



HAL
open science

Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

Davina Michel

► **To cite this version:**

Davina Michel. Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.). Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2013. Français. NNT : 2013MULH6113 . tel-01303815

HAL Id: tel-01303815

<https://theses.hal.science/tel-01303815>

Submitted on 18 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Année 2013



THESE

Présentée à
L'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Pour l'obtention du titre de
Docteur en Mécanique

Par
Davina MICHEL
Ingénieur Textiles et Fibres

**EVALUATION DU POTENTIEL FIBREUX ET TEXTILE
DE LA CANNE A SUCRE
(*Saccharum officinarum L.*)**

Soutenue le 19 novembre 2013 devant le jury composé de

Pr. SANTOS SILVA Manuel José	Président
Pr. ROUDESLI Sadok	Rapporteur
Dr. GOEBEL François-Régis	Examineur
Pr. DREAN Jean-Yves	Membre
HDR HARZALLAH Omar	Directeur de thèse
Dr. BACHELIER Bruno	Directeur de thèse

Remerciements

Cette étude a été réalisée au Laboratoire de Physique et Mécanique Textile de l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Sud-Alsace de Mulhouse et au CIRAD de Montpellier, avec le soutien du Conseil régional de la Martinique.

Je remercie la Région Martinique, par M. le Président Alfred MARIE-JEANNE et M. le Président Serge LETCHIMY, d'avoir cru en moi et de m'avoir suivie dans cette aventure. Merci de croire au potentiel des jeunes du pays, et de nous soutenir.

Je tiens à remercier Pr. DREAN, de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse sur la canne à sucre, loin de mon pays, au sein du laboratoire LPMT. Avec toutes les péripéties auxquelles j'ai été confronté, vous avoir comme directeur de thèse a été très instructif et je vous en suis reconnaissante. Je souhaite remercier aussi Dr. Omar HARZALLAH (HDr) du LPMT d'avoir accepté d'encadrer mes recherches. Merci pour les conseils et la motivation.

Je remercie également tout le personnel du laboratoire et de l'ENSISA, les services administratifs et techniques avec une pensée particulière pour Mme SCHWOB, Philippe, Sébastien, qui ont su répondre présent pour des conseils ou pour mes interrogations.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Dr. Bruno BACHELIER du CIRAD Montpellier. Merci pour tes conseils, ta disponibilité ainsi que ton investissement dans le suivi de mes travaux. Sans ton appui, la réalisation de cette thèse aurait été bien difficile.

Je remercie également pour leur contribution les agents du Laboratoire de Technologie et de Caractérisation des fibres naturelles du CIRAD de Montpellier (notamment Gérard GAWRYSIAK pour la filature), ainsi que l'Unité de Recherche Systèmes de Culture Annuels pour avoir accepté de contribuer au financement de mes recherches ; puisse mes résultats être le début d'une longue suite.

Mes profonds remerciements vont à M. Dominique PETIT du Centre Technique de la Canne et du Sucre (CTCS) de la Martinique, sans qui cette thèse - sans son soutien technique, moral et sa grande réactivité - n'aurait pu voir le jour. Tu as été un merveilleux collaborateur et ta sympathie est honorable. Merci pour ton soutien, ta disponibilité, ton investissement et ton

professionnalisme exemplaire. Je remercie ainsi pour leur contribution les agents du CTCS, ceux de la sucrerie Le Galion (dont notamment M. Philippe ANDRE, directeur de la SAEM Galion), ainsi que les agriculteurs de La Trinité, pour avoir partagé avec moi vos connaissances sur la canne et son environnement.

Gracias a Gloria VILLAMIL, del laboratorio ICIDCA (Cuba 9), por su gratitud y su ayuda en mi trabajo. Gracias a ti. Todo el equipo de Cuba 9/ICIDCA fue una ayuda excepcional durante mi formación a Cuba. Con reconocimiento, he apreciado los momentos de intercambios y vuestra simpatía conmigo. Me sentí como una hija feliz de Cuba.

Je remercie aussi la fondation Spiegel pour sa participation financière et pour le témoignage de l'intérêt porté à mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à mes collègues proches Wedian, Sliman, Amir, Harman...aux moins proches et à tout le personnel de l'ENSISA, du LPMT et du CIRAD de Montpellier pour leur soutien et leur agréable présence et aide tout au long de ces années.

Hadj LATROCHE, merci pour toutes ses « pauses-réflexions », pour les échanges sur la vie... Tu es un collègue formidable, et tous ces moments passés au bureau m'ont offert un ami et un grand frère. Que la vie t'apporte encore pleins de moments de bonheur. Ces quelques mots ne sauraient exprimer toute l'estime que j'ai pour toi. Merci pour tout. Et, à Nabyl KENHOUCI, « merci, merci, merci »: tu es un quelqu'un remarquable, formidable et agréable. Ton professionnalisme est à la hauteur de ta personnalité, merci pour ton aide et ton soutien à toutes épreuves.

Merci à mes amis, et ma famille de Mulhouse : vous avez été là pour moi, dans les moments de découragements. Votre amour a été source de motivation. Merci maman et Nanou, ça n'a pas toujours été facile, mais on y est arrivé. Merci Seigneur de m'avoir rendu capable.

Merci à tous pour ces belles années!

An bouji limin pa ka pèd limyè

Si i ka sèvi limin an lot

A Mamie Liza

Avant-propos

La filière canne est une composante incontournable de la société martiniquaise. Chargée d'histoire, de la colonisation à nos jours, la canne à sucre a été vectrice de rassemblement, de révolte, d'identité, de profit, de construction, de fierté et de mémoire. De cette relation complexe entre amour et peine, la canne à sucre est aujourd'hui le prodige de la Martinique. Bien des tempêtes, des chocs économiques, des ruptures sociales ont pu déstabiliser cette filière au cours des siècles ; mais telle une flèche dressée vers le ciel, la canne demeure cette flamme olympique à garder allumée, qu'importent les vents, les pluies, les temps et les saisons.

C'est riche de cette culture, que mon intérêt s'est porté sur cette plante, symbole de la Martinique. Passionnée par la nature et la création, ce fut avec grand plaisir que j'ai choisi de travailler sur l'évaluation du potentiel textile et fibreux des fibres de canne à sucre. En effet, le constat est que la canne récoltée se compose de près de 15% de fibres. Elle a alors su attirer mon regard de « *textilienne* » et motiver mes recherches tout au long de ces trois années. Ce travail de thèse est le résultat de la compréhension sans appréhension de la canne à sucre dans toute sa complexité. Ces longues racines ont su me conduire au-delà des frontières, à Cuba, en Martinique, en France ; maintenant l'intérêt profond pour l'étude des fibres naturelles.

Glossaire

- Bagasse :** résidu ligneux de la canne à sucre, restant après l'extraction du jus sucré
- Biocarburant :** carburants d'origine biologique, soit des alcools et dérivés (produits à partir du sucre ou de l'amidon), soit des huiles et dérivés (produits à partir des oléagineux)
- Biomasse :** masse de matière vivante contenue dans une unité déterminée de surface ou de volume de l'environnement
- Chlordécone :** molécule organochlorée utilisée dans la fabrication de deux insecticides pour lutter contre le charançon du bananier : Képone (années 70) puis Curlone (jusqu'en 1993 aux Antilles)
- CV% :** coefficient de variation (en %)
- Dessiccation :** procédé d'élimination d'eau d'un corps à un stade poussé. Il s'agit d'une déshydratation visant à éliminer autant d'eau que possible.
- Ecumes :** appellation des sous-produits de l'industrie de la canne. Les écumes de sucreries proviennent de la clarification du jus (chauffage puis centrifugation)
- Entre-nœuds :** intervalle entre deux nœuds, *i.e.* entre deux points d'insertion de feuilles sur tige
- INRA :** Institut National de la Recherche Agronomique
- IRD :** Institut de Recherche pour le Développement
- Lagunage :** opération d'épuration des eaux résiduaires ou des lisiers consistant à les laisser séjourner dans de grands bassins
- Mélasses :** résidu sirupeux de la fabrication du sucre qui ne contient plus de sucre cristallisable mais encore du sucre fermentescible. Il est l'élément de base des rhums industriels ou traditionnel de sucrerie
- Mesh :** unité qui exprime le nombre de mailles du tamis par pouce (1 pouce ou inch=2,54cm). Plus il y a de mailles, plus élevé est le chiffre Mesh et donc plus fin sera le tamis.
- Méthanisation :** transformation des déchets, des ordures en méthane
- Pectines :** gélifiant contenu dans de nombreux végétaux et utilisés comme épaississant dans les industries alimentaire (confiture)
- Vesou :** nom du jus de canne à sucre qui, une fois fermenté, sert à la distillation du rhum agricole
- Vinasse :** résidu de la distillation de la mélasse

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	x
CHAPITRE I ENVIRONNEMENT ET ECONOMIE DE LA FILIERE CANNE	2
I. La canne à sucre	3
1. Origine et botanique	3
2. Culture d'un champ de canne à sucre	10
3. Données mondiales de production	11
4. Transformation sucrerie /distillerie : schémas martiniquais	13
5. Valorisation des coproduits.....	17
II. La canne à sucre à la Martinique	20
1. Empreinte sociale de la canne dans le paysage martiniquais	20
2. Economie de la filière canne	22
III. Questions et Objectifs de recherche	24
1. Obtention de fibres de bagasse de canne à sucre	24
2. Fabrication de fil à partir des fibres extraites	25
3. Détermination des propriétés physiques, via une nouvelle méthode pour la bagasse	26
IV. Conclusion.....	26
CHAPITRE II ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES CONVENTIONNELLES DE TRANSFORMATION DE LA BAGASSE	28
I. Les matériaux textiles cellulosiques	29
1. Composition et structure des matériaux textiles cellulosiques	30
2. Principaux polymères constitutifs	31
3. Techniques générales d'extraction des matériaux textiles cellulosiques	36
II. Méthode d'extraction des fibres de canne à sucre	38
1. Extraction mécanique.....	38
2. Extraction chimique	43
3. Extraction enzymatique.....	44
III. Composition de la bagasse	45
1. Propriétés morphologiques.....	45
2. Propriétés physiques de la bagasse	47
3. Composition chimique de la bagasse	51
IV. Obtention et stockage de la bagasse de canne à sucre	52
V. Applications courantes des fibres de bagasse.....	53
1. Domaine alimentaire	56
2. Domaine énergétique	57
3. Domaine industriel.....	58
VI. Conclusion.....	60

CHAPITRE III MATERIELS ET METHODES.....	62
I. Origine et préparation de la bagasse.....	63
1. Origine de la canne et de la bagasse.....	63
2. Préparation de la matière.....	64
II. Protocoles d'extraction des fibres de canne à sucre	66
1. Choix de la méthode d'extraction	66
2. Approche paramétrique	67
3. Extraction des fibres de bagasse	69
III. Caractérisation des fibres de bagasse	70
1. Aspect morphologique	70
2. Méthode de caractérisation physique	71
3. Méthode de caractérisation mécanique	78
4. Méthode de caractérisation chimique.....	83
IV. Conclusion.....	85
 CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	 86
I. Extraction des fibres de bagasse de canne.....	87
1. Analyse granulométrique des particules de bagasse	87
2. Propriétés hygrométriques de la bagasse	88
3. Solubilité de la bagasse	89
4. Première approche des paramètres d'influences	90
5. Identification des fibres de bagasse extraites	94
6. Rendement de l'extraction chimique	97
7. Dosage de la lignine Klason.....	98
8. Analyse en spectroscopie infrarouge FT-IR	99
II. Etude des propriétés physiques et mécaniques des fibres extraites.....	105
1. Etude de la distribution en longueur	105
2. Etude des diamètres inter fibres	109
3. Etude expérimentale de la finesse des fibres de bagasse	111
III. Etude des propriétés mécaniques des fibres extraites.....	114
1. Etude de la rigidité à la flexion des fibres sur KAWABATA KES FB2 SH.....	114
2. Comportement mécanique des fibres en traction	120
IV. Domaines d'application des fibres de canne à sucre	131
1. Applications envisageables selon le type de fibres extraites	131
2. Filature en mélange coton-bagasse	132
3. Filature manuelle 100% fibres de bagasse écru	135

CHAPITRE V APPROCHE ENVIRONNEMENTALE : ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	138
I. L'Analyse du Cycle de Vie : Généralités	139
1. Historique.....	139
2. Les normes ISO.....	140
II. Objectifs et champs d'étude	141
1. Objectif de l'étude.....	141
2. Délimitation des frontières du système	141
3. Choix de la fonction et de l'unité fonctionnelle.....	143
4. Catégories et qualités des données	143
5. Limites de l'interprétation des résultats	143
III. L'ACV de filé de fibres de bagasse écrus : Inventaire des données	144
1. La production de matières premières	144
2. La machinerie agricole.....	146
3. Fabrication de sucre : récupération de bagasse	147
4. Fabrication des fibres : extraction	148
IV. Evaluation des impacts	149
V. Interprétation et Conclusion	153
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	158
I. Conclusions	159
1. Résultats acquis.....	159
2. Limites et verrous technologiques	161
II. Perspectives d'utilisation des fibres produites	162
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	2
ANNEXES.....	0

Liste des Figures

- Figure 1. Portion souterraine d'un pied de canne montrant les tiges (Martin, 1938)
- Figure 2. Dessin d'un tronçon de canne entre deux nœuds
- Figure 3. Section longitudinale à travers une région périphérique d'un entre-nœud à maturité (Artschwager, 1940)
- Figure 4. Section transversale à travers la partie externe d'un entre-nœud
- Figure 5. Section longitudinale à travers la région périphérique d'un entre-nœud à maturité (Artschwager, 1925)
- Figure 6. Dessin diagrammatique d'un faisceau vasculaire de la tige et des cellules environnantes de réserve
- Figure 7. Cannes à sucre dans un champ de canne
- Figure 8. Processus d'accumulation de saccharose
- Figure 9. Principaux pays producteurs de canne à sucre en 2011 (Faostat, 2013)
- Figure 10. Schéma de fabrication du sucre dans la sucrerie (CTCS, 2013)
- Figure 11. Schéma de fabrication de rhum dans une distillerie (CTCS, 2013)
- Figure 12. Sites de transformation de la canne et surface plantée en canne par commune à la Martinique (CTCS, 2013)
- Figure 13. Répartition des livraisons de canne entre sucrerie et distilleries, en Martinique (CTCS, 2013)
- Figure 14. Disposition de fibrilles en sens S à gauche et sens Z droite
- Figure 15. Structure chimique partielle de la cellulose
- Figure 16. Structure chimique partielle de l'hémicellulose (Voinot, 2007)
- Figure 17. Structure polymérique de la lignine (Gomez, 2012)
- Figure 18. Ecorce de canne obtenue en sortie du système Tilby (Chiparus, 2004)
- Figure 19. Schéma de séparation de type Tilby (Chiparus, 2004)
- Figure 20. Différents domaines d'application technique des fibres naturelles en général
- Figure 21. Matériaux vierges: a) bagasse b) canne broyée c) écorce de canne
- Figure 22. Séparation en humide de la portion fibre/moelle
- Figure 23. Définition du diamètre apparent d'une fibre de bagasse de section elliptique, vue MEB
- Figure 24. Micrographie «électronique de la coupe transversale d'un ensemble de fibres de bagasse
- Figure 25. Diagramme de flexion type sur module KES FB2 SH
- Figure 26. Diagramme type charge allongement
- Figure 27. Micrographie électronique des fibres extraites à l'eau distillée α_1 à gauche, eau de mer α_2 à droite
- Figure 28. Micrographie électronique des fibres extraites à l'eau distillée α_3 à gauche, eau de mer α_4 à droite
- Figure 29. Différentes extractions présentant des colorations de bain différentes selon la concentration en soude a) 1N, b) 0,1N, c) 2N et d) uniquement eau distillée
- Figure 30. Micrographie électronique de fibres de bagasse extraites sous différentes conditions
- Figure 31. Taux de lignine résiduelle %MS
- Figure 32. Spectre infrarouge de la bagasse vierge non traitée, avec les principaux
- Figure 33. Spectres infrarouge des différents types de fibres extraites BPS-1N
- Figure 34. Spectres infrarouge des différents types de fibres extraites BPS-1N
- Figure 35. Diagramme poids des fonctions de répartition pondérée par la masse
- Figure 36. Résultats expérimentaux des mesures inter fibres sur MEB

