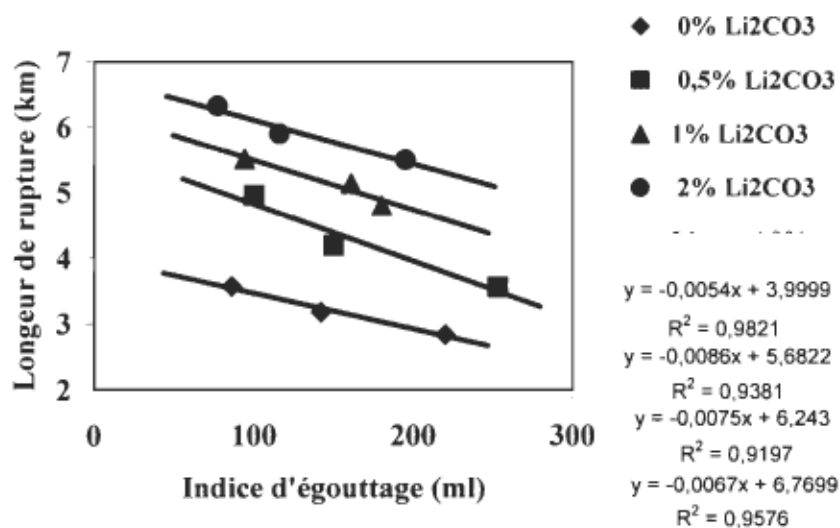


Figure 4.12 Longueur de rupture en fonction de l'indice d'égouttage pour les différentes concentrations de Li₂CO₃ dans la solution d'imprégnation .

La longueur de rupture augmente avec la diminution de l'indice d'égouttage. Un raffinage plus long provoque une fibrillation externe plus poussée et mène aux meilleurs liaisons fibre à fibre. L'addition du carbonate de lithium améliore également la longueur de rupture. Un bon gonflement des fibres cause une fibrillation interne ce qui augmente la flexibilité des fibres.

Pour le même IE de 100 ml (figure 4.13), on observe que la PE et PCM sont avantageuses par rapport à la "PCTM". La longueur de rupture pour la PE avec Na₂SO₃ seul est $3,5 \pm 0,2$ km, pour la PCM $-3,2 \pm 0,2$ km et, la plus petite, pour la "PCTM" égale $1,4 \pm 0,1$ km.

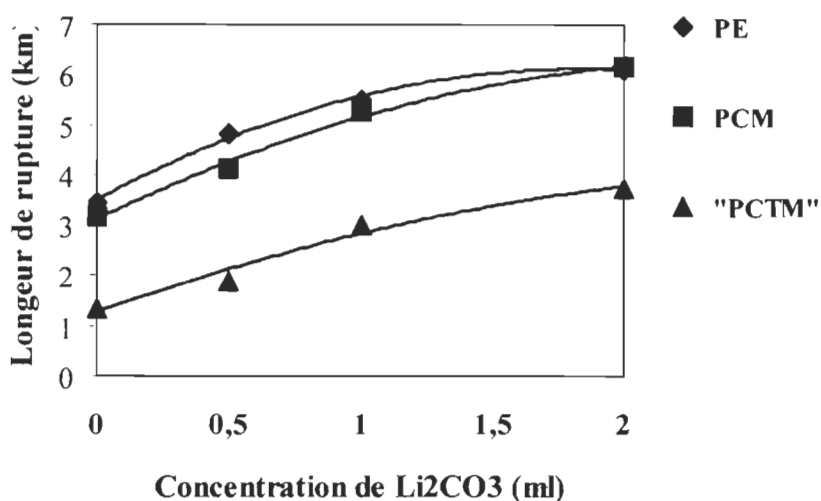


Figure 4.13 Longueur de rupture en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml)

Les résultats de la PE et PCM sont très proches pour les concentrations 0, 0,5 et 1% de carbonate de lithium. À 2% de Li_2CO_3 , leurs valeurs de la longueur de rupture deviennent identiques ($6.1 \pm 0,3$ km - PE, $6.2 \pm 0,3$ km - PCM).

La figure 4.14 illustre les variations de l'indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" avec les différentes concentrations de Li_2CO_3 . Cette relation indique la qualité des papiers et la mise en pâte. On peut constater que l'augmentation de la concentration de carbonate de lithium améliore la résistance du papier pour chaque type de pâte. Cependant, les meilleurs qualités papetières ont été obtenues à l'aide des PE et PCM. Ces deux pâtes donnent des résultats très proches. Pour les pâtes avec seulement Na_2SO_3 , on voit un très petit écart entre les PE et PCM. Pour les pâtes avec la concentration de Li_2CO_3 plus élevée, la différence disparaît. Ceci démontre encore la puissance du carbonate de lithium comme agent de gonflement. Les meilleures valeurs, de l'indice de déchirure et de la longueur de rupture ont été obtenues avec la PE ($5,1 \pm 0,2$ mN.m²/g et $6.1 \pm 0,3$ km) et la PCM ($5,0 \pm 0,2$ mN.m²/g et $6,2 \pm 0,3$ km).

km) contenant 2% de Li_2CO_3 . La "PCTM" présente qualités inférieures comparativement aux deux autres pâtes.

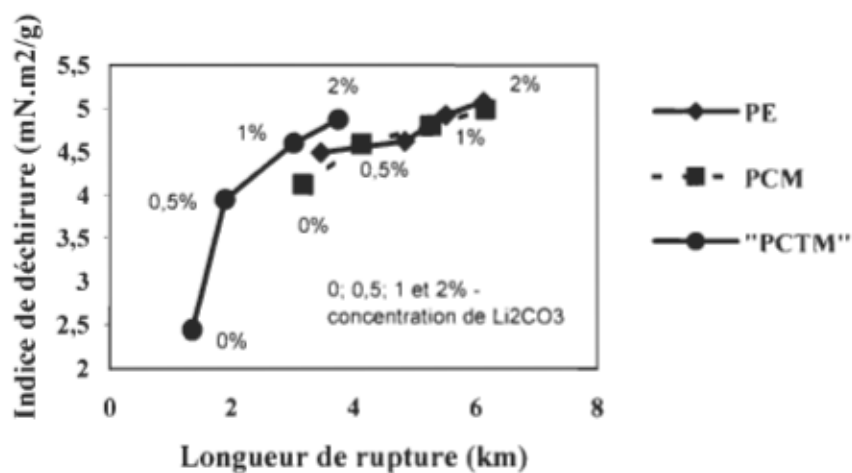


Figure 4.14 Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour les pâtes avec l'indice d'égouttage de 100 ml et les différentes concentrations de Li_2CO_3 .

4.1.6 Propriétés optiques

La figure 4.15 illustre les variations de la blancheur des feuilles de 3 g et de 1,2 g en fonction de la concentration du carbonate de lithium pour chaque type de pâte.

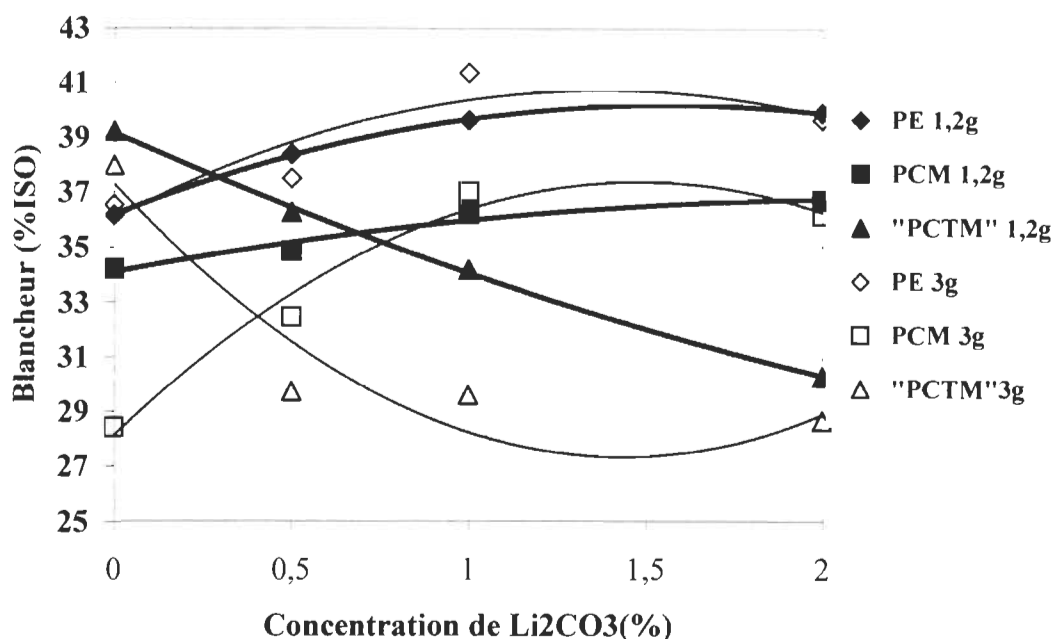


Figure 4.15 Blancheur en fonction de la concentration de Li_2CO_3 des feuilles de 3 et 1,2 g pour les pâtes PE, PCM et "PCTM".

Dans le cas de l'imprégnation avec le sulfite de sodium seul, la meilleur blancheur a été obtenue avec la "PCTM", 39 % ISO. La PCM et, ensuite, la PE montrent la blancheur plus petite. Cependant, avec l'augmentation de la concentration de Li_2CO_3 , la blancheur des pâtes PE et PCM s'améliore et, à 2% de Li_2CO_3 , un résultat de 40 % ISO a été observé pour la PE. Cet accroissement de la blancheur peut être causé par la perte de la lignine lors de la mise en pâte, car on observe aussi une baisse du rendement des pâtes. Ce niveau de la blancheur est trop petit pour produire le papier journal. Cependant, après le blanchiment au peroxyde d'hydrogène [38] la pâte PE (1 % de Li_2CO_3) le papier de panic érigé donne une blancheur 55 % ISO. Pour la "PCTM", on voit un phénomène inversé, la blancheur diminue avec l'addition du carbonate de lithium. Ce phénomène peut être causé par le développement des groupement chromophores. La même tendance se présente pour les feuilles de 1,2 g et de 3 g.

Dans la plupart des cas, avec une augmentation de la blancheur l'opacité diminue. Ce phénomène a déjà été identifié dans la littérature [39]. La figure 4.16 présente les

changements d'opacité des PE, PCM et "PCTM" en fonction du pourcentage de Li_2CO_3 . Dans le cas de la "PCTM", on observe que même la blancheur diminue, la opacité diminue aussi. Cette diminution peut être provoqué par l'adhésion des fibres qui s'améliore avec augmentation de la concentration du Li_2CO_3 .