- Figure 37. Micrographie électronique d'une coupe transversale d'un ensemble de fibres techniques
- Figure 38. Comparaison des titres obtenus suivant les deux méthodes
- Figure 39. Schéma de diagramme type de flexion (gauche), diagramme de flexion de fibre B-1N déclassée (à droite)
- Figure 40. Diagramme de flexion d'une fibre BPD-0,1N
- Figure 41. Diagramme de flexion déclassé type : profil A
- Figure 42. Diagramme de flexion déclassé type : profil B
- Figure 43. Micrographie électronique d'une fibre présentant un coude dans sa structure
- Figure 44. Comportement en traction de fibres techniques
- Figure 45. Comportement en traction d'une fibre technique de type BPS-1N
- Figure 46. Micrographies électroniques des faciès de rupture d'une fibre BPS-1N
- Figure 47. Micrographies électroniques des faciès de rupture d'une fibre type B-1N
- Figure 48. Micrographies électroniques des faciès de rupture des fibres de type BPD-0,1N
- Figure 49. Micrographies électroniques des faciès de rupture de fibres de type B-0,1N
- Figure 50. Domaines d'applications possibles des fibres extraites selon leur type
- Figure 51. Ouvraison des fibres de bagasse en mélange coton (30%)
- Figure 52. Passage au banc d'étirage: ruban coton-bagasse (30-70)
- Figure 53. Passage sur continu à lanières du mélange coton-bagasse
- Figure 54. Filage manuel d'un ruban de fibres type BPD-0.1N après cardage
- Figure 55. Présentation générale du cycle de vie pour les fibres de bagasse
- Figure 56. Structure d'une molécule de chlordécone.
- Figure 57. Cartographie des zones contaminées par la chlordécone
- Figure 58. Les trois piliers du développement durable

Liste des tableaux

- Tableau 1. Valeurs moyennes de saccharose, de sucres réducteurs et de fibres du complexe *Saccharum*
- Tableau 2. Caractéristiques dimensionnelles des composants de canne à sucre
- Tableau 3. Production agricole et industrielle de 2001 à 2012 (CTCS, 2013)
- Tableau 4. Composition chimique de quelques fibres d'origine végétale (Turner, 1949)
- Tableau 5. Contenu des cendres de canne à sucre comparé à d'autres bois
- Tableau 6. Répartition des techniques de séparation selon l'humidité de la bagasse en sortie d'usine
- Tableau 7. Répartition es éléments constitutifs de la bagasse (Muller, 1960)
- Tableau 8. Répartition des tissus contenus dans la bagasse sèche (lavée)
- Tableau 9. Composition physique moyenne de la bagasse
- Tableau 10. Distribution des particules par méthode gravimétrique
- Tableau 11. Densité des particules de bagasse
- Tableau 12. Densité des différentes fractions de la bagasse
- Tableau 13. Composition chimique de la bagasse, d'après les principaux auteurs de la littérature
- Tableau 14. Principaux éléments constitutifs des fibres et moelle
- Tableau 15. Méthode de stockage de la bagasse selon sa teneur en eau
- Tableau 16. Dérivées de canne, procédés et applications (EADIE, 1986)
- Tableau 17. Approvisionnement en matière première tout au long de la thèse
- Tableau 18. Jeu de tamis utilisé pour les particules de bagasse
- Tableau 19. Conditions de prétraitement des particules de bagasse
- Tableau 20. Conditions d'extraction chimique à la soude
- Tableau 21. Distribution granulométrique des particules de bagasse
- Tableau 22. Taux de reprise de quelques fibres références
- Tableau 23. Analyse de la solubilité de la bagasse
- Tableau 24. Conditions opératoires pour extraction à partir de fibres de canne broyée
- Tableau 25. Répertoire des observations notables durant les extractions sans soude
- Tableau 26. Répertoire des observations notables durant les extractions à la soude
- Tableau 27. Identification des traitements sur fibre
- Tableau 28. Rendement en fibres selon traitement
- Tableau 29. Analyse des changements relatifs dans la bagasse après traitement
- Tableau 30. Longueurs moyennes des fibres selon le traitement
- Tableau 31. Paramètres de centrage des différents de type de fibres
- Tableau 32. Diamètres moyens apparents des différentes fibres
- Tableau 33. Moyennes des résultats expérimentaux des mesures de diamètres inter fibre
- Tableau 34. Mesure des titres de chaque type de fibres extraites
- Tableau 35. Mesure de la finesse de fibre de bagasse selon Chiparus
- Tableau 36. Echantillon numérique des fibres testées selon leur type
- Tableau 37. Résultats expérimentaux des essais de flexion sur chaque type de fibres
- Tableau 38. Comparaison du comportement à la flexion des fibres de bagasse avec d'autres fibres
- Tableau 39. Répartition des profils singuliers de flexion pour chaque type de fibre
- Tableau 40. Résultats expérimentaux des essais de traction sur fibre individuelle
- Tableau 41. Emission des GES en sucrerie sur l'année 2010
- Tableau 42. Affectation des données d'inventaire aux catégories d'impacts

INTRODUCTION GENERALE

Les fibres naturelles sont en ce siècle très prisées dans l'élaboration de produits textiles nouveaux à moindre impact environnemental. Afin de se substituer aux fibres synthétiques, de nombreuses recherches sont menées à partir de différentes fibres d'origine naturelles.

A ce jour, la fibre de canne à sucre connaît peu d'applications textiles directes. Elle intervient timidement dans ce domaine, essentiellement dans la fabrication de matériaux composites, et dans la fabrication de fil viscosé. Ces fils (câbles) de cellulose régénérée sont obtenus grâce au procédé viscosé, qui consiste en l'extraction de cellulose pure. L'obtention de ces fibres et leur emploi dans le domaine textile sont à ce jour au stade de recherche et développement.

La culture de la canne à sucre dans les Antilles françaises, et particulièrement en Martinique¹, est destinée principalement à la fabrication de rhum et de sucre. Ces industries génèrent une ressource naturelle riche en fibres : la bagasse. Elle est généralement employée comme combustible dans l'alimentation des chaudières des usines de transformation. De par son potentiel fibreux, d'autres pistes de revalorisation sont abordées, avec l'avantage de sa disponibilité et de sa biodégradabilité. Des opportunités de développements socio-économiques pour l'île et autres pays producteurs de canne nécessitent en amont des études, analyses, essais pilotes...etc. La mise en place d'une filière de valorisation/revalorisation de la bagasse de canne, s'appuie sur une connaissance de la matière première, ainsi que sur la maîtrise des méthodes de transformations. Dans le cadre de nos recherches, différentes techniques d'extraction ont été abordées avant de procéder à la phase de caractérisation des fibres extraites. S'en suit une étape de transformation des fibres, en relation directe avec les propriétés physicomécaniques dégagées. L'ensemble de ces travaux expérimentaux a été mené au Laboratoire de Physique et Mécanique Textile (LPMT) à Mulhouse.

La connaissance approfondie de la structure et des caractéristiques physiques de la fibre de canne extractible intéresse plusieurs acteurs de la filière textile puisqu'elle participe à la

¹ Martinique : île des caraïbes de 60km de large et 90km de long, située dans l'arc Antillais entre la Dominique et Sainte-Lucie. En 2012, la population était de 400 000 habitants. Les principales cultures de l'île sont la banane et la canne à sucre.

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

compréhension des produits linéaires et surfaciques réalisables. Notre travail de thèse contribue à la connaissance du matériau fibre de bagasse de canne à sucre, par l'analyse des propriétés mécaniques et physico-chimiques de celles-ci. Ils permettent alors d'initier et d'apprécier sur un plan scientifique, technique et environnemental la faisabilité du projet de revalorisation des fibres de bagasse en un matériau textile.

Pour mener à bien ce travail, dans un premier temps, il est question de déterminer les procédés d'extraction permettant d'obtenir des fibres fines à partir des particules de bagasse de canne. Il s'agit aussi d'évaluer l'impact de la structure initiale, ainsi que les conditions à réunir en vue d'obtenir des fibres aux propriétés intéressantes pour les matériaux textiles. Il est nécessaire de trouver un protocole d'extraction, dont les paramètres employés soient justifiés quant à leur impact sur les propriétés physico-mécaniques des fibres. Après quoi, des essais en termes de répétitivité de la méthode doivent être éprouvés au laboratoire.

Suite à cette extraction, la deuxième phase consiste en la caractérisation physico-mécanique mais aussi chimique des différentes fibres extraites. A partir des différents traitements mis au point, la comparaison des propriétés des fibres obtenues permet de valider ou de classer les méthodes d'extraction les unes par rapport aux autres. Le choix des paramètres étudiés a été établi dans l'optique d'une application textile, en considérant alors les caractéristiques incontournables du domaine textile, tel que souplesse des fibres, finesse, force spécifique, diamètre...

Finalement, après la sélection justifiée des fibres idéales fonction des propriétés déterminées précédemment, s'en suit l'étape de transformation (liée aux applications possibles). Des essais de filature ont été menés au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) de Montpellier, avec une classe de fibres, en vue d'obtenir un fil 100% canne.

CHAPITRE I
ENVIRONNEMENT ET ECONOMIE
DE LA FILIERE CANNE

La canne à sucre est une plante tropicale herbacée vivace, de la famille des graminées. Elle est cultivée à travers le monde pour sa tige, dont on extrait le jus pour la fabrication de sucre, d'éthanol (comme au Brésil) et de rhum (notamment dans les DOM²). Ces différentes transformations de la canne à sucre génèrent un résidu fibreux, la bagasse, très largement exploité à travers le monde pour sa teneur en cellulose et son haut pouvoir calorifique.

I. La canne à sucre

1. Origine et botanique

La canne à sucre est une graminée originaire de Nouvelle Guinée et des îles proches (Meslien, 2009). En culture dans toute l'Asie dès 300 av. J.-C., elle fut introduite aux petites Antilles par les Espagnols en 1493. La migration de la canne à sucre à travers l'Asie, la Mélanésie, le Moyen Orient et l'Afrique du nord s'est accompagnée d'un fort processus d'hybridation et de sélection variétale. Au plan taxonomique, l'appellation « canne à sucre » recouvre en réalité un complexe constitué de plusieurs espèces et de leurs hybrides dont les principales sont données en Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs moyennes de saccharose, de sucres réducteurs et de fibres du complexe *Saccharum*

Genres et espèces	No. de clones	Taux moyen de saccharose, %f	Teneur moyenne en sucres, %f	Taux moyen de fibres, %f
<i>S.officinarum</i>	25	17,48 ± 0,35	0,32 ± 0,02	9,8 ± 0,4
<i>S.spontaneum</i>	30	5,35 ± 0,38	1,66 ± 0,06	31,8 ± 0,9
<i>S.robustum</i>	10	7,73 ± 0,83	0,27 ± 0,02	24,8 ± 1,6
<i>S.sinense</i>	2	13,45 ± 0,02	0,38 ± 0,08	12,8 ± 2,0

² Les DOM sont les départements français d'outre-mer (Guadeloupe, Guyane française, Martinique, Mayotte, Réunion)

Le botaniste Botta a pu établir en 1978, une classification (adoptée depuis) de ces différentes espèces de canne à sucre, comme suit (Botta, 1978) :

Royaume :	Eukaryota	Tribus :	Andropogonoidea
Sous-Royaume :	Cormobionta	Genre :	<i>Saccharum</i>
Division :	Magnoliophytine	Espèces :	<i>S. officinarum L.</i>
Classe :	<i>Liliatee</i>		<i>S. robustum Jesw.</i>
Order :	<i>Poale</i>		<i>S. spontaneum L.</i>
Famille :	<i>Poaceae (Gramineae)</i>		<i>S. barberi Jesw.</i>

La botanique de la canne à sucre décrit les principaux éléments tige, bourgeon, feuille et racine. La matière utilisée pour cette étude est essentiellement issue des tiges de canne à sucre. Elle est décrite par la suite, d'un point de vue morphologique et anatomique. Une telle approche de la canne est la base de l'interprétation des différents changements de structures observables après chaque traitement, qu'il s'agisse de la canne ou de la bagasse.

1.1. Morphologie de la tige de canne

La reproduction de la canne est asexuée par boutures³ contenant chacune, un ou plusieurs bourgeons. Sur chaque bourgeon peut se développer une tige primaire, qui à son tour peut former des tiges secondaires et ainsi de suite comme illustré Figure 1.

³ Les boutures sont des plants, ou canne de plantation

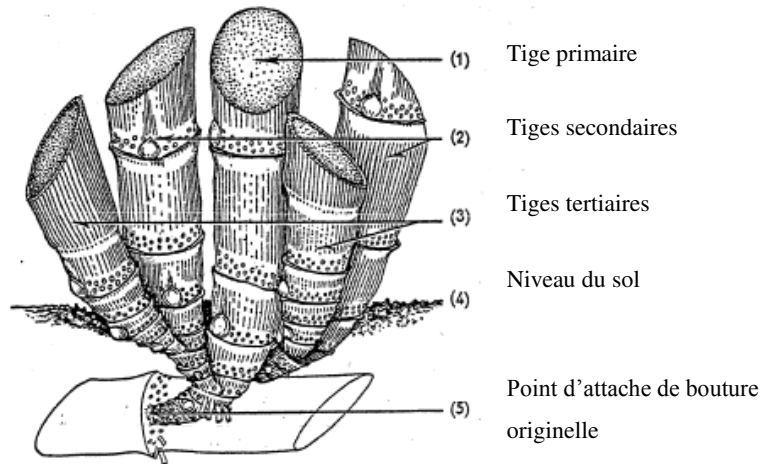


Figure 1. Portion souterraine d'un pied de canne montrant les tiges (Martin, 1938)

La tige de canne à sucre, illustrée Figure 2, est constituée d'une succession de nœuds, où sont implantés les yeux (bourgeons), mais aussi d'entre-nœuds, gorgés de sucre à maturité. La longueur des entre-nœuds, très réduite au niveau du sol, augmente graduellement le long de la tige pour atteindre jusqu'à 10 à 15 cm. Les variations de longueur des entre-nœuds d'une tige sont associées à la grande période de croissance. La tige peut atteindre 2 à 5 mètres de hauteur, avec un diamètre de 2 à 4 cm. Une touffe de cannes compte généralement 10 à 15 tiges. Chaque tige porte des feuilles alternées atteignant 1 à 2 m de long et 3 à 8 cm de large.

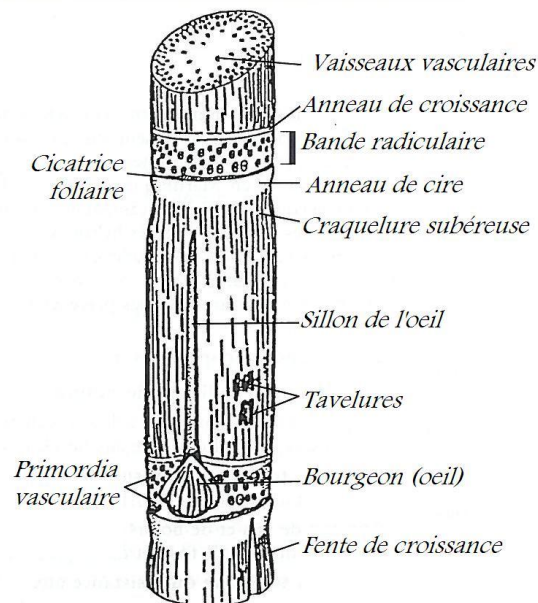


Figure 2. Dessin d'un tronçon de canne entre deux nœuds (CTCS, 2013)

Des cires recouvrent la surface de l'entre-nœud. Elles se caractérisent par une grande quantité de filaments très fins et très serrés. La Figure 3 représente l'épiderme recouvert d'un dépôt de

cire, sous forme de balconnets très serrés. Les cellules de l'hypoderme sont fortement lignifiées (Artschwager, 1925).

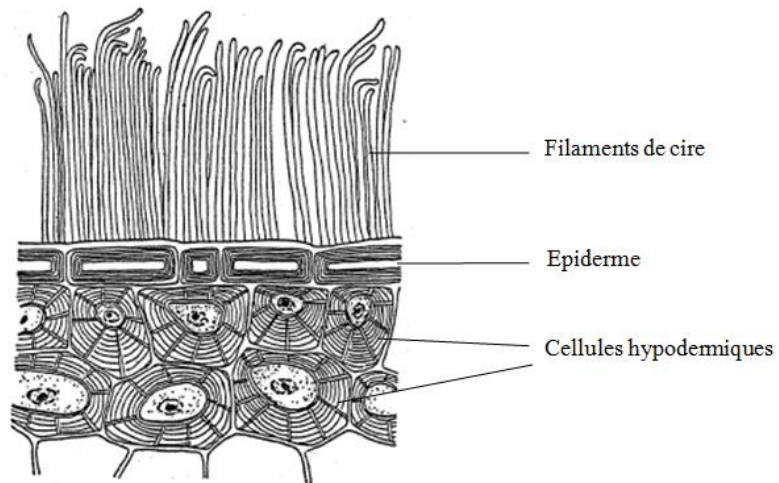


Figure 3. Section longitudinale à travers une région périphérique d'un entre-nœud à maturité (Artschwager, 1940)

Les racines de la canne sont des racines de bouture qui naissent de l'anneau radulaire de la bouture (région de base de l'entre-nœud) avant de devenir des racines de tige qui se développent en racines superficielles et ramifiées. Les racines de soutien, plus profondes et plus denses, peuvent descendre jusqu'à 6 mètres de profondeur. Les racines de la canne offrent aussi une protection des sols contre l'érosion, due aux fortes pluies et aux cyclones. A noter qu'après chaque coupe, un nouveau système racinaire se constitue (van Dillewijn, 1960).

1.2. Anatomie de la canne

La tige de canne à sucre se structure de 3 composantes importantes : l'épiderme, les vaisseaux fibro-vasculaires et l'écorce présentés Figure 4.

- L'épiderme (dernière couche externe de la tige de canne) en numéro 1 sur la Figure 4 contient deux types de cellules alternées l'une par rapport à l'autre : des cellules rectangulaires allongées (appelées longues cellules) et des cellules courtes, qui sont subéreuses et siliceuses.

L'épiderme est une couche fine mais très dense qui se trouve à la surface de l'écorce. Bien que non-fibreuse, elle est très résistante pour la digestion. Elle est généralement de couleur

plus sombre que l'écorce ou que la moelle. La couche épidermique⁴ représente en moyenne 5% m.s.⁵ de la tige de canne (Tappi, 1986).

- Les vaisseaux fibro-vasculaires, présents en 3 et 4 sur la Figure 4, sont assez largement espacés dans la partie centrale de la tige et augmentent en nombre vers la périphérie, en même temps que leur dimension décroît (Martin, 1938).
- L'écorce ou zone corticale consiste en plusieurs assises de cellules généralement sclérenchymateuses. L'écorce représente 50% m.s. de la tige. Elle est constituée d'une forte qualité de paquets de fibres concentrées et denses. Elles sont orientées parallèlement à l'axe de la tige, excepté pour celles du nœud, donnant la rigidité à la tige.

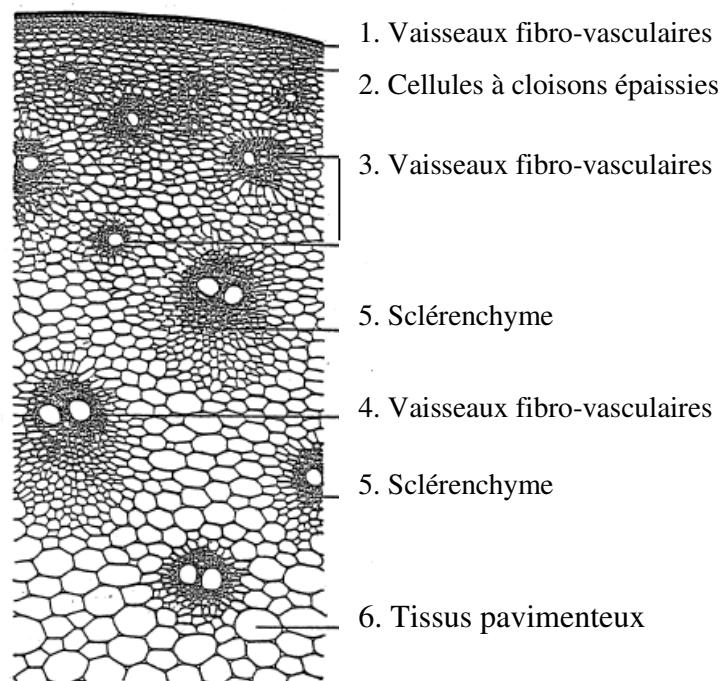


Figure 4. Section transversale à travers la partie externe d'un entre-nœud (Martin,1938)

Les différents éléments se comportent différemment l'un l'autre, que ce soit d'un point de vue mécanique, chimio-mécanique et chimique, lors des étapes de transformation, compte tenu de leurs caractéristiques physiques (même chimiques), très différentes. Le Tableau 2, présente

⁴ L'épiderme est certainement la plus indésirable partie de tige de canne pour les traitements chimiques et mécaniques de l'industrie papetière.

⁵ m.s. mis pour matière sèche en poids

les caractéristiques dimensionnelles des composants de canne à sucre comparés à celles du bois (United, 1955).

Tableau 2. Caractéristiques dimensionnelles des composants de canne à sucre

Matière cellulosique	Longueur, mm	Diamètre, μm	Moyenne Longueur/Diamètre
Fibres de canne à sucre	0,80 < 1,70 < 2,80	10,2 < 20,0 < 43,1	85 :1
Parenchyme ou moelle	0,84 max	140 max	-
Vaisseau	1,35 max	150 max	-
Bois de Conifères tempérés	1,2 à 7,3	22 à 50	75 :1
Bois d'arbres feuillus tempérés	0,3 à 2,7	10 à 46	50 :1

Sur la Figure 4, les cellules à cloisons épaissies formant l'écorce apparaissent en numéros 2. Dans les différentes régions de la tige, l'écorce varie tant en épaisseur qu'en composition. En numéros 5 et 6 de la Figure 4, sont représentés respectivement le sclérenchyme et le tissu pavimenteux. La Figure 5 permet d'apprécier les cellules d'une coupe longitudinale d'un entre-nœud de canne à sucre.

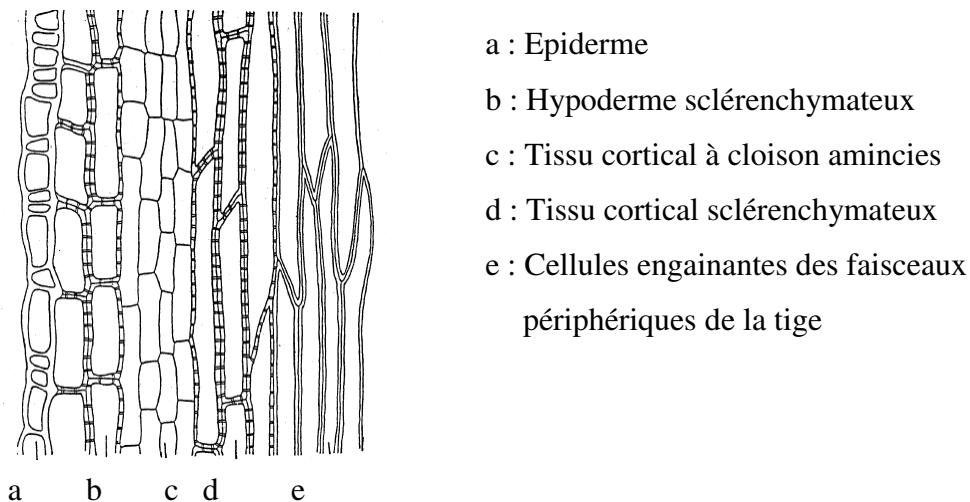
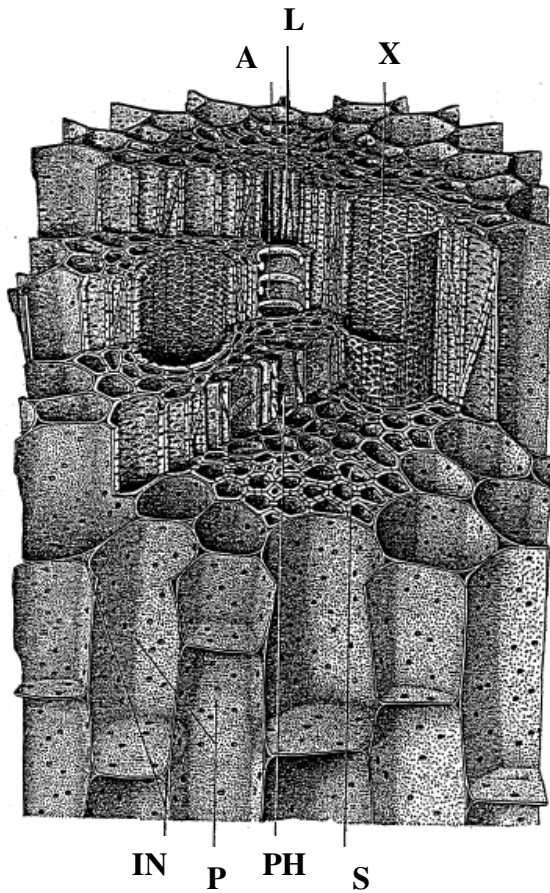


Figure 5. Section longitudinale à travers la région périphérique d'un entre-nœud à maturité (Artschwager, 1925)

La Figure 6 donne une autre vue de tige de canne. C'est ici un diagramme des différents éléments constitutifs de la tige, d'après les études de Martin (Martin, 1938).



- A : Eléments annulaires
- L : Lacunes ou tubes aérifères
- X : Vaisseau du xylème
- IN : Espaces intercellulaires
- P : Parenchyme ou cellules d'accumulation
- PH : Phloème
 - s : Cellules tamis en tube
 - c : Cellules compagnes
- S : Sclérenchyme

Figure 6. Dessin diagrammatique d'un faisceau vasculaire de la tige et des cellules environnantes de réserve (Martin, 1938)

2. Culture d'un champ de canne à sucre

Le rendement en sucre d'un champ de canne est dépendant de cinq facteurs : l'énergie solaire qui comprend l'apport en chaleur et en lumière, l'humidité dépendante de l'irrigation et des pluies, l'état du sol fonction des différents apports nutritifs du sol, la valeur du travail et la méthode culturale choisie. La durée d'exploitation d'un champ (Figure 7) est de cinq à huit ans, avec un cycle végétatif de douze mois.



Figure 7. Champs de canne à sucre

La multiplication s'effectue par bouturage de tronçons ligneux. Les boutures de canne (portions de tige comprenant 3 nœuds) sont enfouies sous terre à une certaine profondeur, fonction de la température du sol. Pour que la canne puisse lever, 2 à 3 semaines sont nécessaires pour une température du sol comprise entre 26°C et 34°C (influencée par l'effet de la lumière et de l'humidité). Au cours du tallage, les yeux ou bourgeons des nœuds donnent naissance à d'autres tiges, donnant des touffes de cinq à vingt tiges en moyenne.

La canne lors de sa croissance passe par une phase de maturation, au cours de laquelle elle se nourrit d'eau durant la saison des pluies. En revanche, à la période de sécheresse⁶, compte tenu de l'ensoleillement, de la fraîcheur nocturne, mais aussi de la photosynthèse cette eau

⁶ On distingue deux saisons fondamentales dans les régions tropicales de l'hémisphère nord (pour les DOM : Martinique, Guadeloupe) : le carême (période de sécheresse), et l'hivernage (saison des pluies).

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

s'évapore, permettant l'accumulation de sucre dans les tiges (saccharose). Cette phase est appelée maturation et débute généralement au neuvième mois.

Le taux de saccharose accumulé dès le neuvième mois atteint un pic avant de décroître progressivement. Ainsi, afin de conserver le maximum de sucre dans la tige, la récolte débute lors du pic de taux de saccharose.

Le diagramme en Figure 8 illustre le processus d'accumulation de saccharose dans les tiges de canne (ICIDCA, 1990).

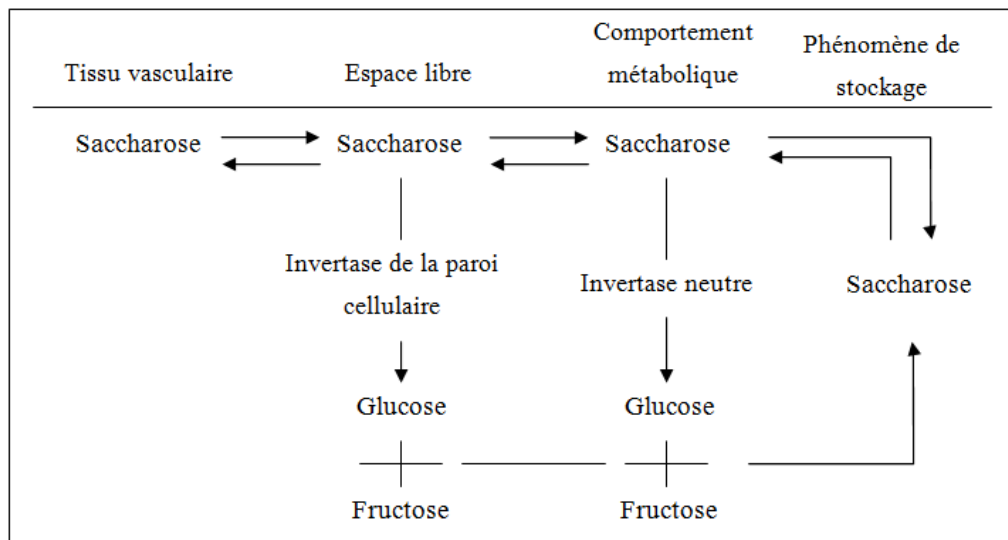


Figure 8. Processus d'accumulation de saccharose (ICIDCA, 1990)

Les industriels et agriculteurs évaluent d'avantage les taux de sucre que la teneur en fibre pour déterminer la maturité d'une canne à sucre.

Ainsi, la récolte consiste après 10 à 14 mois de culture, à couper le plus près possible du sol les cannes et à en éliminer le sommet. Aujourd'hui, elle s'effectue par des méthodes partiellement ou totalement mécanisées ; la récolte manuelle étant de plus en plus rare (dépendant des surfaces des plantations).