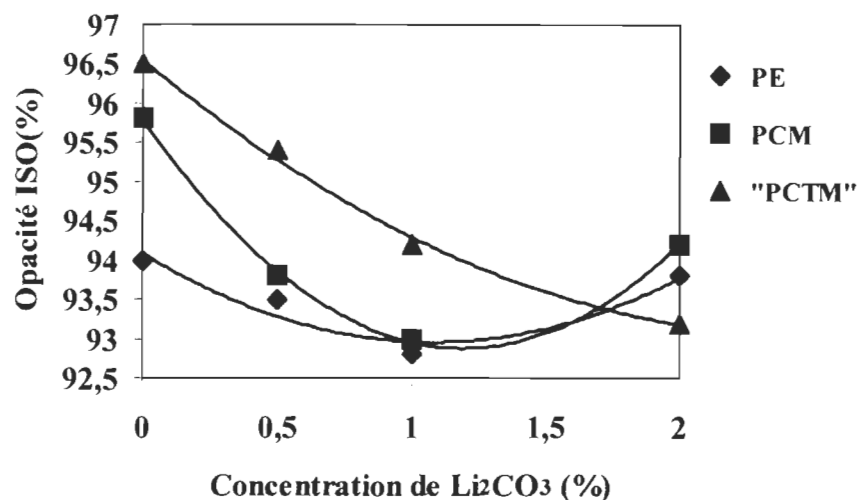


Figure 4.16 Variations de l'opacité en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour les PE, PCM et "PCTM".

Pour la plupart des tests, l'opacité diminue avec l'augmentation du carbonate de lithium, sauf pour l'échantillon contenant 2% de Li_2CO_3 , où l'opacité augmente pour les PE et PCM. Ce dernier phénomène est surprenant et, pour instant, difficile à expliquer. Pour la concentration de 1% de Li_2CO_3 , la meilleure opacité (94%) a été obtenue avec la "PCTM". Les pâtes PE et PCM possède les mêmes valeurs de l'opacité, 93 %. La diminution d'opacité, dans le cas des trois pâtes, peut être provoqué par la bonne adhésion des fibres qui s'améliore avec augmentation de la concentration du Li_2CO_3 .

Le coefficient de diffusion de la lumière (CDL) détermine des liaisons interfibres. L'augmentation des liens interfibres est associée à la diminution du coefficient de diffusion de la lumière. La figure 4.17 montre CDL en fonction de la concentration du carbonate de lithium pour trois pâtes la PE, la PCM et la "PCTM".

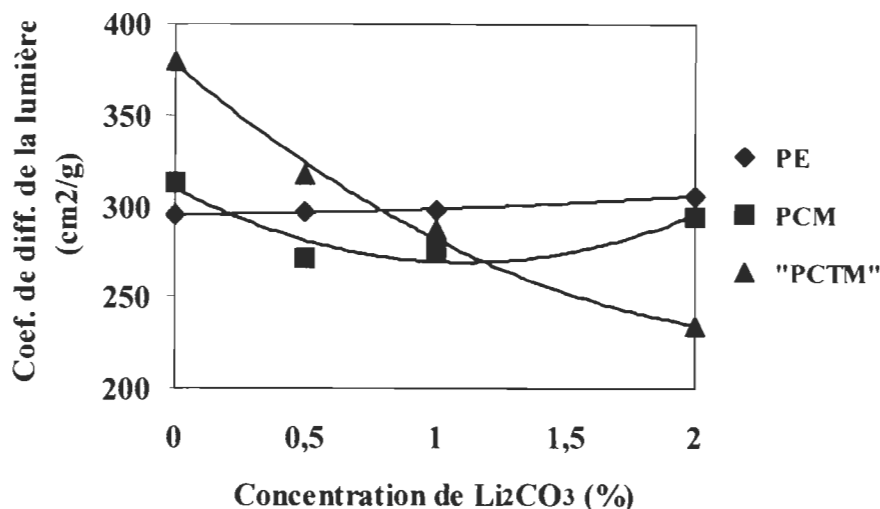


Figure 4.17 Variations du coefficient de diffusion de la lumière en fonction de la concentration de Li_2CO_3 pour PE, PCM et "PCTM" (l'indice d'égouttage 100 ml).

Pour la pâte "PCTM", la présence de Li_2CO_3 diminue le CDL de 380 ± 23 à $230 \pm 14 \text{ cm}^2/\text{g}$. Les pâtes PE et PCM montrent les valeurs du coefficient très proches, d'environ $300 \pm 18 \text{ cm}^2/\text{g}$, pour chaque concentration de Li_2CO_3 . Le carbonate de lithium influence l'adhésion fibre à fibre. Cependant, on pourrait avoir interaction différente sur les surfaces chimiquement différentes, comme la surface des fibres de la "PCTM" et deux autres pâtes (PE et PCM).

4.1.7 Sulfonation des pâtes

Les propriétés des pâtes et du papier dépendent significativement de la composition de la surface des fibres et du taux des groupements hydrophiliques contenus dans la pâte. Le taux d'acide sulfonique indique le niveau de sulfonation de la lignine. Étant donné que la lignine est rigide et ne forme pas de lien fort avec les autres fibres de cellulose, la sulfonation permet d'augmenter sa flexibilité et de créer des ponts hydrogène. La haute température et le traitement chimique favorisent la sulfonation. Cependant, la lignine peut aussi être dissoute dans la liqueur de cuisson. Le taux d'acide carboxylique indique le niveau d'hydrolyse des hémicelluloses. L'hydrolyse fractionne les molécules des

hemicelluloses et peut causer des pertes. Par contre, le groupement carboxylique est hydrophile. Il facilite la formation de liens hydrogènes durant la formation du papier.

Le tableau 4.1 résume les valeurs obtenues pour l'analyse en contenu d'acide sulfonique et carboxylique dans les différentes pâtes étudiées.

Tableau 4.2 Taux des ions sulfoniques et carboxyliques dans les pâtes EP, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% Na_2SO_3 et 0%, 0.5%, 1% et 2% Li_2CO_3 .

Pâtes	Concentr. de Li_2CO_3 (%)	Ions sulfoniques mmol/kg	Ions carboxyliques mmol/kg	Total d'ions (mmol/kg)
PE	0	101,8	101,8	203,6
	0,5	50,9	148,5	199,4
	1	47,2	120,1	167,3
	2	21,8	114,5	136,3
PCM	0	104,9	123,6	228,5
	0,5	79,2	136,3	215,5
	1	53,6	148,9	202,5
	2	27,8	114,6	142,4
"PCTM"	0	121,7	125,5	247,2
	0,5	97,1	163,7	260,8
	1	78,8	200,0	278,8
	2	73,5	209,6	283,1

Le taux d'acide sulfonique diminue avec augmentation de la concentration du Li_2CO_3 . Normalement ce taux devrait augmenter avec l'action de l'agent chimique plus concentré. On suppose donc qu'il y a une perte de la lignine, car le rendement aussi diminue avec l'augmentation de la concentration de l'agent. La figure 4.18 illustre une baisse en contenu des ions sulfoniques en fonction du rendement des pâtes. La pâte PE (2% de Li_2CO_3) qui possède le plus petit rendement montre aussi le plus bas contenu en ions sulfoniques. Cependant, la PE représente les meilleures propriétés mécaniques et optiques.

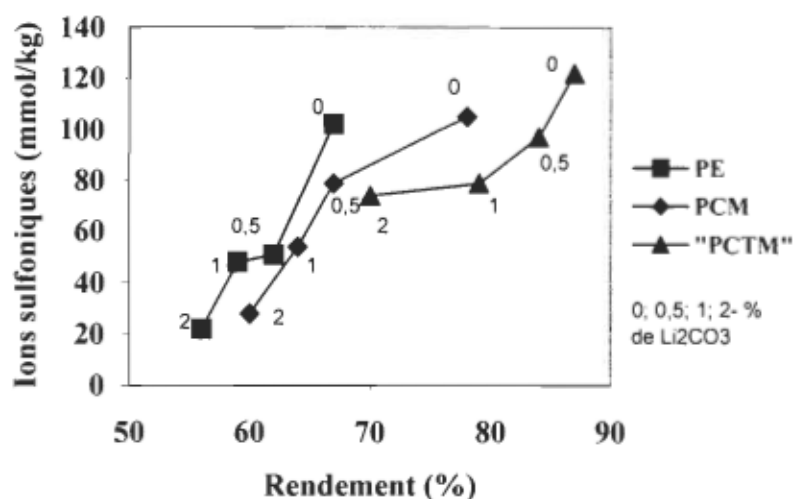


Figure 4.18 Taux des ions sulfoniques en fonction du rendement des pâtes PE, PCM et "PCTM" pour différentes concentrations de Li_2CO_3 .

Les PE et PCM possèdent de bonnes qualités papetières même si elles ont un bas contenu en ions totales. La figure 4.19 montre la longueur de rupture en fonction du contenu en ions totales pour les trois pâtes.

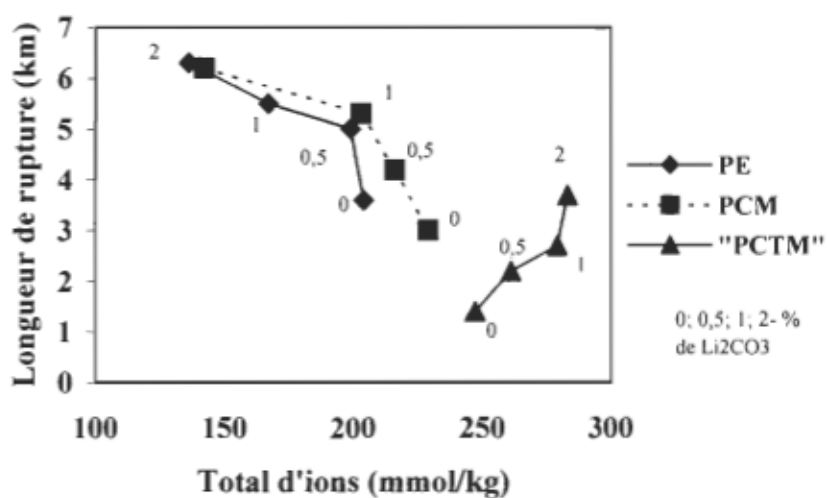


Figure 4.19 Variations de la longueur de rupture en fonction du taux des ions totales pour les PE, PCM et "PCTM".

Pour les PE et PCM la longueur de rupture accroît avec la diminution du taux des ions. Contrairement, la "PCTM" avec l'augmentation du contenu en ions montre une croissance de la longueur de rupture. En plus, la "PCTM" contient la plus grande concentration en ions mais sa longueur de rupture atteint des valeurs beaucoup plus petites que pour les pâtes PE et PCM. Pour les pâtes PCM et PE avec l'augmentation de l'hydrolyse des ions sulfoniques, le nombre des ions hydrophyliques (OH^-) augmente aussi ce qui provoque de meilleures liaisons interfibrilles. Dans les cas "PCTM" on a situation complètement différente, avec un peu d'hydrolyse des ions sulfoniques. On peut accéder à un papier de plus haute qualité au détriment de rendement ou obtenir un rendement plus élevé avec un papier de moindre qualité.