3. Données mondiales de production

La canne à sucre est cultivée dans plus de 100 pays à travers le monde (Figure 9), et sa production annuelle a atteint les 1290 millions tonnes en 2012 (Faostat, 2013). Principalement

cultivée comme base de l'alimentation pour son sucre, elle est aussi transformée en alcool (ou rhum) et connaît un grand essor dans la fabrication de bioéthanol, au Brésil notamment.

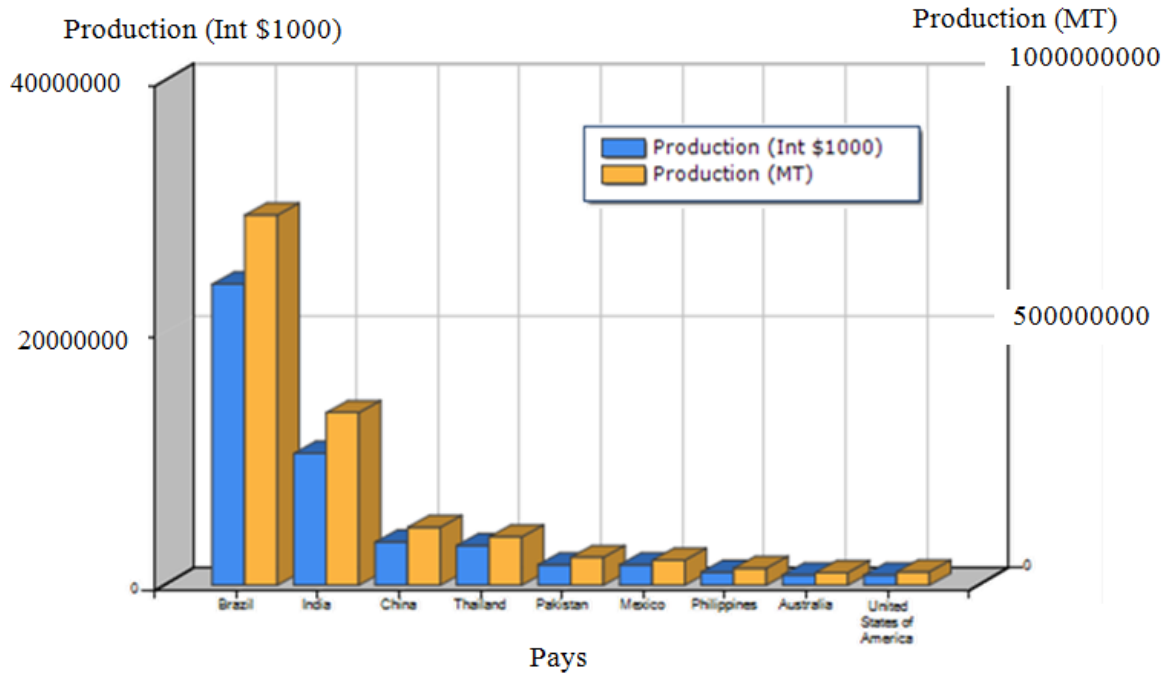


Figure 9. Principaux pays producteurs de canne à sucre en 2011 (Faostat, 2013)

Les différentes unités de transformation génèrent par an pas loin de 412,8 millions tonnes de bagasse, le sous-produit fibreux de la transformation de la canne. Représentant 30% du tonnage de cannes broyées, la bagasse est principalement utilisée comme combustible dans les chaudières et l'excédent comme engrais pour les sols.

Les quantités mondiales de bagasse disponible, s'élèvent à près de 10% (de la bagasse totale générée), transformées en Inde et à Cuba, en pâte à papier à partir de cellulose pure à 92%. C'est ici une ressource renouvelable qui pourrait être revalorisée par la filière textile, compte tenu de sa teneur en cellulose.

4. Transformation sucrerie /distillerie : schémas martiniquais

Dans cette partie, l'accent a été mis sur les étapes d'évaluation de la richesse saccharine de la canne en sucrerie, puisque l'essentiel des informations a été recueilli à la sucrerie Le Galion⁷. Avant d'aborder les techniques de transformation de la canne développées en Martinique, une précision est faite quant aux différentes variétés de canne existant sur l'île, reconnaissables pour certaines par leur couleur : les tiges peuvent être jaunes, violettes, vertes ou brunes, selon la variété et l'exposition (Annexe 1).

4.1. Sélection variétale

Le schéma de sélection variétale est une procédure longue de 10 ans, qui s'effectue au Centre technique de la canne et du sucre de Martinique (CTCS), après une mise en quarantaine au CIRAD-CA de Montpellier. Les variétés de canne sont développées afin de s'adapter aux différentes conditions de culture, tout en présentant un fort potentiel sucrier, ainsi que des qualités rhumières confirmées (CTCS, 2013).

Les variétés de canne cultivées à des fins industrielles proviennent d'une sélection variétale établie en trois phases :

- Création variétale dans des stations d'hybridation : 2 ans
- Mise en quarantaine au PERSYST de Montpellier : 2 ans
- Sélection à la Martinique : de la station du CTCS aux stations délocalisées : 10 ans

Suite à ce schéma de sélection, la variété considérée pourra être cultivée au bout de 12 à 15 ans. La rigueur de la sélection dépend de critères bien définis répondant aux rendements agricoles et à la richesse, ainsi qu'à l'adaptation aux conditions climatiques. Le CTCS a retenu comme principaux critères de sélection relatifs au rendement agricoles :

- La levée et couverture du sol
- Le tallage et croissance
- Le tonnage par hectare

⁷ La sucrerie le Galion est la dernière sucrerie de la Martinique. Elle se situe à Trinité, dans le Nord-est de l'île, versant Atlantique.

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

- La longévité de la culture

Le taux de saccharose extractible en sucrerie, ainsi que les qualités rhumières de la canne dépendent essentiellement des principaux critères technologiques, à savoir :

- Le cycle de maturation : Brix (teneur en matière sèche soluble du jus)
- La teneur en fibre
- La richesse saccharine (Pol% Canne⁸)
- La pureté du jus
- L'aptitude rhumière

Les procédés de transformation généraux de la canne en sucrerie et en distillerie en Martinique sont présentés par des schémas de fabrication dans les sous parties suivantes, Figure 10 et Figure 11.

4.2. Dans la sucrerie

La sucrerie Le Galion récupère deux types de cannes (selon le type de terrain de culture):

- Les « cannes longues » désignant des tiges de canne longues de 2 mètres en moyenne avec ou sans paille (selon les moyens des agriculteurs).
- Les « cannes machine » qui sont en tronçons de canne de 20 à 30 cm de longueur.

Lors de la réception des cannes, les chargements sont pesés puis contrôlés pour leur richesse saccharine. Après pesée, un échantillon de canne est prélevé pour analyse de la teneur en sucre.

Pour ce faire⁹, cet échantillon est dans un premier temps, broyé et conditionnée dans un sac étanche. On prélève 500g de canne broyée que l'on place sous presse à 240 bars durant 2 minutes, pour en extraire le jus.

Un résidu fibreux résulte de cette action, communément appelé « gâteau de bagasse » (en réalité canne broyée humide). Les deux résidus jus et gâteau seront pesés séparément et leur

⁸ Pol% canne est la teneur en saccharose en gramme, pour 100 ml de jus de canne.

⁹ La technique de mesure présentée ici a été expérimentée sur place, au Laboratoire Technique de la sucrerie le Galion à Trinité, en 2010.

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

poids enregistrés. Le jus sera ensuite filtré et analysé pour déterminer deux facteurs (CTCS, 1990) :

- Le brix réfractométrique qui, après correction de température, donne la quantité de matière sèche dissoute dans le jus (matière sèche g/100g de jus= sucre + non sucré)
- Le pol% est mesuré au saccharimètre automatique (teneur en saccharose g/100mL de jus), après clarification du jus. Le sucre contenu dans la canne est constitué de glucose, fructose et saccharose. Seul le saccharose cristallise, permettant l'obtention de sucre. Cette teneur s'avère ainsi être l'un des facteurs phare de l'industrie sucrière.

Ces valeurs associées entre elles (poids du gâteau, brix, pol%) définissent un coefficient, appelé Coefficient de Paiement (CP) qui lui détermine le prix à la tonne des cannes du chargement. Ceci servira à rémunérer les différents planteurs suite aux livraisons. Par ailleurs, la paille dont est composée en partie la canne à sucre, est un élément important dans le processus de paiement : plus elle est abondante dans le chargement, plus elle contribue à son appauvrissement qualitatif, diminuant ainsi le prix de la canne.

Après la pesée, les camions déchargent leurs chargements dans la cour à cannes et ce, quel que soit les résultats des analyses. Le taux de saccharose diminuant rapidement, une fois la canne coupée, les stocks ne sont pas gardés plus de 4 heures en moyenne. Aussi, afin de maintenir un bon roulement des équipes, l'usine tourne tous les jours de campagne: du lundi midi au dimanche midi en 3/4. Le nombre d'employés à l'usine pour cette période varie entre 60 et 80 (tous postes confondus).

Près de 60 000 et 90 000t/an de cannes sont ainsi réceptionnées par la sucrerie durant la campagne (sur une moyenne de 10 ans).

Dans l'unité de transformation Figure 10, les moulins à l'étape d'extraction (au nombre de 3) sont réglés à une pression proche des 200 bars, et l'eau pour l'imbibition à une température de 70°C.

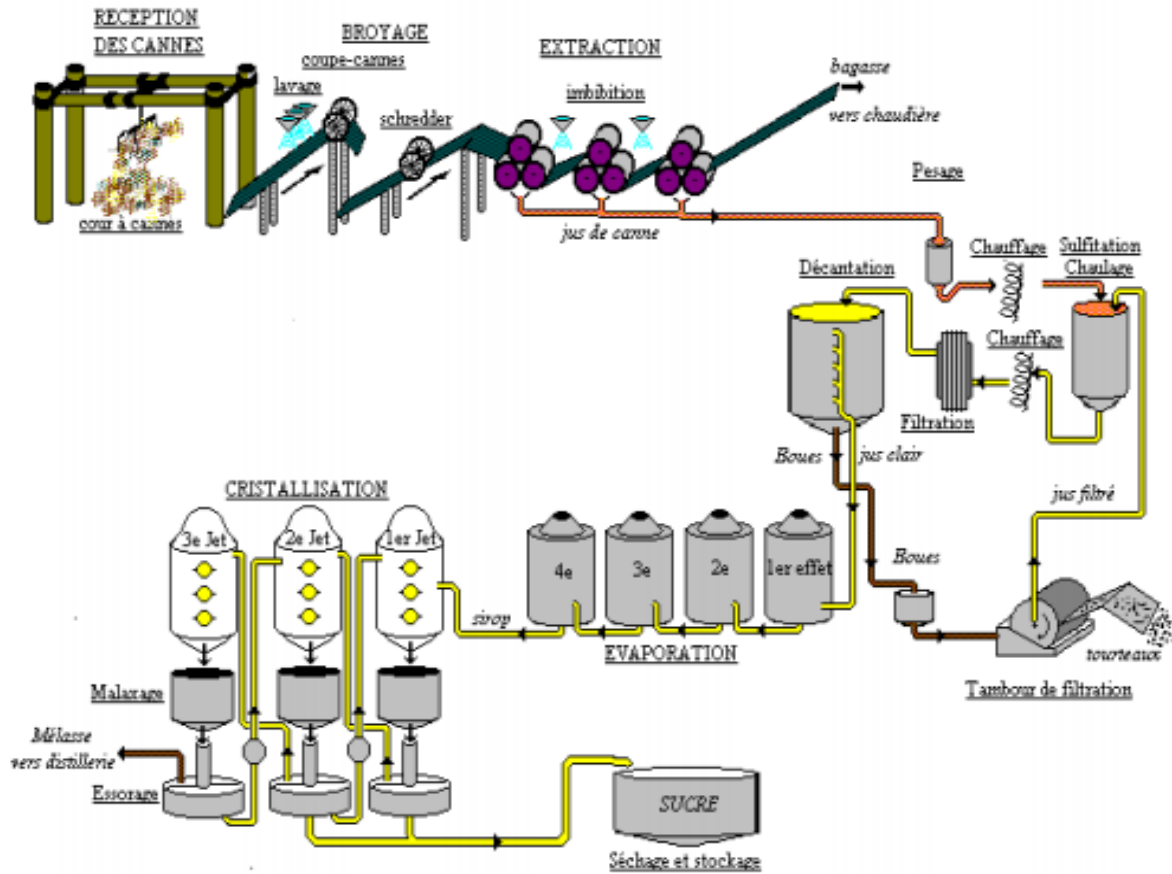


Figure 10. Schéma de fabrication du sucre dans la sucrerie (CTCS, 2013)

4.3. Dans la distillerie

Le fonctionnement de la distillerie présenté Figure 11, débute par la réception des cannes pour finir en bouteille du rhum agricole.

La canne livrée en distillerie agricole est tout d'abord pesée. Un échantillon, prélevé manuellement, permet de déterminer la qualité du chargement, en fonction de la teneur du jus en matières sèches dissoutes (Brix). Les cannes sont ensuite déchargées, défibrées et pressées par des moulins horizontaux. Les modalités de stockage dans la cour à cannes et de broyage varient selon les distilleries. Par imbibition composée, le jus est extrait au niveau des moulins. Comme en sucrerie, la bagasse est utilisée pour la production énergétique de chaque distillerie.

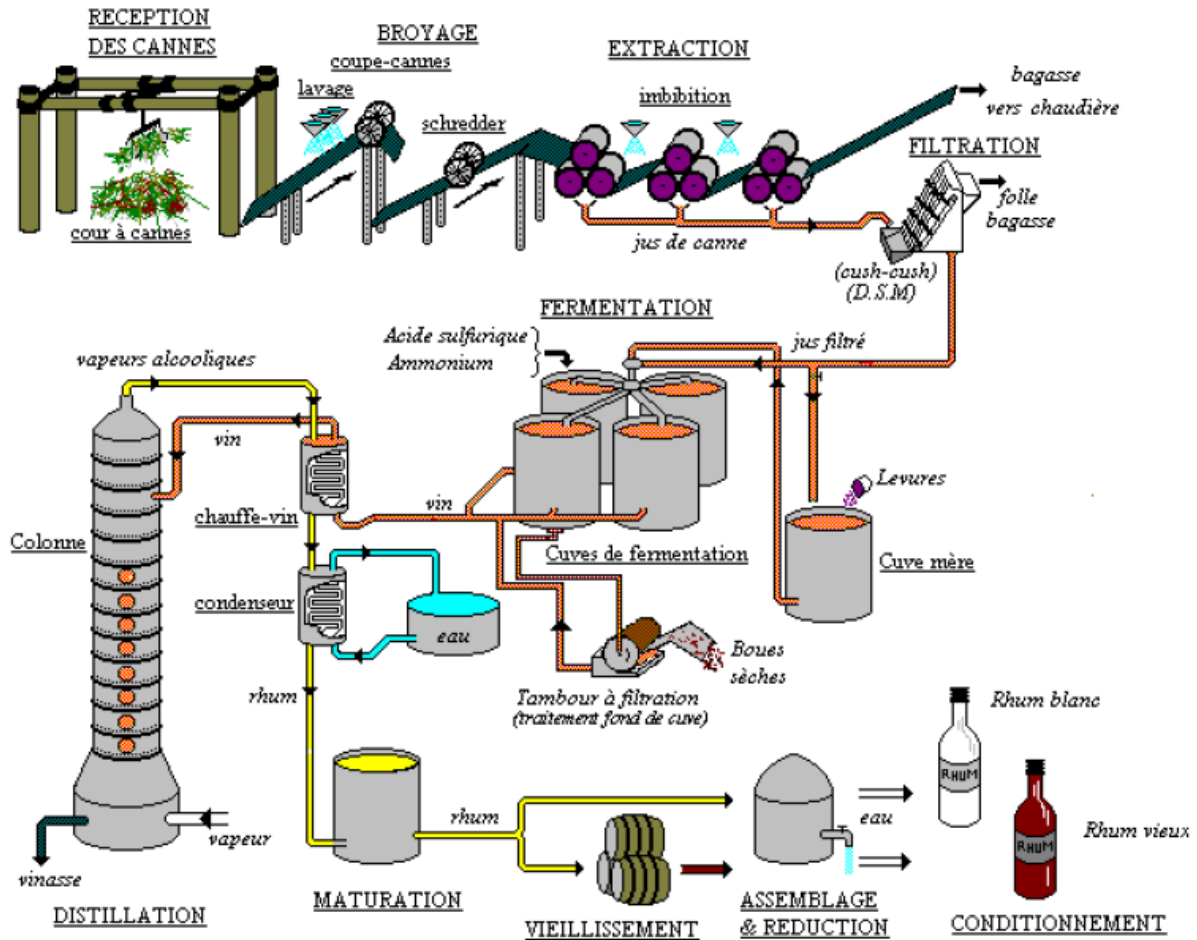


Figure 11. Schéma de fabrication de rhum dans une distillerie (CTCS, 2013)

5. Valorisation des coproduits

5.1. Valorisation des coproduits de sucrerie

Les coproduits de la sucrerie apparaissent à différentes étapes de transformation dans la sucrerie. Pour une sucrerie comme le Galion, les principaux coproduits sont des écumes, de la vinasse, des boues et autres déchets relevant du conditionnement du sucre.

- La vinasse est principalement utilisée pour la fabrication de « rhum grand arôme ». L'excès résiduel de vinasse est traité par méthanisation, qui consiste à transformer la matière organique en méthane et en CO₂ au cours d'une succession de réactions via un

écosystème bactérien complexe. Les gaz produits peuvent alors être utilisés comme combustibles.

- Les boues et écumes récupérées sont fréquemment recyclées dans l'agriculture comme substance d'épandage pour enrichir les sols.
- La bagasse est utilisée comme combustible (pour fournir l'électricité de l'usine) et l'excédent comme épandage au sol, pour l'alimentation animale et en faible proportion pour la production de champignons Pleurotte biologique (abordé en section II.IV).
- La mélasse est le résidu après la dernière cristallisation du sucre. C'est un liquide très visqueux (densité 1,4), de couleur sombre, constitué de saccharose (35%), d'eau, de composés azotés et de cendres (Patureau, 1989). Les mélasses en Martinique, non complètement épuisées en sucre, sont utilisées, en qualité de matière première, exclusivement pour la production de rhums industriels : Rhum traditionnel de sucrerie et Rhum « Grand Arôme » (CTCS, 2013).
- Les autres déchets relèvent du conditionnement et de l'emballage : plastiques, cartons, bois, hydrocarbures sont récupérés pour recyclage ou mis en décharge.

5.2. Valorisation des coproduits de distillerie

Tout comme en sucrerie, des coproduits sont générés tout au long de la chaîne de transformation en distillerie. On retrouve :

- Les vinasses constituent les principaux effluents des distilleries et les déchets les plus problématiques de la filière canne-sucre-rhum. Ces résidus de la distillation sont composés d'eau, de matières organiques issues de la canne à sucre et du métabolisme bactérien, de matières minérales (cuivre issu des plateaux des colonnes de distillation), d'ions ajoutés lors de la fermentation alcoolique, d'antiseptique. Elles présentent de fortes charges polluantes : 950 à 1900 kg DCO/m³ d'alcool pur produit pour le rhum industriel et 250 kg DCO/ m³ d'alcool pur pour le rhum agricole.

Parce que ces effluents sont extrêmement abondants : 20 l/litre d'alcool pur en moyenne, soit 40 milliards de litres par an pour la production mondiale, déversées sans précaution dans le milieu naturel, elles génèrent une véritable pollution des eaux accompagnée d'odeurs nauséabondes.

Afin de pallier ces inconvénients, diverses alternatives de traitement des vinasses ont été développées. De par leur composition minérale et organique, elles peuvent être utilisées comme amendement, à condition toutefois de procéder à des contrôles fréquents et rigoureux de la qualité des sols. L'utilisation comme complément alimentaire, la production de biomasse microbienne, les traitements physiques (thermo-concentration et incinération) sont autant de traitements et emplois possibles des vinasses. À cela s'ajoute également la méthanisation, et l'emploi des gaz produits comme combustibles (Nuissier et al., 2005).

- La bagasse de distillerie est utilisée comme combustible pour la production d'électricité, et les quantités excédentaires sont parfois redistribuées à la sucrerie ou mise en épandage au sol.
- Les déchets d'emballage et de conditionnement des bouteilles de rhum.

II. La canne à sucre à la Martinique

La canne à sucre fut introduite en 1493 dans la Caraïbes par Christophe Colomb et arriva en Martinique en 1635. Après des débuts difficiles, c'est en 1650 que la première sucrerie fonctionnant avec un moulin à eau fut construite par les Jésuites (Meslien, 2009). A cette époque, il se cultivait sur l'île du tabac, du coton, de l'indigo, du cacao et de la canne à sucre. L'arrivée en 1654 de Juifs et Protestants hollandais -chassés du Brésil- en Martinique, a permis le développement des habitations et l'envol de la production sucrière, propulsés par leurs nouvelles techniques de production. Elle connut des années glorieuses avec une main d'œuvre exclusive d'esclaves, rendant l'affaire très rentable pour les colons. Alors qu'autrefois les champs étaient cultivés par les esclaves noirs déportés d'Afrique, après l'abolition de l'esclavage en 1848, de la main-d'œuvre fut ramenée d'Inde afin de combler le manque de travailleurs noirs devenus libres.

1. Empreinte sociale de la canne dans le paysage martiniquais

La période esclavagiste a permis l'enrichissement des colons de l'île, tout en dénaturant la valeur de l'homme dans le travail au champ.

Après un déclin exponentiel des sucreries, suites aux différentes crises économiques, face aux à la concurrence internationale, l'île ne compte plus qu'une seule sucrerie fonctionnant bien difficilement depuis ces dernières années. L'évolution de la production cannière sur les onze dernières années en Martinique est donnée Tableau 3. La surface cultivée en 2012 occupe près de 3872 ha (DAF 12), soit 13,9% de la surface agricole utile, illustré en Figure 11. La canne a ainsi permis la production de 175 305 tonnes dont 40% ont été destinées à l'usine du Galion pour la fabrication de sucre, de rhum traditionnel de sucrerie et de rhum grand arôme ; le reste étant consacré aux distilleries, à la production de rhum AOC¹⁰ (75 000 HAP¹¹).

¹⁰ AOC : Appellation d'origine contrôlée

¹¹ HAP : Hectolitre d'alcool pur

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

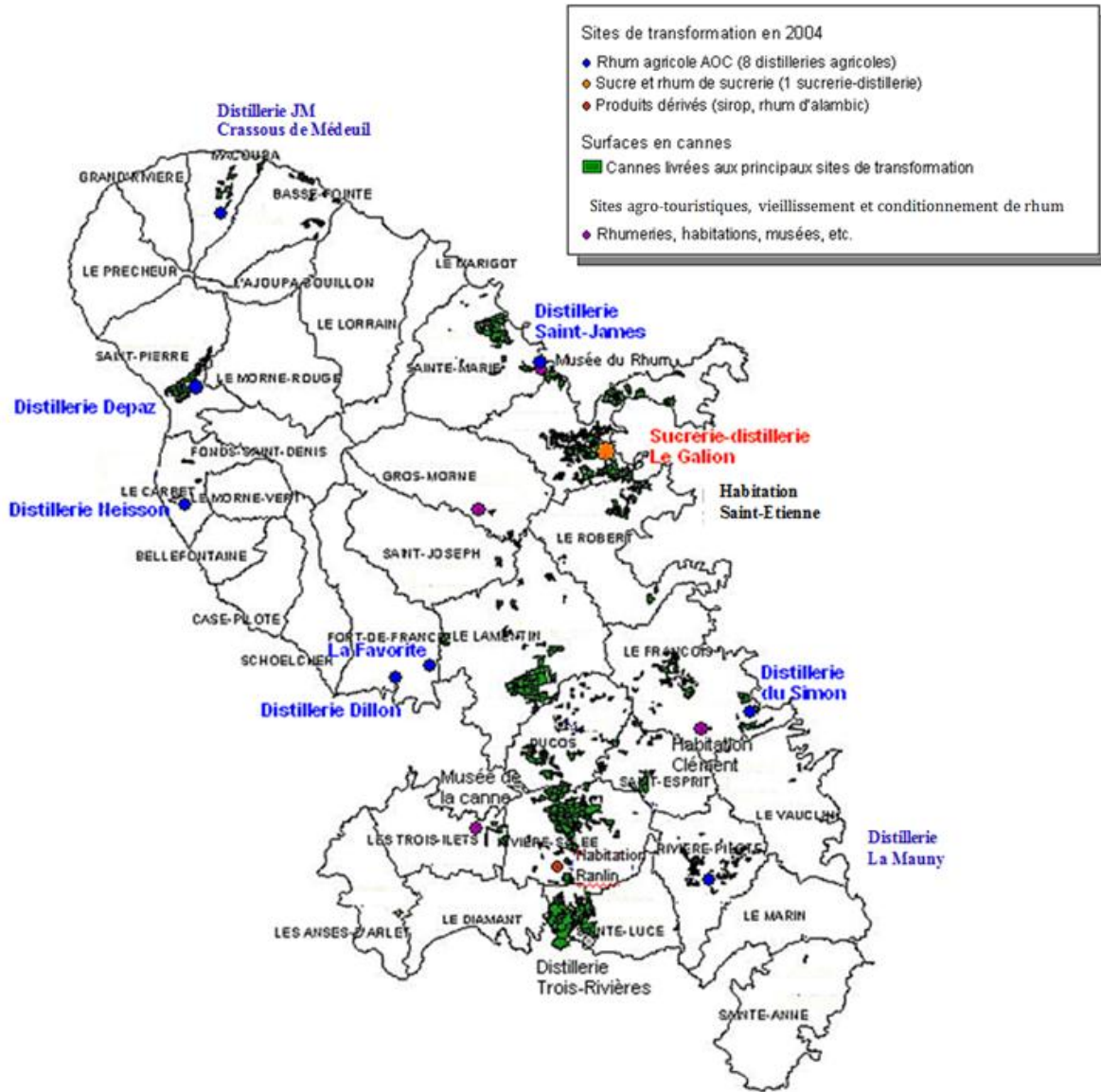


Figure 12. Sites de transformation de la canne et surface plantée en canne par commune à la Martinique (CTCS, 2013)

Le Tableau 3 permet d’observer les fluctuations de récolte sur les onze dernières années et de constater ainsi l’apport préférentiel de cannes pour les distilleries.

Tableau 3. Production agricole et industrielle de 2001 à 2012 (CTCS, 2013)

Années	Cannes brogées (tonnes)			Cannes sucrerie		Rhum Fabriqué (HAP)		
	Sucrerie-distillerie du Galion	Distilleries agricoles	Total cannes	Fichesse	Sucre produit(t)	Agricole AOC "Martinique"	Industriel	Total
2001	80 707	123 010	203 717	13,88	5 727	78 160	13 543	91 703
2002	86 268	152 385	238 653	11,58	5 340	80 236	13 614	93 850
2003	76 422	104 316	180 738	11,58	5 181	64 969	13 430	78 399
2004	92 064	130 635	222 700	10,71	4 119	66 763	13 889	80 652
2005	82 860	126 527	209 207	11,22	4 394	67 195	13 571	80 766
2006	59 620	105 476	165 096	12,9	4 073	62 505	14 559	77 064
2007	84 490	138 537	223 027	12,92	5 849	79 352	3 691	83 043
2008	75 497	132 825	208 322	12,53	4 688	74 537	16 068	90 605
2009	89 476	133 817	223 293	11,83	5563	70 592	15 949	86 541
2010	70 287	131 934	202 221	11,73	4055	67 989	15 096	83 085
2011	68 993	137 677	206 670	11,27	3733	69 246	12 132	81 378
2012	47 368	127 937	175 305	12,92	2920	72 353	9719*	72 353
Moyenne /10ans	76 171	128 756	204 912	12,17	4 632	71 158	13 231	83 287

En Martinique, la filière canne emploie près de 3 700 personnes, dont 1 400 salariés et 2 300 emplois indirects (transport, commercialisation). 30% des salariés sont des saisonniers, dont en moyenne 200 originaires des îles voisines, en majorité de Sainte-Lucie et d'Haïti. Toutefois, avec l'explosion de la mécanisation de la récolte, cette proportion diminue d'année en année, faisant place à du personnel recruté localement, plus qualifié.

L'avenir de la filière canne en Martinique dépend aujourd'hui des aspects socio-économiques, environnementaux et industriels de l'île.

2. Economie de la filière canne

« Nous n'imaginons pas la disparition du sucre à la Martinique. Mais nous sommes inquiets pour l'avenir, sans plus de cannes traitées à l'usine » déclarait M. Philippe ANDRE, directeur général de la SAEM le Galion (Gallion, 2013).

Compte tenu de la grande dépendance climatique de la culture de la canne, mais aussi des subventions octroyées par l'état aux planteurs, la production totale connaît un certain désintéressement de ses principaux acteurs. On observe un déclin de plus en plus marqué, des réceptions de cannes vers la sucrerie, en faveur des différentes distilleries de l'île.

Ceci s'explique par une grande valeur ajoutée du rhum de distillerie, qui depuis l'obtention en 1996 de l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) a été propulsée sur la scène internationale. Pourtant, depuis cette accréditation se repose la problématique de la concurrence : sucrerie/

distillerie. En effet, avec un coût d'achat des cannes en distillerie, supérieur de 130% par rapport à la sucrerie, c'est une considérable baisse de l'apport en canne qui se perpétue au fil des années, comme présenté Figure 13, ébranlant progressivement l'industrie du sucre.

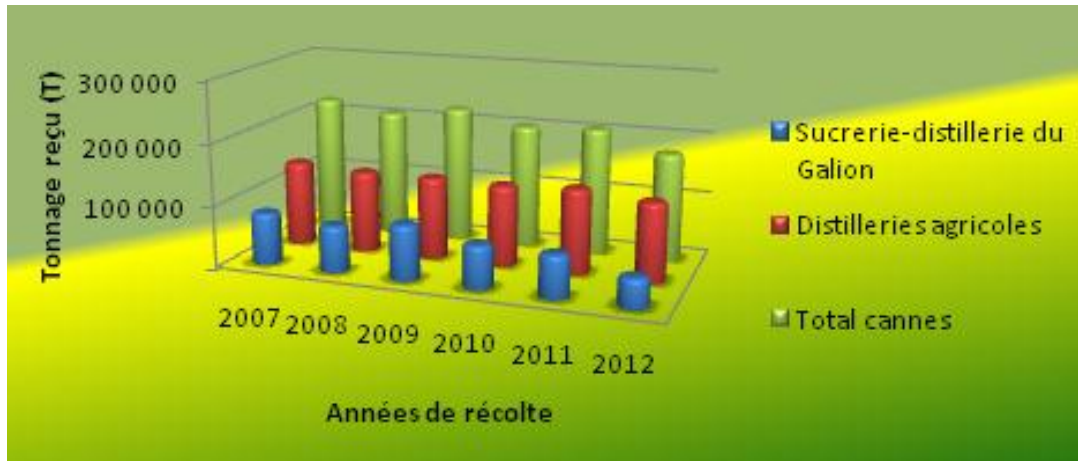


Figure 13. Répartition des livraisons de canne entre sucrerie et distilleries, en Martinique (CTCS, 2013)

Aujourd'hui la sucrerie ne réceptionne plus que de 33% de cannes contre 67% pour la distillerie. Aussi, une forte diminution du nombre de planteurs est constatée depuis quelques années. Trois facteurs majeurs sont à l'origine de cette diminution :

- l'inefficacité des nouveaux herbicides,
- l'irrégularité des saisons (pluviométrie, ensoleillement pendant le cycle végétatif de la plante) liés au réchauffement planétaire,
- le prix d'achat de la canne qui lui, n'évolue que très faiblement.