4.1.8 Effet du temps de cuisson et du ratio lessive/pâte sur les propriétés de PE.

La pâte PE qui a été cuite pendant 4 min avec le ratio lessive/pâte 4 représente de bonnes qualités papetières, mais son rendement est très bas. On tente alors de réduire la perte du rendement en baissant la sévérité de cuisson. On applique dans le procédé de mise en pâte le temps de cuisson de 1 min et le ratio lessive/pâte 3 sur la pâte imprégnée avec sulfite de sodium et 1% de carbonate de lithium. Le tableau 4.2 résume les résultats obtenus.

Tableau 4.3 Propriétés de la PE cuite 1 min et 4 min avec les différents ratios L/P.

Propriété	PE L/P-3, cuisson -1 min	PE L/P-4, cuisson - 4 min
Rendement (%)	65	59
Énergie spécifique de raffinage (MJ/kg)	0,94	0,81
Densité (kg/m^3)	217	288
Indice d'éclatement ($\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)	1,2	2,4
Indice de déchirure ($\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)	6,6	4,9
Longueur de rupture (km)	3,2	5,5
Blancheur (% ISO)	38,8	39,6

La PE cuite 1 min et avec ratio L/P 3 montre un rendement plus élevé que la PE cuite 4 min et avec ratio L/P 4. Cependant, cette augmentation en rendement (6%) n'est pas très significative. La valeur de l'indice de déchirure augmente également, mais d'autres propriétés de PE se détériorent. L'indice d'éclatement diminue de 50% et la longueur de rupture - de 40%. La diminution du ratio L/P et du temps de cuisson diminue les propriétés de force et augmente la consommation d'énergie de raffinage [40].

4.2 EFFET DU ZnCO_3 DANS LA MISE EN PÂTE D'EXPLOSION DU PANIC ÉRIGÉ EN COMPARAISON AVEC Li_2CO_3

4.2.1 Rendement des pâtes

La figure 4.20 présente le rendement de la mise en pâte d'explosion, la pâte chimico-mécanique et chimico-thermomécanique pour les échantillons contenant une concentration de 1% de ZnCO_3 . Comme dans le cas de l'imprégnation avec le carbonate de lithium, le carbonate de zinc, a donné le meilleur rendement avec la "PCTM" (80%). La PCM suit avec 75%. La PE présente le rendement le plus faible avec 64%.

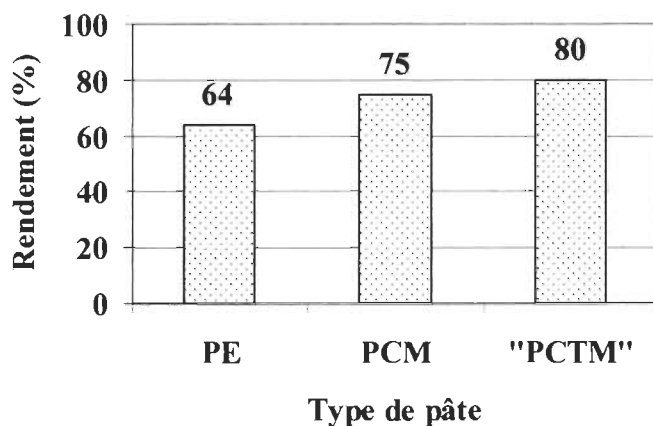


Figure 4.20 Rendement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% Na_2SO_3 et 1% ZnCO_3

Le rendement diminue avec la sévérité du traitement représentée par la température de la cuisson. Le traitement en phase vapeur à température élevée cause des pertes de la matière par dégradation des hémicelluloses et aussi par dissolution de la lignine.

La figure 4.21 illustre la comparaison des rendements pour les différentes solutions d'imprégnation. Les pâtes fabriquées avec le carbonate de zinc possèdent des rendements plus faible que les pâtes fabriquées seulement avec sulfite de sodium. Le carbonate de lithium réduit les rendements encore plus que le carbonate de zinc. Ce phénomène peut être causé par l'hydrolyse de la lignine et des hémicelluloses [41].

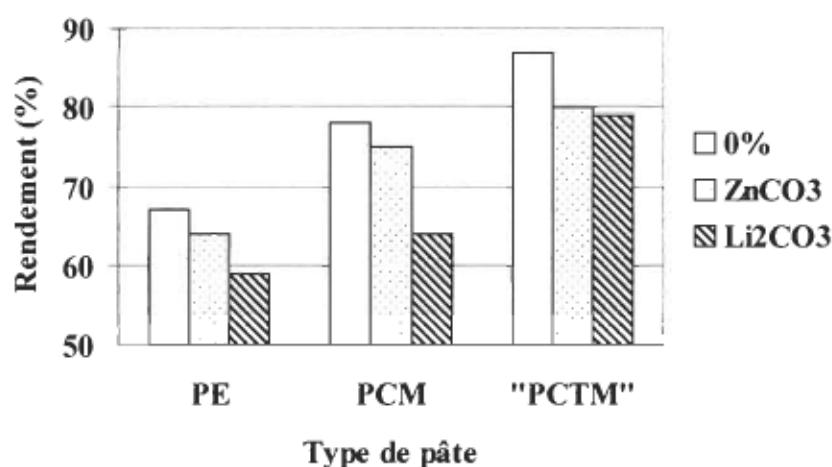


Figure 4.21 Rendement des pâtes PE, PCM et "PCTM" pour trois solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

4.2.2 Énergie spécifique de raffinage

L'énergie spécifique de raffinage (ESR) diminue avec l'augmentation de l'indice d'égouttage. La figure 4.21 illustre l'influence de la consommation d'énergie de raffinage sur l'indice d'égouttage pour chaque type de pâte.

Pour obtenir un indice d'égouttage de 100 ml avec 1% de ZnCO₃, la PE requiert moins d'énergie (1,6 ±0,1 MJ/kg) que la PCM (2,7 ±0,1 MJ/kg). La "PCTM" utilise près de deux fois plus d'énergie (6,6 ±0,3 MJ/kg). La haute température contribue au

ramollissement de la lignine durant la cuisson et facilite le raffinage. Les températures de cuisson de la PE et la PCM, 190°C et 150°C respectivement, dépassent la température de transition vitreuse de la lignine et celle-ci devient plastique.

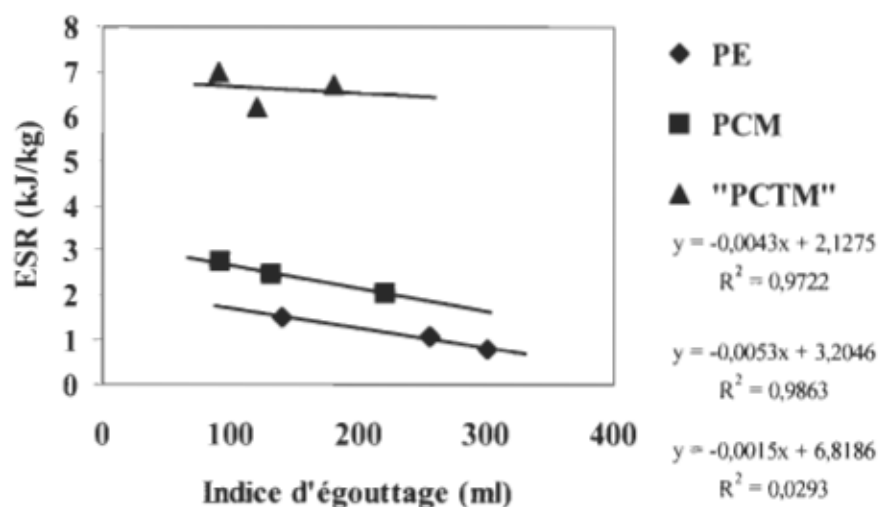


Figure 4.22 Variations de l'énergie spécifique de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnée avec de 1% de ZnCO_3 .

On voit qu'à la figure 4.23, la présence de carbonate de zinc dans la solution d'imprégnation ne diminue pas la consommation d'énergie de raffinage. Les pâtes PE et PCM traitées avec le ZnCO_3 requièrent plus d'énergie que celles traitées avec du Na_2SO_3 seulement. Le carbonate de zinc n'est pas un puissant agent de gonflement [13]. Les fibres ne se ramollissent pas assez bien. Ceci empêche la défibrage et nécessite une énergie plus haute. La plus basse consommation d'énergie est observée avec les pâtes imprégnées avec de Li_2CO_3 . Cet agent à diffusion chimique rapide mène à un bon gonflement et ramollissement des fibres. Dans le cas de la "PCTM", la présence du ZnCO_3 entraîne une baisse d'énergie de raffinage.

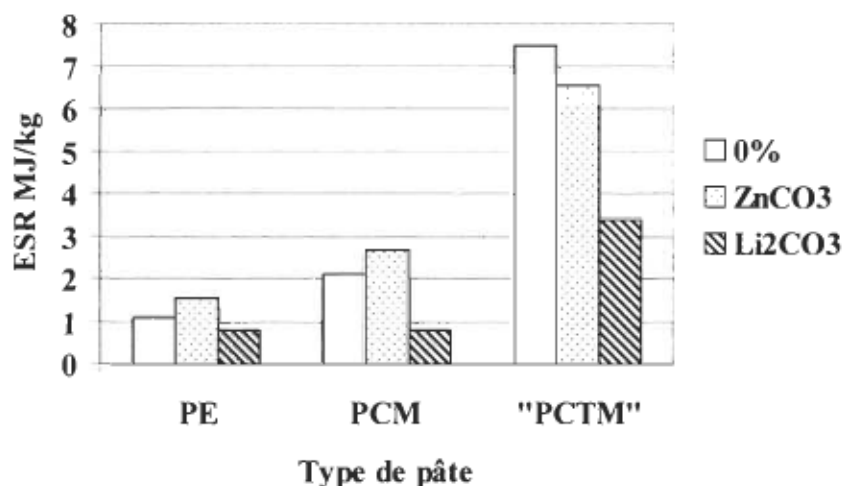


Figure 4.23 Énergie spécifique de raffinage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" et pour trois solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

4.2.3 Densité

La densité du papier est directement liée à la flexibilité des fibres. Comme l'illustre la figure 4.24, les valeurs de la densité pour la PE et PCM sont pareilles. Pour la PE, l'addition du ZnCO₃ à la solution d'imprégnation ne change pas la densité. La PE traitée avec du Na₂SO₃ seulement donne du papier de $248 \pm 10 \text{ kg/m}^3$. Le traitement par la solution contenant du Na₂SO₃ et du ZnCO₃ donne une densité de $240 \pm 10 \text{ kg/m}^3$. La flexibilité des fibres n'a pas été affectée par l'addition du ZnCO₃. En comparant l'effet du ZnCO₃ et du Li₂CO₃, on voit que ce dernier donne une densité plus élevée d'environ 20%.