On constate l'effet des restrictions budgétaires qui touchent directement les planteurs, surtout les petits planteurs. L'amenuisement des apports au niveau des aides octroyées aux agriculteurs, impacte la filière toute entière, ce qui se répercute sur l'économie de l'île. Les planteurs, frustrés du manque à gagner abandonnent et délaissent de plus en plus la culture de la canne, s'obligeant à une reconversion professionnelle qui leur garantirait des revenus moins incertains.

Aussi, en vue de maintenir la filière, le Programme de développement rural de la Martinique prévoit différentes mesures d'accompagnement. On retient principalement :

- La modernisation et l'encadrement technique des exploitations

- La participation des agriculteurs à des démarches de qualité alimentaire
- Des actions d'information et de promotion
- Une utilisation durable des terres de canne par les dispositifs ICHN¹² et MAE¹³

Afin de connaître l'étendue des possibilités qu'offre la canne et produits dérivés avant toute mise en place de nouvelle structure/filière, des études préalables des propriétés les plus caractéristiques de la canne s'avèrent utiles et indispensables.

III. Questions et Objectifs de recherche

1. Obtention de fibres de bagasse de canne à sucre

Les fibres de bagasse sont employées dans cette étude afin de déterminer s'il est possible de revaloriser ce sous-produit de l'industrie sucrière et rhumière de la Martinique dans une nouvelle perspective de diversification. C'est à partir du potentiel fibreux de la canne, de l'ordre de 16% m.s., que les fibres sont étudiées. L'objectif premier de ces recherches est la mise en place d'un protocole d'extraction des fibres. Le second objectif concerne la caractérisation de ces fibres extraites, en vue d'une application textile.

La bagasse, principalement employée comme combustible (en distillerie ou sucrerie), est aussi réduite en pulpe, comme base de la pâte à papier. La problématique qui se pose ici englobe la revalorisation des fibres de bagasse en un matériau textile, sans passer par l'extraction de cellulose pure. Il ne s'agit donc pas de travailler sur de la viscose (cellulose régénérée) pour en évaluer les propriétés et caractéristiques, mais plutôt de réduire les particules de bagasse en fibres (en maintenant leur morphologie propre).

A ce jour, penser un produit textile nouveau doit s'inscrire dans un cadre de développement durable qui requiert à tous les stades de transformation des techniques élaborées à moindre impact sur l'environnement. Avant de procéder à la transformation des fibres en un produit textile qui se destinerait à l'habillement, à l'ameublement ou encore au textile technique, le

¹² ICHN Indemnités Compensatoires de Handicaps Naturels

¹³ MAE Mesures Agroenvironnementales

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

matériau « bagasse », du fait de son hétérogénéité et de sa composition physico-chimique, ne peut être utilisé en l'état. Il convient alors de trouver une méthode optimale d'extraction utilisant le moins de produits chimiques possibles et qui donne des fibres aux propriétés mécaniques et physiques satisfaisantes (pour le domaine textile).

Evaluer la méthode d'extraction tient compte des différents constituants de la bagasse, ainsi que de leur dégradation au fil des étapes. La cellulose, par exemple est présente à 45-50% dans la bagasse fraîche avec un degré de polymérisation (DP) initial proche de 1200 (Villacencio, 1980), relativement faible comparé à celui du bois de l'ordre de 1 800-2 000. Cependant, les différentes transformations que subit la bagasse abaissent son DP. La baisse de DP se traduit par l'obtention de fibres fragilisées, aux propriétés mécaniques abaissées. Villacencio a développé en ce sens une technique d'extraction garantissant un maintien du DP supérieur à 800. Par ailleurs, on comprend la nécessité d'assurer une extraction peu agressive, à moindre impact environnemental, possible en limitant l'emploi de produits chimiques. Les fibres techniques les plus longues sont celles qui sont visées. Alors se pose la problématique du rendement. La fabrication de pulpe chimique donne des rendements autour de 30% (Kirici et Akgül, 2002) selon la qualité de la bagasse. Avec ce procédé et ces conditions d'extraction (pour fibres, cette fois), nous étudierons par la suite (chapitre IV) les différents rendements selon le traitement.

2. Fabrication de fil à partir des fibres extraites

On tentera d'initier la filature d'un fil 100% canne, à partir de fibres de bagasse extraites. L'idée première est d'estimer les possibilités de filature et de savoir quels sont les principaux verrous technologiques à lever. Différentes pistes de travail sont traitées et les résultats les plus marquant sont présentés au chapitre IV.

Les manipulations de caractérisation sont menées à partir des moyens (matériels) à disposition. Par conséquent, parmi la multitude d'essais possibles, la sélection s'est portée sur les plus fondamentaux pour une filière textile-fibre.

3. Détermination des propriétés physiques, via une nouvelle méthode pour la bagasse

Partant de méthodes de mesures conventionnelles employées pour le coton et d'autres fibres naturelles, mais aussi des transformations papetières sur matière cellulosique, certaines techniques de transformation ont été adaptées dans un domaine hors norme.

Aucune étude n'a été recensée dans le domaine textile, sur la transformation de la bagasse de canne à sucre sans passer par le procédé viscosé. Les résultats de caractérisation de ces présents travaux de recherches sont une première contribution à la connaissance du matériau fibreux bagasse de canne dans toute son hétérogénéité.

IV. Conclusion

Omniprésente dans le paysage martiniquais, la canne à sucre assure la cohésion sociale, tout en confrontant histoire, culture et identité. Héritage de cette époque esclavagiste, la canne à sucre a su s'adapter aux évolutions climatiques et parasitaires pour maintenir sa place dans le tissu économique martiniquais (et caribéen). Ceci, grâce à l'action du CTCS, un système de sélection variétale a été mise au point, en collaboration avec des acteurs caribéens comme la Guadeloupe et la Barbade, mais aussi métropolitains avec l'intervention du CIRAD.

Bien que les productions de l'île apparaissent comme insignifiantes face aux géants de la canne que sont le Brésil, l'Inde ou Cuba, la durabilité de la culture est l'un des piliers de l'économie de l'île. C'est dans cette optique de pérennisation de la filière, de diversification des produits et de revalorisation des sous-produits de la canne que des études comme celle présentée ici prennent vie.

CHAPITRE II
ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES
CONVENTIONNELLES
DE TRANSFORMATION DE LA BAGASSE

Cette partie de l'étude s'articule autour des principaux résultats de la littérature, concernant l'observation morphologique, physico-chimique et technologique de la canne et de la bagasse. Dans une démarche de développement durable, les initiatives visant à revaloriser des sous-produits de l'industrie sont fortement encouragées par le gouvernement. D'intérêt mondial, l'utilisation de fibres naturelles (comme la ramie, le kapok, le chanvre, le lin ou l'agave...) dans l'industrie, en remplacement des fibres synthétiques, attire aussi en l'utilisation des fibres de canne dans différents domaines textile. Une telle extension puise sa source dans les caractéristiques morphologiques et structurelles de celle-ci.

I. Les matériaux textiles cellulosiques

Il existe deux grandes familles de matériaux textiles naturels : les fibres d'origine animale et les fibres d'origine végétale. Ces dernières produisent des matériaux cellulosiques, parmi lesquels on distingue les fibres courtes et les fibres longues.

Parmi les matières textiles naturelles d'origine végétale, les fibres libériennes sont extraites du liber, tissu secondaire du phloème de certaines plantes (Allix et Gibert, 1956). Le liber est la zone périphérique de la tige située sous l'écorce. On parle généralement de fibres libériennes, et de fibres dures, pour celles issues des feuilles. Les plus connues des plantes libériennes sont le jute, la ramie, le lin et le chanvre. A cause de leur manque de souplesse, ces fibres ne concurrencent que faiblement les autres fibres naturelles d'origine végétale ou animale comme le coton et la laine, ou encore les fibres artificielles.

La catégorie des fibres courtes provient des fruits, des fleurs ou des graines de certaines plantes, comme pour la fibre de coton : la plus utilisée des fibres d'origine végétale.

Depuis la révolution liée au développement du coton, les fibres naturelles non-conventionnelles ont connu un fort déclin. Elles reprennent place aujourd'hui dans la production mondiale, en concurrence directe avec les fibres synthétiques. La composition chimique des principales fibres souples et dures est donnée en Tableau 4.

Davina MICHEL Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

Tableau 4. Composition chimique de quelques fibres d'origine végétale (Turner, 1949)

Composant chimique (%)	Fibres souples			Fibres dures			Coton
	Lin	Jute	Ramie	Sisal	Chanvre	Phornium	
Cellulose	64,1	64,4	68,6	65,8	63,2	45,1	82,7
Hémicellulose	16,7	12	13,1	12	19,6	30,1	5,7
Pectine	1,8	0,2	1,9	0,8	0,5	0,7	
Lignine	2,0	11,8	0,6	9,9	5,1	11,2	-
Matières solubles dans l'eau	3,9	1,1	5,5	1,2	1,4	2,2	1,0
Matières grasses	1,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,7	0,6

Le principal point commun de ces fibres est leur teneur élevée en cellulose. La présence des autres composants lignine, pectines, hémicellulose a une grande influence sur les propriétés physico-chimiques des fibres, d'où la nécessité de traiter les différentes fibres avant transformation.

1. Composition et structure des matériaux textiles celluloseux

Dans la structure, on trouve les « fibres primaires » et éventuellement les « fibres secondaires » séparées par des « tubes criblés du Phloème ». Au centre de la structure se situent la zone génératrice (cambium), des cellules lignifiées (« xylème »-bois) et une moelle centrale (vue précédemment en Figure 6).

Le lin et le jute ne possèdent que des fibres primaires, alors que le chanvre possède également des fibres secondaires. On constate que seules les fibres (primaires et secondaires) sont intéressantes pour une utilisation textile. En effet, elles sont à l'origine de la souplesse des plantes et permettent la circulation de la sève. Aussi les fibres secondaires sont liées au liber

et associées entre elles en faisceaux, par des ciments pecto-ligneux, de la racine à l'apex de la plante, avec des tendances à ramification.

Les fibres naturelles longues, primaires et secondaires, sont constituées de fibres individuelles. Il s'agit de fibres élémentaires, décomposables en fibrilles disposées en spirales à grand pas en S (par exemple : lin et ramie) ou Z (pour : chanvre et jute), tel qu'illustré Figure 14. Ces fibres présentent des diamètres variant de 10-50 micromètres, avec des gammes de longueurs différentes d'une espèce de plante à une autre : quelques millimètres pour le jute, 50-60 mm pour le lin et 150 mm et au-delà pour la ramie.

Par contre, la fibre technique, ou filasse, est un assemblage de fibres ultimes obtenu par fractionnement partiel des faisceaux de fibres initiaux, de 100 à 200 mm de longueur.

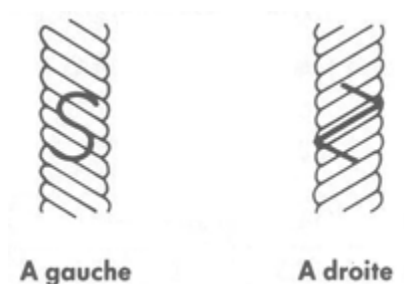


Figure 14. Disposition de fibrilles en sens S à gauche et sens Z droite

2. Principaux polymères constitutifs

De façon générale, la biomasse lignocellulosique se compose de polysaccharides (cellulose et hémicellulose), de lignine et en faible proportion de résidus extractibles, acides et sels minéraux.

2.1. La cellulose

La cellulose est le biopolymère le plus abondant dans le milieu vivant. Elle est directement élaborée dans la paroi des cellules de la plante (essentiellement en très grande quantité dans la paroi secondaire), au niveau de la membrane plasmique. Dans la lamelle moyenne, par contre, se trouve plutôt une grande quantité de lignine.

La fibre cellulosique est un assemblage de microfibrilles ou micro-fibrilles, issue de l'architecture supra moléculaire du bio-polymère de base : la cellulose (Leroux, 2003). Homopolysaccharide linéaire de la D-glucose unités β (1-4), elle est obtenue par polymérisation du glucose, suivie de l'organisation de l'architecture supra moléculaire fibrillaire, donnant lieu à la structure cristalline et insoluble des micro-fibrilles, présentée Figure 15.

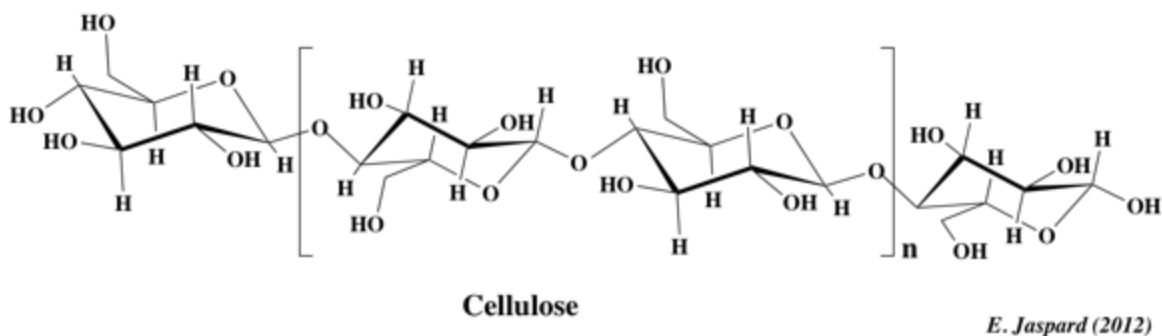


Figure 15. Structure chimique partielle de la cellulose (Jaspard, 2012)

Les chaînes longues sont très liées, de degré de polymérisation DP allant de 800 à 1 400. Les différents traitements auxquels est soumise la cellulose, peuvent abaisser le DP, dégradant ainsi le polymère.

La cellulose contribue à la résistance mécanique des fibres, grâce aux chaînes polymériques fortement orientées. D'un matériau à l'autre, les propriétés mécaniques varient et dépendent du type de cellulose, selon sa géométrie cellulaire et de ses conditions géométriques (Bledzki et Gassan, 1999).

2.2. Hémicelluloses

Les hémicelluloses regroupent plusieurs polysaccharides : les mannane et glucomanane, xylane, xyloglucane et glucane (Wertz, 2011). Les hémicelluloses, illustrés Figure 16, sont structurés de sucres monomères majeurs tel que D-xylose, t-arabinose, D-glucose, D-galactose, D-mannose, acide glucuronique, acide 4-O-méthyl-D-glucuronique, acide galacturonique et en plus faible proportions, le L-rhamnose, L-fructose et une variété de sucres neutres O-méthylés (Sun et al., 1996).

L'hémicellulose, de DP inférieur à celui de la cellulose est constituée de chaînes polymériques plus courtes, ce qui la rend plus accessible aux réactifs chimiques.

Contrairement à la cellulose, la structure polymérique de l'hémicellulose la rend soluble tant en milieu aqueux, qu'en milieu alcalin.

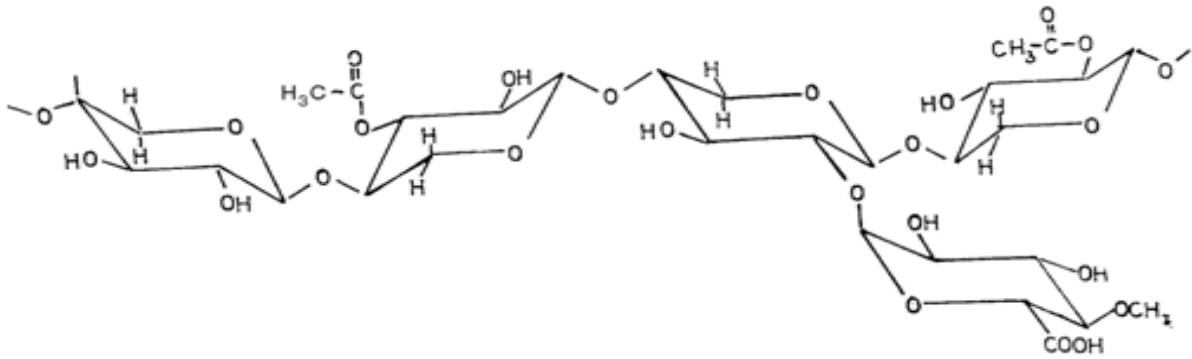


Figure 16. Structure moléculaire d'un D-xylose (Voinot, 2007)

On les retrouve combinés à la lignine et à la cellulose dans la paroi végétale, formant ainsi une interphase entre le ciment pectique et les microfibrilles. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de l'absorption d'humidité, et de la dégradation thermique de la fibre (Rowell & Anand, 1997).

2.3. La lignine

Il s'agit d'un polymère tridimensionnel, constitué d'un mélange de trois aldéhydes aromatiques, de structure présentée Figure 17. Cette structure très stable, essentiellement présente dans la lamelle et paroi mitoyenne, et dans la paroi primaire, pour cimenter les cellules végétales entre elles, sert à la rigidité cellulaire avec son rôle protecteur.

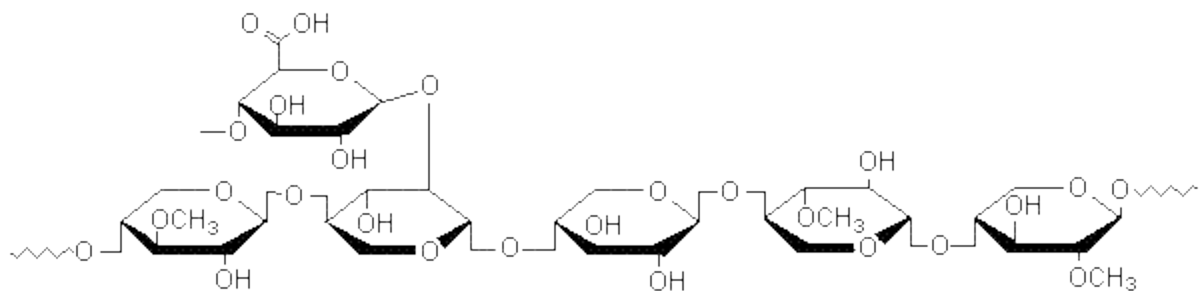


Figure 17. Structure polymérique de la lignine (Gomez, 2012)

Son caractère hydrophobe pose par la suite en industrie des problèmes de teinture, si elle est présente à un taux trop élevé. C'est pourquoi, notamment pour la fabrication de pulpe, on

exige l'obtention d'une cellulose des plus pures possibles, rendant indispensable, l'élimination de la lignine et des composés autres que la cellulose.

On notera aussi que la lignine, thermiquement stable est très sensible à la dégradation aux UV (Saheb et Jog, 1999).

2.4. Les pectines

Les pectines sont des hétéropolysaccharides riches en acide galacturonique. Elles sont présentes dans la lamelle moyenne et la paroi primaire des cellules, en plus faibles quantités que la cellulose et la lignine. Elles demeurent toutefois un élément important, servant à la cohésion entre les cellules des tissus végétaux, assurant ainsi la cohésion du faisceau.

2.5. Résidus Extractibles

Les extractifs sont d'autres matières présentes dans la canne à sucre, et se retrouvent dans la bagasse, en quantités plus ou moins importantes. Ils désignent essentiellement:

- Phénols simples (vanilline, p-hidro¹⁴)
- Acides phénoliques (siringique, p-coumarique)
- Composés nitrogénés
- Pigments
- Polyphénols

Ces derniers voient leur teneur augmenter dans la bagasse dans les 30 premiers jours de stockage, sous l'effet de la chaleur et de l'humidité, avant de diminuer au bout de 90 jours de stockage provoquant alors une réaction exothermique.

Les liaisons inter-polymères chez les graminées peuvent être de plusieurs types, covalentes, ioniques, hydrogène, *etc.*

¹⁴ p-hidro, siringique, p-coumarique sont des composés solubles en solvants organiques neutres ou en eau froide. Ces deux derniers sont particulièrement présents dans la paroi végétale

La lignine semble être reliée et associée en partie avec les polysaccharides pariétaux, formant ainsi un complexe polysaccharide-lignine. Aussi, de part leur structure complexe, les composés sont difficilement séparables tant par traitements chimiques sélectifs que par séparation spécifique.

2.6. Cendres

Les cendres permettent la détermination des substances minérales contenues dans la bagasse à hauteur de 3%. Essentiellement contenue dans la moelle, l'étape d'extraction de moelle donne une bagasse à moindre substance minérale. Aussi la nature, la composition et le contenu des cendres varient avec la variété de la canne et avec le sol de culture. Le contenu des cendres de canne à sucre, comparé à celui d'autres bois, est donné Tableau 5 (ICIDCA, 1990).

Tableau 5. Contenu des cendres de canne à sucre comparé à d'autres bois

Eléments	Bois dur %	Bois doux %	Canne à sucre moulue %
Si	2	1.8- 2.8	53- 77
Ca	22	24- 33	4- 10
Fe	0.6	0.4- 1.8	0.2- 0.8
Mg	6.2	2- 6	2- 7
Mn	2.2	1.7- 3.4	0.01- 0.08

Le contenu des cendres présente un taux de silice nettement supérieur à celui des autres bois. Par ailleurs, déterminer le contenu des cendres permet de sélectionner les agents de blanchiment pour éviter certains problèmes au cours de cette opération (pour la pulpe, par exemple). En effet, certains éléments réagissent avec les agents de blanchiment et provoquent leur décomposition.

3. Techniques générales d'extraction des matériaux textiles cellulosiques

Différentes techniques d'extraction de fibre naturelle, passant des pratiques artisanales (rouissage en rivière ou en extérieur) aux techniques modernes (explosion de vapeur, oxydation humide, extraction alcaline) sont abordées dans cette partie.

3.1. Technique ancestrale

L'utilisation des différentes matières végétales suppose des préparations et des procédés d'extraction différents selon le type de plante. Il est commun pour ces fibres libériennes de procéder à une macération prolongée de la tige en milieu aqueux, afin de détacher les fibres entre elles. Une technique ancestrale, le rouissage, provoque des réactions à la fois mécaniques, chimiques et microbiennes. Il se pratiquait en rivière (interdit en France), sur près, à terre ou en bassin.

Suite au rouissage, pour éliminer les parties rigides (écorce, bois...), on procède au décortilage ou teillage, dont le principe consiste à faire subir des flexions répétées supportées par les fibres tout en réduisant en petits fragments les autres parties, que l'on peut alors éliminer pour obtenir la filasse.

L'ultime étape est le peignage des fibres, qui ajoute une dissociation supplémentaire des faisceaux par étirage à sec. Cette étape s'applique sous trois formes différentes :

- l'action mécanique de cisaillement, qui rompt plus les fibres que les ciments inter-fibres,
- l'après traitement chimique
- l'après-traitement aqueux (comme la filature au mouiller).

Le jute est fréquemment traité par rouissage dans de l'eau douce ou de l'eau de mer (selon les régions). Le rouissage permet de libérer les microorganismes et enzymes qui vont consommer la lignine, sous l'effet de la température, en milieu aqueux.

3.2. Traitement chimique

Les méthodes de traitement chimique emploient un à plusieurs réactifs chimiques afin de libérer les hémicelluloses de la matrice lignocellulosique. Ils ont pour but d'hydrolyser les

hémicelluloses à structure hétérogène et de DP relativement plus faible que celui de la cellulose (Gong *et al.*, 1981).

Ainsi, divers acides peuvent être employés, acide sulfurique H₂SO₄, acide chlorhydrique HCl, dilués à haute température pour augmenter les rendements en extraction. Il existe par ailleurs, des prétraitements en milieu alcalin proche des procédés kraft. On utilise soit uniquement de la soude, soit on y ajoute d'autres produits. Cette extraction implique l'hydrolyse des liaisons ester pour les libérer de la matrice lignocellulosique, la solubilisation de la quasi-totalité de la lignine, et une partie des hémicelluloses. L'efficacité du traitement alcalin est de fait plus efficace pour des résidus agricoles tel que la bagasse et les pailles, par rapport à d'autres coproduits du bois (McMillan, 1994).

3.3. Explosion à la vapeur

D'autres techniques plus moderne ont été élaboré tel que l'explosion à la vapeur. Cette technique a été testée par Collier et al. (Collier et Arora, 1994) sur les fibres de kenaf, en 4 temps : séparation mécanique (via le « Tilby process » développé par la suite), extraction chimique (solution alcaline), explosion à la vapeur et formation du produit final. Par ce procédé, on obtient des paquets de fibres de diamètre réduit et de longueur suffisante pour une application textile (Chiparus, 1993).

Cette technique connaît aussi d'autres variantes employant des produits chimiques afin de réduire les températures de travail. Il est ainsi du procédé AFEX qui consiste au traitement de la matière lignocellulosique avec de l'ammoniaque liquide sous pression modérée (15 bars) suivi d'une compression brutale dans le but d'évaporer l'ammoniaque et d'exploser le substrat. Le procédé typique utilise 1-2 kg d'ammoniaque par kg de biomasse sèche, à la température de 90°C pour un temps de séjour de 30 min.

II. Méthode d'extraction des fibres de canne à sucre

Il existe différentes techniques d'extraction des fibres cellulosiques, consistant à séparer les différents polymères, pour récupérer préférentiellement la cellulose. Certaines des techniques mentionnées précédemment, ont été employées pour les particules de bagasse ou de canne à sucre. Les extractions mécanique et chimique sur la biomasse cellulosique sont prédominantes devant l'extraction enzymatique.

1. Extraction mécanique

Les méthodes mécaniques, les plus fréquemment utilisées en industrie et dans la recherche (sur les particules de bagasse) sont l'oscillation ultrasonique, la radiation d'électron, l'explosion sous vapeur - hydrolyse flash à la vapeur, la résonance électrique, l'impulsion à haute puissance électromagnétique et l'extraction osmotique (Martin et al., 2008).

A partir de la plante de canne à sucre, on peut répertorier deux types de fibres extractibles présentées à la suite.

1.1. Séparation fibre/moelle des particules de bagasse

La bagasse en sortie du dernier moulin de sucrerie se compose de 50-60% en base sèche de fibres utiles. L'autre fraction, riche en moelle a pour conséquence première d'abaisser considérablement les propriétés technologiques des produits fabriqués.

En effet, la moelle est capable d'absorber jusqu'à quinze fois son propre poids en eau, diminuant drastiquement lors du stockage le drainage des piles de bagasse stockées par jet. Ceci peut alors être à l'origine des gels d'opérations (en industrie) ainsi que l'écroulement des piles.

L'expérience industrielle a montré que l'utilisation de bagasse contenant fibre et moelle, rend inefficace la production, en provoquant des dommages sur la ligne de production. On peut mentionner notamment les éléments suivants :

- Lors de la fabrication de planche, on obtient un produit grossier très hygroscopique du à l'absorption inégale d'agglutinant sur les planches de particules, et à la formation d'ampoules à la surface lors du calandrage.
- Le pouvoir d'absorption de la moelle est tel que, lors des processus de cuisson de la bagasse, tous les produits chimiques employés sont inefficaces. On a diminution de la capacité de drainage des pulpes.
- Dans l'industrie papetière, fibres et moelle interfèrent dans les opérations d'évaporation de la liqueur noire¹⁵.
- On constate une diminution de la productivité de la machine à papier, avec a adhérence de la matière aux rouleaux, toile ou filtre.

De par la présence de moelle dans la bagasse, on a une diminution de la qualité des produits finis : pulpe, papier et planche, d'où la nécessité de procéder à la séparation moelle fibre. Cette séparation s'opère en général dans les stations pilotes ou en industrie, en fonction de la teneur en humidité de la bagasse récupérée. Les différentes techniques sont présentées en Tableau 6.

Tableau 6. Répartition des techniques de séparation selon l'humidité de la bagasse en sortie d'usine

	Méthode sèche	Méthode en suspension	Méthode en milieu humide
Taux d'humidité	8-25%	48-52%	88-98%
Equipement	Tamis vibratoire Tambours rotatifs	Moulins à marteaux	Moulins à marteaux 6-12% Hydrapulpeur 2-3%
Site/localisation	sucrerie	Sucrerie	Unité de transformation

La technique de séparation choisie est rétroactivement liée aux conditions de stockage à employer pour la bagasse (si nécessaire avant utilisation). Les critères tels que proximité de

¹⁵ La liqueur noire désigne le solvant récupéré lors de l'extraction à la soude de la lignine.

l'unité de transformation/sucrerie, humidité de la bagasse sont aussi à prendre en compte dans le choix du stockage.

Séparation simple, avec passoire et tamis vibratoires

Il s'agit d'une séparation simple des particules de bagasse, qui emploie un tamis conventionnel rotatif ou vibratoire, installé en général dans la sucrerie. En réponse à l'action du tandem, la moelle se détache des fibres.

L'efficacité de l'équipement dépend du degré d'écrasement et de préparation de la canne; bien que de faible coût et de consommation énergétique basse.

Avec les tiges de canne à sucre pressées et écrasées par les différents engrenages de la sucrerie, la séparation effective de moelle est de 12 à 15%. On retiendra comme inconvénients principaux, une faible efficacité volumétrique et de grandes quantités de poussière dégagées pouvant provoquer des problèmes de santé grave chez l'homme.

Séparation mécanique, moulins et marteaux

L'opération consiste à insérer la bagasse dans un moulin (vertical ou horizontal), monté avec système à rotor. La moelle se sépare des fibres par frottement mécanique avant d'être évacuée à travers des orifices latéraux.

Dans le même temps, dans l'enceinte du moulin, les bottes de fibres se rompent sous l'action des coups mécaniques, au cours desquels l'énergie cinétique des particules en mouvement se transforme en partie ou entièrement en énergie de déformation (pour sa déformation, désintégration ou destruction).

Les coups de marteaux associés désintègrent et dispersent les fibres qui sont lancées contre la grille interne. A force de frottement et de centrifugation, les particules les plus fines, les déchets, la moelle et les fibres pulvérisées passent à travers les trous de la grille.

Au cours de l'opération, la quantité de moelle libre dans la bagasse augmente; la séparation s'opère sur la moelle libre et sur une partie de la moelle contenue dans les particules de bagasse. La séparation de la fraction riche en moelle peut atteindre les 20-30%.