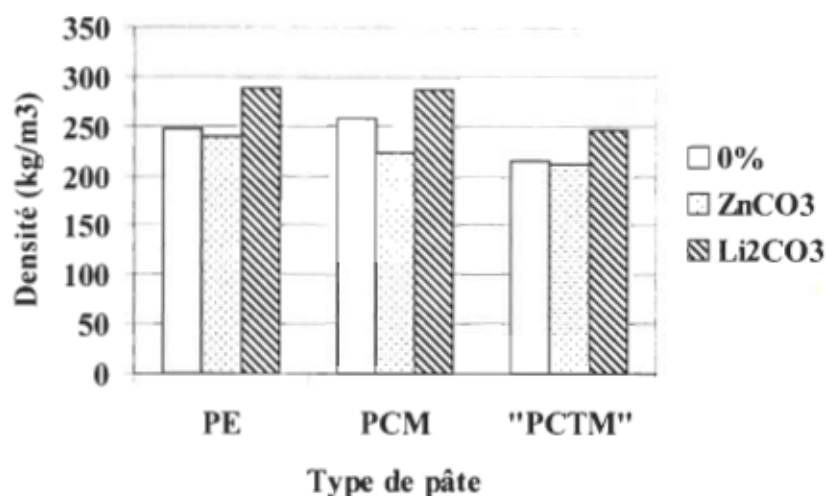


Figure 4.24 Densité des pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

4.2.4 Propriétés mécaniques

L'addition de 1% de ZnCO₃ à la solution d'imprégnation ne démontre aucun avantage pour les pâtes PE et PCM. Comme l'illustre la figure 4.25, pour le même indice d'égouttage, l'indice d'éclatement est inférieur par rapport aux pâtes contenant seulement du Na₂SO₃ dans la solution. Pour l'indice d'égouttage de 100 ml, les valeurs de l'indice d'éclatement de la PE sont $1,1 \pm 0,1$ kPa.m²/g (avec ZnCO₃) et $1,6 \pm 0,1$ kPa.m²/g (seulement Na₂SO₃). La PCM ne montre pas beaucoup de différences au niveau de la résistance à l'éclatement. Ces valeurs sont $1,0 \pm 0,1$ kPa.m²/g (avec ZnCO₃) et $1,3 \pm 0,1$ kPa.m²/g (seulement Na₂SO₃). Dans le cas de la "PCTM", on n'observe pas aussi de changement significatif de l'indice d'éclatement avec la présence de ZnCO₃ ($0,4 \pm 0,02$ kPa.m²/g- seulement Na₂SO₃, $0,6 \pm 0,04$ kPa.m²/g- avec ZnCO₃) .

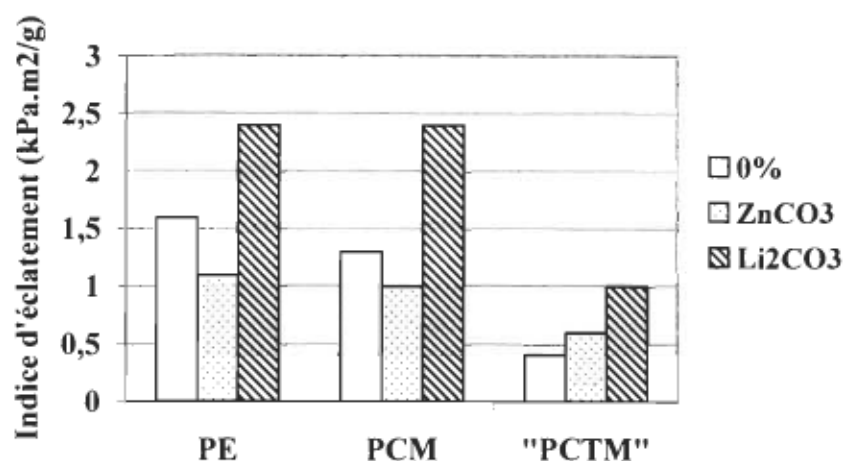


Figure 4.25 Indice d'éclatement des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

L'addition de Li₂CO₃, par rapport aux autres solutions d'imprégnation, augmente beaucoup la résistance à éclatement, surtout pour les PE et PCM.

La figure 4.26 représente l'indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour les trois pâtes et deux solutions d'imprégnation, avec 1% de ZnCO₃ et 1% Li₂CO₃.

La PE avec ZnCO₃ possède un indice de déchirure le plus élevé, $6,8 \pm 0,3$ Nm.m²/g, mais la longueur de rupture pour ce point fait seulement $3,2 \pm 0,2$ km. Pour la même pâte, mais en utilisant le Li₂CO₃, on obtient un indice de déchirure de $5,5 \pm 0,2$ Nm.m²/g et une longueur de rupture de $5,0 \pm 0,3$ km. La pâte traitée avec le Li₂CO₃ présente des propriétés mécaniques supérieures à celle traitée avec le ZnCO₃. Le carbonate de lithium est un agent ramollissant plus puissant que le carbonate de zinc. Selon la référence [13], la pâte imprégnée avec le Li₂CO₃ obtient les meilleurs résultats pour les caractéristiques de rétention d'eau et de point de saturation des fibres. Ceci démontre que le développement de la surface spécifique des fibres est plus influencé par cet agent.

Quand les fibres sont bien assouplies, elles ont une bonne élasticité et elles se conforment mieux durant la fabrication des feuilles et produisent de fortes liaisons.

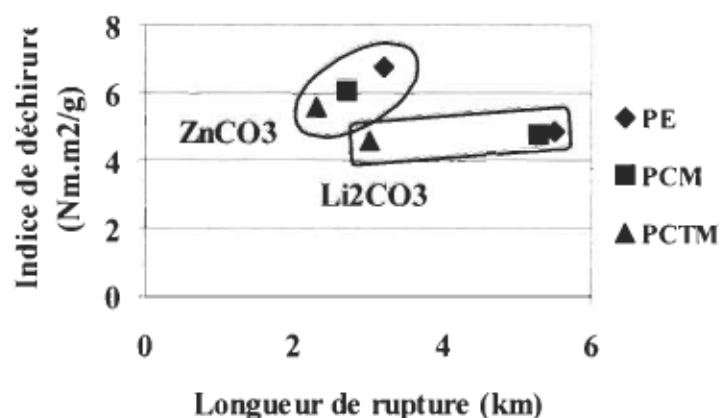


Figure 4.26 Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture des pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% de Na_2SO_3 et 1% de ZnCO_3 ou 8% de Na_2SO_3 et 1% Li_2CO_3 .

4.2.5 Propriétés optiques

La figure 4.27 illustre les variations de la blancheur des pâtes PE, PCM et "PCTM" en fonction de l'indice d'égouttage. La meilleure blancheur est observée avec la PE qui fait 37,4 % ISO pour un indice d'égouttage de 100 ml. La PCM a une blancheur inférieure de 36 % ISO et la "PCTM", la plus petite, 33 % ISO. Après le blanchiment au peroxyde d'hydrogène (3 %), la blancheur de la PE augmente à 48,8 % ISO.

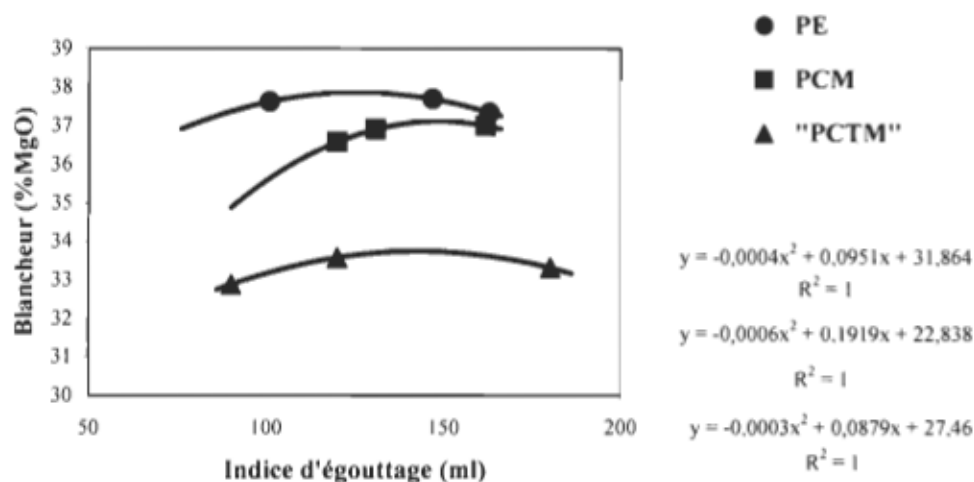


Figure 4.27 Blancheur en fonction de l'indice d'égouttage pour les pâtes imprégnées avec 8% de Na₂SO₃ et 1% de ZnCO₃

La figure 4.28 montre la blancheur pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec 8% de Na₂SO₃ seulement, 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

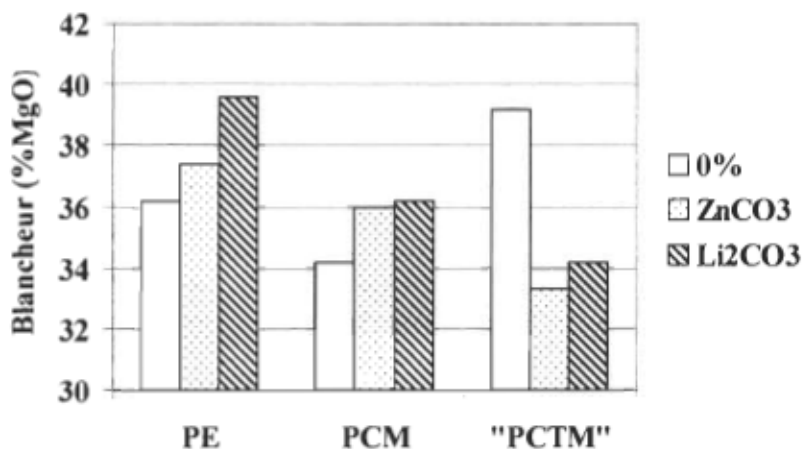


Figure 4.28 Blancheur des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

Pour la PE et PCM, en comparaison avec d'autres solutions, la présence de ZnCO_3 améliore la blancheur comparativement à une pâte qui n'est traitée qu'avec du Na_2SO_3 . Cependant, dans le cas de la PE, le carbonate de lithium améliore la blancheur encore plus. Pour la "PCTM", l'addition du ZnCO_3 ou Li_2CO_3 provoque une diminution de la blancheur, mais ses valeurs sont pareils à celles de la PCM.

La figure 4.29 démontre les valeurs d'opacité pour les trois pâtes et différentes solutions d'imprégnation. L'addition du carbonate de zinc ou du carbonate de lithium à la solution d'imprégnation entraîne une diminution de l'opacité. La présence ces deux agents améliore l'adhésion des fibres. La PE, pour laquelle l'opacité est la plus petite, a une opacité de 92 % avec l'utilisation du ZnCO_3 , 93 % avec Li_2CO_3 et 94 % avec Na_2SO_3 seulement.

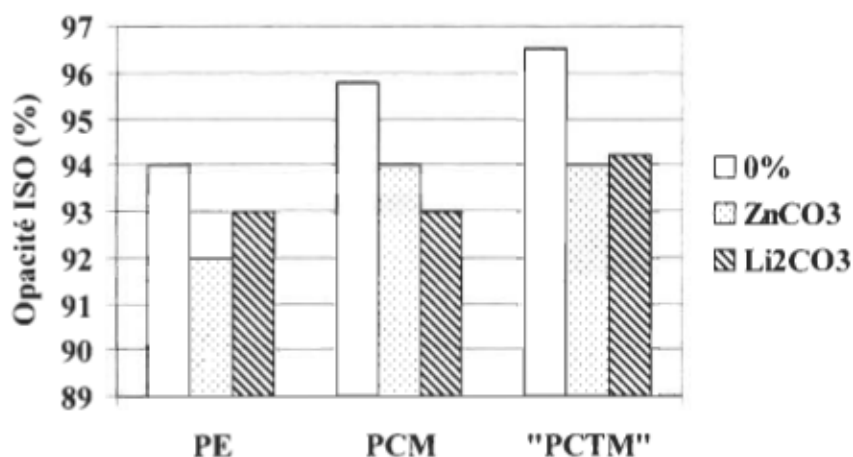


Figure 4.29 Opacité des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na_2SO_3 seulement (0%), 8% de Na_2SO_3 plus 1% de ZnCO_3 et 8% de Na_2SO_3 plus 1% Li_2CO_3 .

La figure 4.30 montre le coefficient de diffusion de la lumière des pâtes PE, PCM et "PCTM" imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation. Dans le cas de la PE et PCM la présence ni de carbonate de zinc ni de carbonate de lithium n'améliorent le

CDL. Les valeurs sont d'environ $300 \pm 18 \text{ cm}^2/\text{g}$, pour chacune des solutions. Seulement pour la "PCTM", on observe une diminution du CDL avec l'utilisation deux agents.

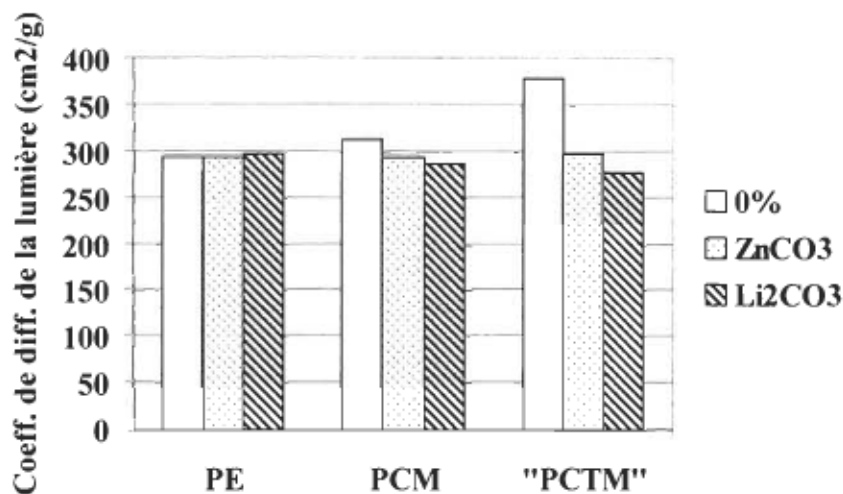


Figure 4.30 Coefficient de diffusion de la lumière des pâtes PE, PCM et PCTM imprégnées avec différentes solutions d'imprégnation: 8% de Na₂SO₃ seulement (0%), 8% de Na₂SO₃ plus 1% de ZnCO₃ et 8% de Na₂SO₃ plus 1% Li₂CO₃.

4.3 COMPARAISON DE DIFFÉRENTS AGENTES D'IMPRÉGNATION

Dans le chapitre suivant on compare les principales propriétés des pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec les différentes solutions d'imprégnation. Les solutions sont composées de 8% de Na₂SO₃ et 1% d'un deuxième agent d'imprégnation, comme le carbonate de zinc (ZnCO₃), le carbonate de magnésium (MgCO₃), le carbonate de lithium (Li₂CO₃), le carbonate de sodium (Na₂CO₃) et le bicarbonate de sodium (NaHCO₃). Les résultats pour le MgCO₃, Na₂CO₃ et NaHCO₃ proviennent des études précédentes [10, 11, 12].

4.3.1 Énergie spécifique de raffinage

Les variations de l'énergie de raffinage pour les trois types de pâte et différents agents d'imprégnation sont illustrées à la figure 4.31.

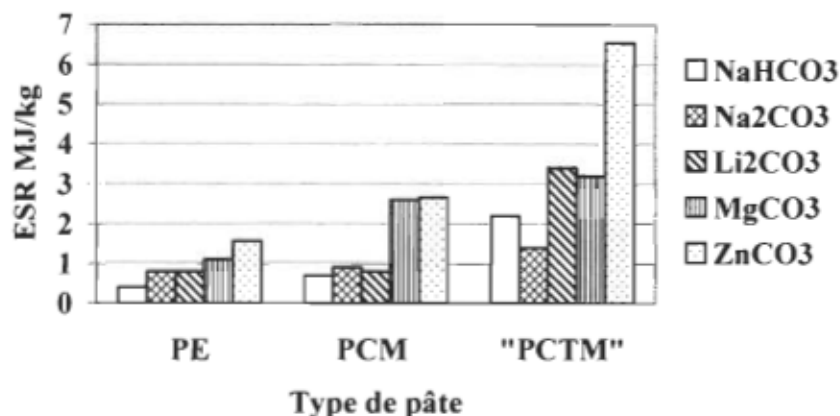


Figure 4.31 Énergie spécifique de raffinage pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.

Pour arriver à un indice d'égouttage de 100 ml, la PE requiert le moins d'énergie. Cependant, pour le même procédé de mise en pâte, on observe des variations de consommation d'énergie provenant de l'utilisation de différents agents d'imprégnation. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le NaHCO₃ ensuite, le Na₂CO₃ et Li₂CO₃. Par rapport aux autres agents, l'addition de ZnCO₃ a entraîné la consommation d'énergie la plus élevée. Il est possible que durant la cuisson le NaHCO₃ augmente le ramollissement des fibres le plus d'où une diminution de l'énergie spécifique de défibrage la plus remarquable.

4.3.2 Rendement

La figure 4.32 présente les valeurs de rendement des pâtes avec l'utilisation de différents agents chimiques dans la solution d'imprégnation. Le meilleur rendement est obtenu avec la "PCTM" pour laquelle les résultats de tout les agents sont rapprochés à environ 80 %. La plus grande perte de rendement est observée dans le cas de la PE. Pour la PE, le carbonate de magnésium mène au rendement de 68% tandis qu'on obtient 62% avec le carbonate de sodium, 59 % avec le carbonate de lithium et 56 % avec le bicarbonate de sodium. Le carbonate de magnésium protège les polysides contre les diverses

dégradation ainsi que l'hydrolyse. Son action protectrice permet donc d'obtenir un rendement supérieur [29].

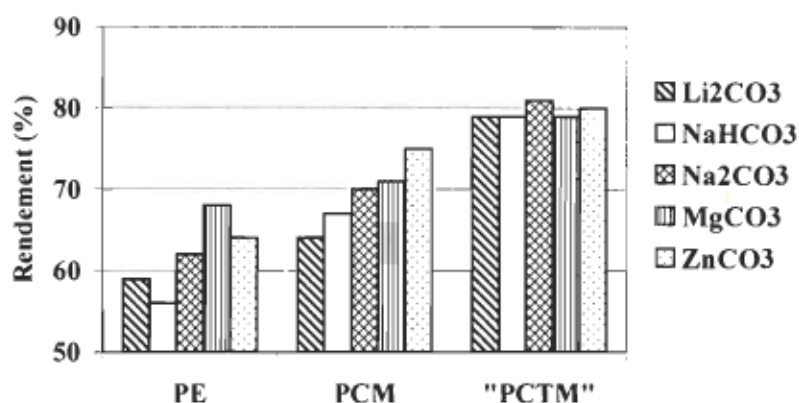


Figure 4.32 Rendement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.

4.3.3 Propriétés mécaniques

L'indice d'éclatement des trois pâtes pour les différents, seconds agents d'imprégnation est illustré à la figure 4.33.

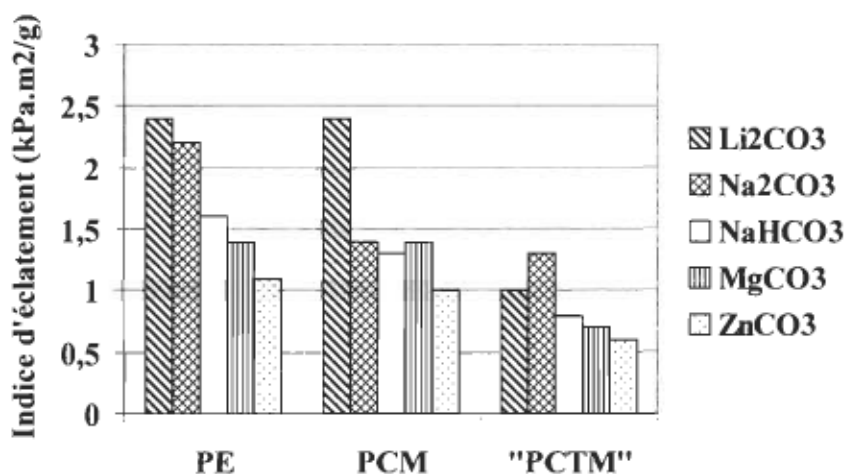


Figure 4.33 Indice d'éclatement pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.

L'addition de carbonate de lithium augmente la résistance à l'éclatement en comparaison avec les autres agents chimiques. Seulement dans le cas de la "PCTM", le meilleur indice d'éclatement est obtenu avec le carbonate de sodium.

L'avantage de l'utilisation du Li_2CO_3 est également observée pour les autres propriétés mécaniques. La figure 4.34 montre les valeurs de l'indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour la PE imprégnée avec les différentes solutions. Les agents comme le NaHCO_3 , le ZnCO_3 et le MgCO_3 donnent des indices de déchirure élevés ($6,8 \pm 0,3 \text{ Nm.m}^2/\text{g}$), mais leurs longueurs de rupture sont relativement petits ($3,2\text{-}3,7 \pm 0,2 \text{ km}$). L'addition du Na_2CO_3 augmente la longueur de rupture ($4,5 \pm 0,2 \text{ km}$) sans diminuer de l'indice de déchirure. Les meilleurs résultats de la longueur de rupture sont observés dans le cas de l'utilisation de Li_2CO_3 ($5,5 \pm 0,3 \text{ km}$). Cependant, son indice de déchirure se situe au niveau de $5,0 \pm 0,2 \text{ Nm.m}^2/\text{g}$. Le carbonate de lithium est un agent de gonflement très efficace. Sa présence dans la solution d'imprégnation provoque une plus grande flexibilité et mène à une surface spécifique élevée des fibres [13]. Ces changements résultent des meilleurs liens interfibres et permet d'améliorer les propriétés de résistance physique de la pâte par rapport aux autres agents d'imprégnation.

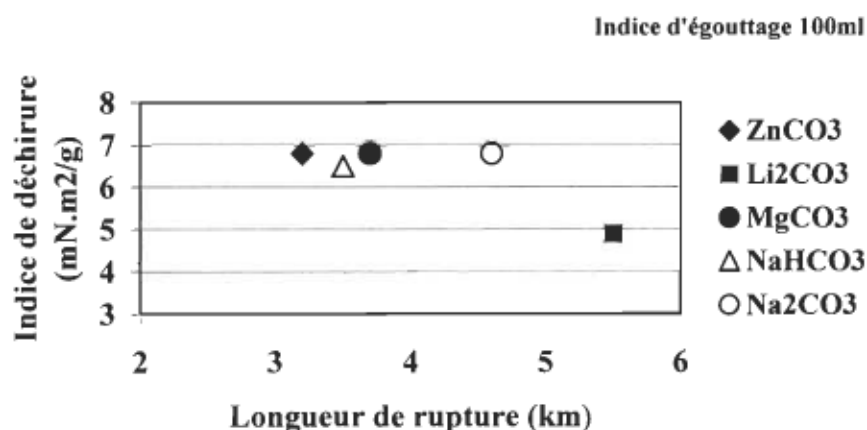


Figure 4.34 Indice de déchirure en fonction de la longueur de rupture pour la pâte PE du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.

4.3.3 Blancheur

Les variations de la blancheur des trois pâtes pour les différents, seconds agents d'imprégnation sont illustrées à la figure 4.35. La meilleure blancheur est observée avec la pâte d'explosion imprégnée avec la solution qui contient le carbonate de lithium (40 % MgO). De bons résultats sont également observés pour l'imprégnation avec le carbonate de zinc.

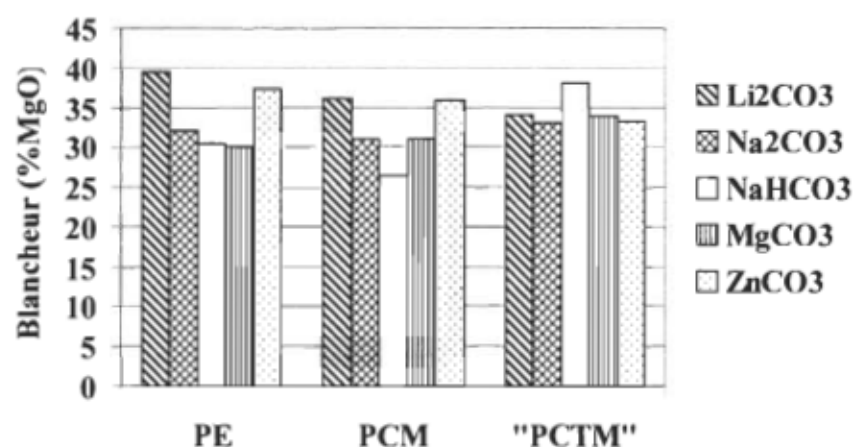


Figure 4.35 Blancheur pour les pâtes PE, PCM et "PCTM" du panic érigé imprégnées avec 1% de différents agents d'imprégnation.

Carbonate de lithium est le meilleur agent de gonflement par rapport aux autres agents. Il peut, en conséquence, mener à une hydrolyse de la lignine, qui comporte les groupement chromophores sur la surface, plus poussée.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS

Le panic érigé constitue une intéressante et prometteuse source des fibres pour l'industrie des pâtes et papiers. Les propriétés de ces fibres sont semblables aux fibres du bois feuillus [3, 4].

Le papier de la PE du panic érigé présente de bonnes propriétés papetières, comparables à celles de la pâte kraft. Cependant, avec l'addition du carbonate de lithium à la solution d'imprégnation, la PE n'est pas très avantageuse comparativement à la PCM. Le tableau 5.1 résume les propriétés des trois pâtes, kraft, PE et PCM du panic érigé. Les deux dernières sont imprégnées avec 8% de sulfite de sodium et 2% de carbonate de lithium.

Tableau 5.1 Propriétés des pâtes kraft, PE et PCM du panic érigé (PE et PCM imprégnées avec 8% de sulfite de sodium et 2% du carbonate de lithium).

Propriété	Kraft	PE	PCM
Rendement (%)	50	56	60
Longueur de rupture (km)	8,3	6,1	6,1
Indice de déchirure (mN.m ² /g)	5,6	5,1	5,0
Blancheur (% MgO)	30	40	37

L'addition du Li_2CO_3 permet d'obtenir des PE et PCM de qualités de papier pareilles, mais supérieures à la "PCTM".

L'utilisation du Li_2CO_3 , comme un deuxième agent d'imprégnation, entraîne une diminution de l'énergie spécifique de raffinage et améliore les propriétés de papier du panic érigé pour toutes les pâtes, PE, PCM et "PCTM". L'augmentation de la concentration du carbonate de lithium mène à une amélioration des propriétés physiques, mécaniques, et optiques, mais provoque une diminution du rendement.

On peut minimiser la baisse du rendement en modifiant les conditions de cuisson. En appliquant un temps de cuisson de 1 min et un ratio lessive pâte 3 on améliore le rendement, mais aux dépenses des résistances mécaniques.

Les pâtes du panic érigé montre une blancheur très faible et ont besoin d'un blanchiment afin de produire un papier journal de qualité acceptable.

Les essais avec le carbonate de zinc, comme deuxième agent d'imprégnation, n'ont pas montré de résultats encourageants. L'addition du ZnCO_3 augmente la consommation d'énergie de raffinage et donne un papier de faibles qualités.

L'addition du Li_2CO_3 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , MgCO_3 ou ZnCO_3 à la solution de sulfite de sodium mène aux résultats suivants:

- Le bicarbonate de sodium réduit le plus la consommation d'énergie de raffinage.
- Le carbonate de magnésium donne le meilleur rendement par rapport aux autres agents.
- Le carbonate de lithium donne des qualités de papier supérieures par rapport aux autres agents.

CHAPITRE 6

BIBLIOGRAPHIE

1. Correia, F., Roy, D. N., et Goel, K., "Pulping of Canadian industrial hemp", Pulp and Paper Canada, 99(9) p. T303-306 (1998).
2. Girouard, P. et Samson, R., "The Potential Role of Perennial Grasses in the Pulp and Paper Industry" 84th Annual Meeting, Technical Section CPPA, p.B105-108 (1998).
3. Goel, K., Eisner, R., Sherson, G., Radiotis, T. et Li, J., "Switchgrass: a Potential Pulp Fibre Source", 84th Annual meeting, Technical section CPPA, p.B109-114 (1998).
4. Radiotis, T., Li, J., Goel, K. et Eisner, R., "Fibre Characteristics, Pulpability and Bleachability Studies of Switchgrass", TAPPI Pulping Conference, TAPPI PRESS, p.371-376 (1996).
5. Kokta, B. V., "Process for Preparing Pulp and Paper Making", Canadian Patent # 1,230,208, December, 1987.
6. Kokta, B. V., "Process for Preparing Pulp and Paper Making", U. S. Patent # 4,798,651, January, 1989.
7. D'Agostino, D., Richard, J. A. et Taylor, J. D., "Continuous Steam Explosion Pulping: a Viable Alternative for Pulping of Non-woody Fibers", 1996 Pulping conference, TAPPI PRESS, p.377-385 (1996).
8. Ben, Y., Kokta, B. V. et Doucet, J., "Steam Explosion Pulping of Aspen: Effect of Chemical Pretreatment on Pulp and Paper Properties", Cellulose 91, p.408-413 (1991).
9. Ben, Y., Kokta, B. V., Doucet, J. et Kaliaguine, S., "Effect of Chemical Pretreatment on Chemical Characteristics of Steam Explosion Pulps of Aspen", Journal of Wood Chemistry and Technology, 13(3), p.349-369 (1993)
10. Ruzinsky, F. et Kokta, B. V., "High-yield Pulping of Switchgrass Using the Na₂SO₃-NaHCO₃ System", Rapport de recherche, Centre de recherche en pâtes et papier, UQTR, p.1-30 (1998)

11. Lampron, E., "Mise en pâte d'explosion avec le switchgrass: effet du carbonate de sodium", Projet de fin d'étude, Département de génie chimique, UQTR , p.1-46 (1998).
12. Sirifo, F., "Mise en pâte d'explosion avec le switchgrass: effet du carbonate de magnésium", Projet de fin d'étude, Département de génie chimique, UQTR p.1-40 (1997).
13. Bendzalova, M., Pekarovicova, A., Kokta, B. V. et Chen, R., " Accessibility of Swollen Cellulosic Fibers", *Cellulose Chemistry Technology* 30, p.19-32 (1996)
14. Kokta, B.V.et Ahmed, A., "Explosion Pulping (SEP) of Bagasse, Flax and Kenaf: Comparison with Conventional Processes", *IPPTA* 3(2) p.1-11 (1991)
15. Girouard, P., Henning, J. C. et Samson, R., "Economic Assessment of Short-Rotation Forestry and Switchgrass Plantations for Energy Production in Central Canada", *Proceedings of the Canadian Energy Plantation Workshop*, Natural Resources Canada p.11-16 (1995).
16. Leask,R. A. et Kocurek, M., "Pulp and Paper Manufacture", Vol. 2, "Mechanical Pulping", TAPPI, ACPPI Joint Textbook Committee, (1987).
17. Kokta, B.V., Ahmed, A., Zhan, H. et Barbe, M. C., "Explosion Pulping of Aspen" *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 71(9), p.1044-1055 (1989)
18. Kokta, B. V. et Vit, R., "Methode, Process and Apparatus for Converting Wood Residus and/or Biomass into pulp", *Canadian Patent #1,212,505* (1986).
19. Barbe, M. C., Kokta, B. V., Lavallée, H. C. et Taylor, J., "Aspen pulping: A comparison of Stake explosion and conventional chemi-mechanical pulping processes", *Pulp and Paper* 91(12) p.T395-403 (1990).
20. Kokta, B. V., Ahmed, A., Chen, R., Graczyk, T., Deming, Z. et Garceau, J. J., "Les pâtes d'explosion de bois de feuillus et résineux", *Les papetières du Québec*, 1, (4) p.17-21 (1990).
21. Mamers, H., Menz, D. et Yuritta, J. P. , "Explosion pulping of annual and fast growing plants", *APPITA* 33 (3), p.201-205 (1979)
22. Kokta, B. V. et Vit, R., "New Ultra-High-Yield V-Pulping Process", 73th Annual Meeting, Technical Section CPPA, p. A143-154 (1987).

23. Kokta, B. V., Ahmed, A., Chen, R. et Garceau, J. J., "Progress of Steam Explosion Pulping: An Overview", Cellucon 90, Kennedy, J.F., Philips, G. O., Williams, P. A., Lignocellulosics; Science, technology, development and use, chap. 20, Ellis Horwood Limited Publishers, USA, p.171-212 (1992).
24. Heitner, C. et Atack, D., "Ultra-High-Yield Pulping of Aspen, Effects of Ion Content", Pulp and paper Canada, 84(11), p. T252 -257 (1983)
25. Garceau, J. J., "Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques", Section technique ACPP, chap. 5, p. 140-143 (1989).
26. Iwamida, T., Sumi, Y. et Nakano, J., "Mechanisme of softening and refining in high-yield sulphite pulping process", Cellulose Chem. Technology 14, p. 253-268 (1980).
27. Mark, R. E., Dekker M., "Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paper Board", Volume 1, chap. 5, Mechanical Properties of Fibers, p. 410-443 (1984).
28. Ben, Y., Kokta, B. V. et Doucet, J. "Les effets des pretraitements chimiques sur les caracteristiques physiques des fibres de la pâte à très haut rendement à partir de tremble", Cellulose Chem. Technology, 30, p. 133-150 (1996).
29. Ben, Y., "Mise en pâte par un procédé d'explosion: les effets du pretraitement chimique", Ph. D. thèse, Université Laval (1993).
30. Kokta, B. V., Ahmed, A., Garceau, J. J., Carasco, F., Zhai, D. et Huang, G. Q., "Steam Explosion Pulping of Spruce and Aspen: Optimization of the process", 78th Annual Meeting, Technical Section CPPA, p. A91-105 (1992).
31. Kokta, B. V., Chen, R., Zhan, H. Y., Barette, D. et Vit, R., "Pâte à très haut rendement: mise en pâte V et blanchiment à partir de tremble", Pulp and Paper Canada 89(3), p. T91-T97 (1988).
32. Shaw, A. C., "Simulation of secondary refining", Pulp and Paper Canada 85:6, p. T152-155 (1984).
33. Katz, S., Beatson, R. P. et Scallon, M. A., "The determination of strong and weak acidic groups in sulfite pulps", Svensk papperstidning 6, p. R48-53 (1984).
34. Sundholm, J., "Mechanical pulping", Papermaking Science and Technology, book 5, p. 223-323 (1999).

35. Tanahashi, M., "Degradation mechanisms of wood components", Ph. D. Thesis Gifu University, p.1-119 (1989).
36. Law, K. N. et Valade, J. L., recherche note "The Myth of Fibre Liberation During Explosion Pulping", Journal of Pulp and Paper Science, vol. 16 (1), p. J41-42 (1990).
37. Dinwoodie, J. M., "The relation Between Fiber Morphology and Paper Properties", TAPPI Journal, vol. 48 (8), p.440-447 (1965).
38. Kokta, B. V. et Daneault, C., "Brightening ultra-high-yield hardwood pulps with hydrogen peroxide and sodium hydrosulfite", Tappi Journal, p. 130-133 (1986).
39. Kokta, B. V., Chen, R., Zhan, H. Y. et Barette, D., "Brightening of Ultra-High-Yield Explosion Aspen Pulp", TAPPI Pulping Conference, TAPPI PRESS, p. 173-182 (1988).
40. Kokta, B. V., Ahmed, A., "Steam Explosion Pulping", "Environmentally Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry", edited by Young, A. R and Akhtar, M., University of Wisconsin, USA, p. 191-213 (1998).
41. Heitner, C., Argyropoulos, D. S., Miles, K. B., Karnis, A. et Kerr, R. B., "Alkaline Sulphite Ultra-High-Yield Pulping of Aspen Chips - A Comparison of Steam Explosion and Conventional Chemimechanical Pulping", Journal of Pulp and Paper Science, vol. 19 (2), J57-69 (1993).

ANNEXES

I. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour les pâtes PE, PCM et "PCTM", imprégnées avec 8% Na₂SO₃ et 0%, 0.5%, 1% et 2% Li₂CO₃.

Pâte d'explosion													
Concentration de Li₂CO₃ (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffin. (min)		15	25	35	10	20	30	8	15	30	5	15	25
Indice d'égouttage (ml)		220	142	86	253	150	100	180	161	94	195	116	77
Grammage sec absolu (g/m²)		59,63	59,42	59,33	59,71	59,71	60,63	61,27	60,02	59,43	62,29	60,09	60,49
Épaisseur (µm)	Moy.	259	247	237	251	246	223	209	223	205	206	197	181
	Var. d'err.	7,5	6,1	8,9	6,5	7,4	8,5	5,3	10,1	6,6	5,9	10,5	6,3
Densité (kg/m³)		230,2	240,6	250,3	237,9	242,7	271,9	273,0	269,1	289,9	302,4	305,0	334,2
Porosité (ml/min)	Moy.	1186	649	475	1017	420	250	580	385	125	566	113	72
	Var. d'err.	167	165	52	165	57	18	19	64	4	23	11	3
Résistance à l'éclat. (kPa)	Moy.	75	88	101	98	112	122	130	135	143	178	167	190
	Var. d'err.	5,9	5,1	2,7	9,1	14,8	12,7	14,0	9,0	11,2	21,5	14,8	12,3
Indice d'éclat. (kPa*m²/g)		1,26	1,48	1,70	1,64	1,86	2,01	2,21	2,25	2,41	2,81	2,78	3,21
Résistance à la déchir.	Moy.	9,3	8,9	8,4	9,7	8,9	8,7	10,3	10,0	9,3	10,9	9,7	9,6
	Var. d'err.	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3
Indice de déchirure (mN*m²/g)		4,9	4,7	4,4	5,1	4,7	4,6	5,3	5,2	4,9	5,5	5,1	5,0
Charge à la rupture	Moy.	2,541	2,833	3,181	3,051	3,753	4,500	4,540	4,627	4,819	4,867	5,318	5,692
	Var. d'err.	0,153	0,152	0,144	0,189	0,189	0,171	0,233	0,204	0,295	0,207	0,249	0,314
Longueur de rupture (km)		2,84	3,18	3,57	3,56	4,19	4,95	4,8	5,14	5,51	5,5	5,90	6,32

Concentration de Li_2CO_3 (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffiné, (min)		15	25	35	10	20	30	8	15	30	5	15	25
Indice d'égouttage (ml)		220	142	86	253	150	100	180	161	94	195	116	77
Blancheur (% ISO) 3g	moy,	37,09	37,44	36,29	38,29	39,29	37,39	40,11	40,48	41,02	40,68	40,07	39,97
	var, d'err,	0,93	1,17	0,62	1,19	1,21	1,39	1,21	1,25	0,98	1,49	1,49	1,63
Blancheur (%ISO) 1,2g	moy,	36,38	36,95	36,98	37,64	38,14	38,37	38,96	39,69	39,35	40,10	39,99	39,98
	var, d'err,	0,65	0,77	0,77	0,67	0,83	0,78	0,93	0,81	0,84	1,01	0,98	1,02
L*		77,27	77,35	76,57	77,91	78,05	77,94	77,52	78,34	78,26	78,14	78,31	78,01
a*		0,93	0,61	0,56	1,11	1,00	0,95	0,84	0,86	1,02	0,80	0,84	0,83
b*		18,98	18,38	18,28	18,44	18,02	17,52	16,00	16,54	16,83	15,59	16,06	15,52
Opacité ISO (%)	moy,	92,84	93,24	94,29	92,50	93,19	93,54	94,62	93,16	93,22	94,94	93,66	93,88
	var, d'err,	0,42	0,34	0,38	0,32	0,39	0,39	0,42	0,39	0,41	0,37	0,42	0,44
Coef, de diff, de la lumière (cm^2/g)		280	289	298	283	296	297	308	298	301	321	308	304

Pâte chimico-mécanique													
Concentration de Li ₂ CO ₃ (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffin, (min)		15	25	40	10	20	30	5	15	25	5	10	20
Indice d'égouttage (ml)		288	195	158	224	141	97	300	145	69	190	141	68
Grammage sec absolu (g/m ²)		63,37	58,37	59,07	61,09	61,54	61,72	60,62	58,45	60,05	60,65	59,91	60,53
Épaisseur (µm)	Moy.	305	259	243	273	246	242	255	211	206	185	169	161
	Var. d'err.	11,1	11,8	12,5	12,4	12,3	9,8	9,3	10,1	11,1	8,7	9,2	11,9
Densité (kg/m ³)		208,1	225,8	243,6	224,2	250,2	255,0	238,2	277,7	292,2	328,7	354,5	377,1
Porosité (ml/min)	Moy.	1546	1022	895	1250	542	425	987	401	158	502	324	123
	Var. d'err.	113	113	118	101	16	31	47	19	12	11	16	11
Résistance à l'éclat, (kPa)	Moy.	60	63	71	89	91	116	101	138	141	169	179	188
	Var. d'err.	4,3	4,2	4,9	7,1	7,3	7,7	7,6	9,1	12,0	19,4	18,2	9,1
Indice d'éclat, (kPa*m ² /g)		0,95	1,07	1,19	1,46	1,48	1,88	1,67	2,36	2,34	2,79	2,99	3,02
Résistance à la déchir,	Moy.	10,1	8,3	8,3	9,8	9,4	9,0	10,5	9,12	9,05	10,3	9,7	9,5
	Var. d'err.	0,4	0,3	0,2	1,2	0,3	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,1	0,3
Indice de déchirure (mN*m ² /g)		4,95	4,48	4,41	5,03	4,79	4,58	5,44	4,91	4,73	5,33	5,0	4,9
Charge à la rupture	Moy.	2,322	2,380	2,648	3,041	3,473	3,895	3,482	4,561	4,787	4,847	5,626	5,745
	Var. d'err.	0,109	0,144	0,189	0,129	0,226	0,152	0,221	0,164	0,312	0,355	0,269	0,243
Longueur de rupture (km)		2,44	2,72	2,99	3,32	3,76	4,21	3,83	5,20	5,31	5,35	5,9	6,23

Concentration de Li_2CO_3 (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffiné, (min)		15	25	40	10	20	30	5	15	25	5	10	20
Indice d'égouttage (ml)		288	195	158	224	141	97	300	145	69	190	141	68
Blancheur (% ISO) 3g	Moy.	31,69	34,47	33,20	35,86	35,77	32,60	37,60	37,14	36,76	36,80	37,14	35,19
	Var. d'err.	0,28	0,89	0,82	0,84	0,81	0,78	0,89	0,87	0,62	1,27	1,16	0,74
Blancheur (%ISO) 1,2g	Moy.	33,81	34,31	34,59	35,40	35,66	34,58	37,30	36,47	35,71	36,73	37,20	36,33
	Var. d'err.	0,67	0,75	0,77	0,74	0,72	0,65	0,62	0,74	0,72	0,79	0,84	0,68
L*		75,89	76,22	76,38	76,33	76,57	76,10	77,57	76,87	76,44	76,57	76,99	76,35
a*		0,40	0,18	0,35	0,56	0,68	0,89	1,05	1,16	1,09	1,12	1,12	1,12
b*		20,10	19,96	19,88	18,66	18,73	19,39	18,30	18,19	18,45	17,25	17,37	17,40
Opacité ISO (%)	Moy.	93,78	93,84	94,42	92,82	92,95	93,81	92,48	92,88	93,24	94,57	94,12	94,28
	Var. d'err.	0,94	0,79	0,63	0,34	0,39	3,21	2,49	2,72	2,96	3,49	3,14	3,12
Coef, de diff, de la lumière (cm^2/g)		262	289	299	262	265	271	274	281	273	297	297	289

Pâte chimoco-thermomécanique													
Concentration de Li ₂ CO ₃ (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffin. (min)		90	120	180	60	90	120	30	50	60	15	30	40
Indice d'égouttage (ml)		226	177	100	142	79	50	146	78	44	141	79	65
Grammage sec absolu (g/m ²)		60,66	60,51	60,01	60,34	61,13	61,27	59,89	61,16	60,64	60,96	60,58	60,18
Épaisseur (µm)	Moy.	320	300	277	277	253	248	260	241	226	242	226	219
	Var. d'err.	15,6	16,5	15,2	13,4	10,8	9,6	17,3	10,9	12,3	16,1	13,3	12,7
Densité (kg/m ³)		190	202	216	218	242	248	230	254	268	252	268	275
Porosité (ml/min)	Moy.	2973	2896	1878	2041	1592	943	1733	1284	597	1354	857	390
	Var. d'err.	90,1	48,9	41,2	87,5	119,1	76,2	176,6	53,7	15,2	158,9	30,1	18,1
Résistance à l'éclat. (kPa)	Moy.	14,8	17,7	22,2	28,9	39,0	39,3	55,1	58,2	72,1	65,1	70,1	78,8
	Var. d'err.	3,8	2,1	2,5	5,2	5,1	4,1	8,7	5,9	6,4	8,7	8,3	8,1
Indice d'éclat. (kPa*m ² /g)		0,24	0,29	0,37	0,48	0,64	0,65	0,92	0,95	1,19	1,07	1,16	1,31
Résistance à la déchir.	Moy.	5,7	5,3	4,7	8,0	7,7	7,0	9,5	8,7	7,7	10,2	9,0	8,8
	Var. d'err.	0,43	0,55	0,51	0,04	0,08	0,4	0,22	0,29	0,15	1,04	0,35	0,33
Indice de déchirure (mN*m ² /g)		2,95	2,75	2,44	4,16	3,95	3,59	4,97	4,56	3,98	5,25	4,66	4,59
Charge à la rupture	Moy.	0,84	0,99	1,22	1,52	1,99	1,81	2,48	2,46	3,58	2,98	3,39	4,03
	Var. d'err.	0,114	0,109	0,102	0,180	0,127	0,213	0,179	0,227	0,216	0,242	0,231	0,198
Longueur de rupture (km)		0,92	1,09	1,35	1,67	2,18	1,97	2,75	2,69	3,94	3,26	3,73	4,46

Concentration de Li_2CO_3 (%)		0			0,5			1			2		
Temps de raffin. (min)		90	120	180	60	90	120	30	50	60	15	30	40
Indice d'égouttage (ml)		226	177	100	142	79	50	146	78	44	141	79	65
Blancheur (% ISO) 3g	Moy.	37,80	37,87	37,78	34,18	30,30	33,87	30,68	30,05	30,25	29,79	29,03	29,31
	Var. d'err.	1,70	1,61	1,50	0,63	3,16	0,78	0,43	0,55	0,63	1,98	0,29	0,42
Blancheur (%ISO) 1.2g	Moy.	39,30	39,16	39,22	37,58	35,69	35,81	34,48	34,19	33,44	30,83	30,06	30,28
	Var. d'err.	1,42	1,30	1,26	1,48	1,25	1,48	1,36	1,27	1,12	1,22	1,31	1,13
L*		79,00	78,95	78,97	78,28	76,25	77,28	76,41	75,82	75,30	74,04	73,41	73,75
a*		0,21	0,16	0,18	0,38	0,47	0,29	0,53	0,59	0,67	1,0	0,88	1,11
b*		18,21	18,30	18,26	19,18	19,34	19,76	20,05	19,43	19,54	21,07	21,15	21,40
Opacité ISO (%)	Moy.	95,88	96,12	96,80	94,37	95,51	95,96	92,94	94,72	94,66	92,57	93,17	92,89
	Var. d'err.	0,24	0,22	0,25	0,67	0,39	0,69	0,55	1,0	0,9	1,3	1,56	0,72
Coef. de diff. de la lumière (cm^2/g)		369	377	380	320	322	338	271	288	282	233	236	238

**II. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour la pâte EP, PCM et "PCTM",
imprégnées avec 8% Na₂SO₃ et 1% ZnCO₃,**

Type de pâte		PE			PCM			PCTM		
Temps de raff. (min)		25	30	40	30	40	45	30	50	60
Indice d'égouttage (ml)		163	147	101	162	131	120	180	120	90
Grammage sec absolu (g/m ²)		59,99	60,13	60,24	61,01	60,17	60,13	59,81	61,02	60,5
Épaisseur (µm)	Moy.	286	260	252	294	283	274	305	296	280
	Var. d'err.	30,8	81,0	11,8	20,1	14,2	18,2	21,1	17,5	18,3
Densité (kg/m ³)		221,1	230,5	239,0	207,5	212,6	219,5	196,1	206,1	216,2
Porosité (ml/min)	Moy.	1530	1056	691	1758	1374	1196	2230	1780	1350
	Var. d'err.	181,5	106,3	97,6	122,5	130,9	116,4	145,2	157,1	205,3
Résistance à l'éclat. (kPa)	Moy.	47,9	64,6	66,8	45,8	52,3	55,3	31,2	35,8	40,1
	Var. d'err.	8,3	9,2	14,5	7,9	4,2	6,2	5,8	11,3	12,5
Indice d'éclat. (kPa*m ² /g)		0,81	1,07	1,11	0,75	0,87	0,92	0,47	0,59	0,66
Résistance à la déchirure	Moy.	14,4	13,9	13,2	13,1	11,4	11,0	11,8	11,2	10,4
	Var. d'err.	0,57	0,44	0,41	0,69	0,55	0,51	0,65	0,84	0,67
Indice de déchirure (mN*m ² /g)		7,53	7,25	6,88	6,74	6,37	6,28	6,19	5,76	5,44
Charge à la rupture	Moy.	2,35	2,66	2,84	2,25	2,26	2,28	1,8	1,91	2,05
	Var. d'err.	0,18	0,15	0,19	0,16	0,14	0,23	0,25	0,19	0,18
Longueur de rupture (km)		2,61	2,95	3,14	2,41	2,49	2,63	1,92	2,12	2,35

Type de pâte		PE			PCM			PCTM		
Temps de raffin. (min)		25	30	40	30	40	45	30	50	60
Indice d'égouttage (ml)		163	147	101	162	131	120	180	120	90
Blancheur (% ISO) 3g	Moy.	37,08	37,66	36,90	35,79	35,92	35,01	28,45	28,96	28,24
	Var. d'err.	1,02	1,04	0,21	0,59	0,60	0,76	1,01	0,98	0,96
Blancheur (%ISO) 1.2g	Moy.	37,34	37,69	37,62	37,00	36,91	36,58	33,11	33,58	32,88
	Var. d'err.	0,83	0,87	0,84	1,07	1,05	1,07	1,02	1,05	0,98
L*		78,63	78,55	78,40	78,42	78,50	78,24	77,53	77,36	77,12
a*		-0,32	-0,25	-0,22	-0,45	-0,51	-0,59	-0,25	-0,29	-0,31
b*		19,62	19,02	18,85	19,72	20,0	19,95	19,95	19,84	19,92
Opacité ISO (%)	Moy.	91,41	91,97	92,94	92,32	92,67	92,93	93,04	93,56	93,77
	Var. d'err.	0,53	0,69	0,48	0,41	0,35	0,32	0,45	0,56	0,49
Coef. de diff. de la lumière (cm ² /g)		275	281	294	280	293	294	291	296	298

III. Propriétés physiques, mécaniques et optiques pour la pâte EP imprégnée avec 8% Na_2SO_3 et 1% Li_2CO_3 (temps de cuisson 1 min, ratio lessive/pâte 3)

Temps de raffin.(min)		20	30	40
Indice d'égouttage (ml)		195	132	98
Grammage sec absolu (g/m^2)		59,95	59,68	60,68
Épaisseur (μm)	Moy.	295	286	277
	var,d'err.	81,3	19,3	17,6
Densité (kg/m^3)		203,3	208,7	219,1
Porosité (ml/min)	Moy.	922	628	412
	var,d'err,	162,2	209,8	64,4
Résistance à l'éclatement (kPa)	moy,	54,1	65,1	69,6
	var,d'err.	9,5	7,5	5,2
Indice d'éclatement ($\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)		0,90	1,09	1,15
Résistance à la déchirure	Moy.	14,7	13,2	12,6
	var,d'err.	0,93	0,61	0,39
Indice de déchirure ($\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$)		7,3	6,94	6,52
Charge à la rupture	Moy.	2,30	2,48	2,96
	var,d'err.	0,18	0,13	0,15
Longueur de rupture (km)		2,56	2,77	3,25
Blancheur (% ISO) . 3g	Moy.	38,70	39,04	36,97
	var,d'err.	1,78	1,0	1,19
Blancheur (%ISO).1.2g	Moy.	39,01	38,85	38,29
	var,d'err.	0,94	1,03	1,03
L*		79,37	79,14	78,99
a*		-0,63	-0,75	-0,78
b*		18,82	18,61	19,08
Opacité ISO (%)	Moy.	89,94	90,78	91,14
	var,d'err.	0,55	0,81	0,34
Coef. de diffusion de la lumière (cm^2/g)		265	273	275