Avec un tel équipement il est possible d'obtenir jusqu'à 73-76% de fibre de bagasse traité. Certains équipements favorisent l'utilisation d'enceintes à rotor vertical avec auto séparation de la moelle à 30-35% pour une capacité opératoire de 10-15t/h sur base sèche.

Séparation en milieu aqueux

La séparation est basée sur le système du moulin à rotor sous l'effet d'un jet d'eau. Le milieu aqueux ainsi créée permet un léger gonflement des fibres de bagasse qui, sous les frictions et le travail mécanique, permettent non seulement la séparation des fibres de la moelle, mais aussi un lavage des fibres avec élimination de moelle, terre et autres substances indésirables, présentes à ce moment. Le principal inconvénient de cette technique est qu'elle utilise de trop fortes quantités d'eau (Dinu, 2006).

1.2. Séparation écorce/moelle à partir de la canne

L'autre source fibreuse de la canne, se retrouve dans l'écorce. Par la méthode «Tilby process» développé en 1960 par les canadiens Tilby et Miller, la séparation fibre/moelle se fait à partir de la canne à sucre. Afin de diminuer l'énergie requise dans les sucreries et de récupérer la moelle pour l'alimentation animale, la séparation des composants de la canne se fait pour quatre fractions : écorce, moelle, cire, et jus. La séparation se fait sur tronçons de canne de 30 cm de long en moyenne (nœuds compris), permettant de récupérer pour la fraction fibre, des fibres techniques entre 5 et 30 cm (limité par la présence des nœuds).

D'après les travaux menés par le centre Cuba9 (Cuba9, 1990), à la séparation, 46% de la quantité totale de fibre disponible se retrouve dans l'écorce représentant 18% du poids total de la canne. Ces fibres très lignifiées, disposées en couches concentriques dans la paroi, conservent leur longueur à la séparation. Bien que 51% de la quantité totale de fibre se retrouve dans la moelle, ces dernières, de type vasculaires ne sont pas récupérées puisque détériorées lors de l'extraction.

Il est possible d'obtenir de l'écorce ou « peau » de canne (Figure 18) à partir d'une technique de séparation mécanique d'écorce/moelle, mise au point par Tilby en 1960.



Figure 18. Ecorce de canne obtenue en sortie du système Tilby (Chiparus, 2004)

La machine Tilby présentée Figure 19, coupe la canne longitudinalement, avec cet avantage de garantir des fibres techniques longues, une séparation rapide et relativement efficace.

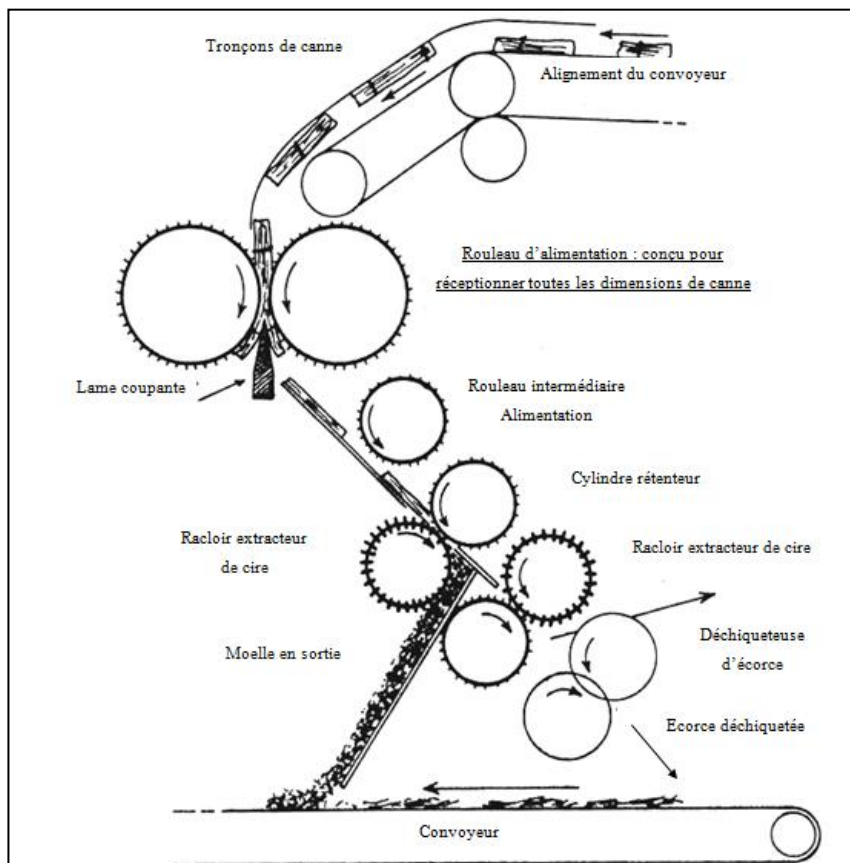


Figure 19. Schéma de séparation de type Tilby (Chiparus, 2004)

L'écorce de canne récupérée contient essentiellement de la cellulose et de la lignine (Cuba9, 1990) ainsi qu'un faible pourcentage d'hémicellulose, principalement contenue dans la

moelle. De même, les fibres contenues dans l'écorce présentent un faible taux de moelle, ce qui diminue le nombre requis de traitements/prétraitements requis sur la matière.

2. Extraction chimique

L'extraction chimique permet de séparer les espèces polymériques entre elles afin de ne garder que la partie cellulosique. On constate, notamment en industrie, les effets néfastes de la présence de tous les éléments non cellulosiques (hémicellulose, lignine...) sur la qualité des produits finaux. Dans la fabrication de matériaux composites, par exemple, la présence d'hémicellulose est le composé responsable de la dégradation thermique et biologique du matériau, ainsi que de l'absorption de l'humidité (Siquiera *et al.*, 2010).

On peut dresser une liste non exhaustive de solvants utilisés pour l'extraction de fibres naturelles par voie chimique : éthylène, acide oxalique et sulfurique, hydroxyde de sodium, carbonate ou sulfite de sodium, etc. Le choix d'une méthode chimique a l'avantage de raccourcir le temps de réaction et d'attaquer plus en profondeur la structure. L'extraction chimique, autrement appelé procédé de délignification, consiste à extraire le maximum de lignine sans dégrader pour autant les fibres. Ici se pose la première problématique : à partir de quelle concentration en soude commence-t-on à dégrader la cellulose ? La quantité de lignine présente dans la bagasse dépend de l'âge et de la maturité de la plante lors de la récolte. Au cours du processus de croissance, le taux de lignine augmente jusqu'à atteindre un pic avant de décroître progressivement. Ainsi, après floraison, la canne consomme les quantités de sucre et lignine qu'elle contient. A ce stade, l'écorce et les paquets de fibres deviennent plus doux et élastiques.

La plus répandue des techniques de délignification s'opère avec de la soude concentrée sous pression. Les quantités effectives de lignine extraites sont fortement liées à la concentration en soude, autrement dit à la sévérité du traitement.

Les travaux d'extraction menés par Dinu (Dinu, 2006) sur la bagasse, à l'aide de carbonate de sodium, ont révélés une influence de la pression plus grande que celle de la température de traitement. Aussi, des résultats similaires à une extraction sous pression peuvent être obtenus à pression atmosphérique, en choisissant par contre un temps opératoire plus important.

L'extraction de la lignine donne des fibres relativement grossières, alors que l'action de bouillir la bagasse dans un bain de carbonate de sodium pendant 1h30 donne des fibres flexibles, résultant de l'extraction de l'hémicellulose et d'une grande partie de la lignine. Dinu conclut sur l'apport des composées hémicellulose et lignine responsables de la dureté des fibres.

L'extraction de résidus organiques (y compris la lignine) sur la matière affecte la surface des fibres de bagasse et de l'écorce de canne. Collier (Collier *et al.*, 1992) a montré, lors de travaux sur l'écorce de canne, que plus les conditions d'extraction sont sévères, plus les fibres sont lisses mais de faible résistance mécanique.

D'autres paramètres tels que la pression, la température de travail, le temps de traitement sont plus ou moins influant sur le rendement d'extraction de lignine.

3. Extraction enzymatique

Le traitement biologique est essentiellement utilisé pour la production simultanée de pulpe et d'enzymes délignifiantes d'intérêt industriel. En France, l'IRD et l'INRA travaillent sur le traitement biologique par le métabolisme particulier d'un champignon filamenteux de type *Pycnoporus cinnabarinus*, mis en culture dans de l'éthanol sur la bagasse (IRD, 2006). Au fur et à mesure que l'enzyme détruit la lignine contenue dans les fibres de bagasse, la pâte obtenue blanchit. Cette pâte peut alors être employée pour la fabrication de carton ou, après traitement supplémentaire, pour l'élaboration de papier d'impression.

Lors de la dégradation de la bagasse, on observe l'hydrolyse enzymatique des liaisons glycoliques des chaînes de cellulose et l'attaque de la lignine (Aguilar *et al.*, 2010). Les fibres de cellulose qu'on retrouve dans la nature sont généralement liées aux autres polymères (hémicellulose, lignine, pectines) : les microorganismes capables d'hydrolyser ces polymères produisent un complexe de plusieurs variétés d'enzymes. Quelques enzymes connues comme participant à la dégradation de la lignine sont la laccase (E.C 1.10.3.2) (Kuwahara *et al.*, 1984), la lignine-peroxydase (E.C 1.11.1.14) (Kunhad *et al.*, 1990) et la manganase-peroxydase (E.C. 1.11.1.13) (Aguilar *et al.*, 2010).

L'emploi d'enzymes ne peut se faire directement sur la bagasse brute, mais nécessite une matière prétraitée. Le prétraitement augmente le contact de surface favorisant une rupture dans la structure polymérique de la lignine et des fibres cellulosiques. Cette rupture de chaînes polymériques facilite alors l'hydrolyse des sucres simples. Les prétraitements employés peuvent être la défibrillation mécanique ou l'extraction chimique en milieu alcalin. Les différentes méthodes d'extraction sont définies selon les besoins de l'industrie et les domaines d'application souhaités.

III. Composition de la bagasse

1. Propriétés morphologiques

Lors du broyage de la canne par les broyeurs, après extraction du jus, les trois principales composantes de la canne se retrouvent dans la bagasse :

- la moelle : composée de fibres courtes contenant une majorité de sucroses
- les fibres
- l'écorce : contenant les fibres les plus longues et les plus fines.

La bagasse présente une grande hétérogénéité morphologique constituée de paquets de fibres et d'autres éléments de structure comme des vaisseaux, le sclérenchyme (cellules à parois épaisses souvent lignifiées : fibres), du parenchyme et des cellules épithéliales (Sanjuan *et al.*, 2009), dans des proportions reportées Tableau 7.

Tableau 7. Répartition des éléments constitutifs de la bagasse (Muller, 1960)

Epiderme	Sclérenchyme	Parenchyme
5- 7 %	25- 27 %	65- 69 %

D'autres auteurs, lors de travaux de coopération menés par l'ICIDCA¹⁶ (ICIDCA, 1990), donnent une autre répartition des éléments constitutifs de la bagasse (Tableau 8). La fraction

¹⁶ ICIDCA : Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de la Caña de Azúcar
Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

appelé fibre dans la production de sucre est constituée d'un point de vue morphologique, fondamentalement de la vraie fraction de fibre et du cœur (moelle ou parenchyme).

Tableau 8. Répartition des tissus contenus dans la bagasse sèche (lavée)

Fibres	Moelle ou Parenchyme	Vaisseaux	Epiderme
50%	30%	15%	5%

Les fibres de bagasse sont rigides, de contours irréguliers mais bien définis. Elles présentent des fibres partielles résultant de l'action mécanique durant le procédé industriel. La proportion de fibre d'écorce dans la bagasse est largement supérieure à celles des vaisseaux fibro-vasculaires.

En s'attachant aux tissus constituant la bagasse de canne, pour mieux comprendre de quoi elle se compose, on retiendra que les éléments les plus intéressants de par leur structure, sont les fibres de l'écorces qui sont les plus longues et les plus fines. En effet, la partie externe de la canne est une large paroi cellulaire longue, rigide, composée de fibres très lignifiées. Cette paroi permet de protéger les tiges de canne des effets mécaniques et agressions extérieures de la plante. Les fibres lui servent donc de soutien élémentaire. Par ailleurs, d'un point de vue cellulaire, on est en présence de cellules du sclérenchyme, cellules les plus fibreuses et les plus longues constituées de parois épaisses.

La zone interne de la tige ou moelle, se compose d'un tissu qui a pour fonction d'accumuler le jus de canne. On retrouve immergé dans ce tissu, des faisceaux constitués de fibres et de vaisseaux, qui conjuguent leurs fonctions de soutien et d'approvisionnement en nutriments (xylème) et en produits élaborés (phloème) tout au long de la tige. Les cellules qui s'y trouvent sont des cellules du parenchyme de forme irrégulière (Dinu, 2006), présentant des parois fines avec pour caractéristique première leurs faibles dimensions. Ces cellules-ci contiennent la majorité du sucrose accumulé par la plante.

Ainsi, après broyage de la canne dans les différents moulins, la structure anatomique se réduit à un mélange physique de tous les éléments décrits précédemment.

2. Propriétés physiques de la bagasse

Dans cette partie sont développées les principales propriétés physiques de la bagasse d'intérêt premier pour les matériaux textiles en général. Les principales propriétés physiques recensées de la bagasse permettent de contrôler l'habilité de fibres de bagasse à être employée dans les manufactures, quelles qu'elles soient. Elles comprennent généralement le pouvoir calorifique, la taille et la densité de particules. La réalisation de nouveaux produits bio-sourcés tient compte de l'ensemble des propriétés.

2.1. Composition physique

La composition physique moyenne de la bagasse établie par ICIDCA (ICIDCA, 1990), est donnée Tableau 9.

Tableau 9. Composition physique moyenne de la bagasse (ICIDCA, 1990)

Fraction fibreuse	Solides non solubles	Solides solubles	eau
45%	2-3%	2-3%	50%

La partie désignée comme fibre correspond à toute la matière fibreuse solide organique insoluble dans l'eau. Toute la fibre qui était dans la canne se retrouve dans la bagasse après passage dans les moulins, constituant la fraction fondamentale pour la production industrielle (comme celle de la pulpe).

La fraction de solides solubles se compose de molécules de saccharose résiduel, non extraites lors du procédé ainsi que d'une petite portion de cires.

Les solides non solubles sont principalement inorganiques. Ils sont composés de pierres et autres matériaux étrangers. Cette portion, bien que faible, participe à la composition de la bagasse et est grandement influencée par les moyens mécaniques de coupe et de récolte.

L'eau présente dans la bagasse est retenue par les phénomènes d'absorption et de capillarité. La capacité des composants chimiques de la bagasse d'absorber les molécules d'eau dépend de l'humidité relative du milieu de la bagasse; aussi l'eau est maintenue par les forces de capillarité et tension superficielle, du au caractère poreux de la bagasse (ICIDCA, 1990). Cette teneur en eau est inévitable puisque le jus est extrait, nécessitant un grand apport en eau dans la sucrerie.

Pouvoir calorifique

La bagasse est initialement employée comme combustible, à cause de son haut pouvoir calorifique. En effet, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de la bagasse sèche est de 4250 kcal/kg.

Pour une bagasse brute, son PCI dépend de sa teneur résiduelle en sucre « s » et de sa teneur en eau « w ». Il s'établit selon l'Equation 1 ci-après. En pratique, en sortie de moulin on obtient ainsi un PCI proche des 1900 kcal/kg (CTCS, 2005).

Equation 1

$$\text{PCI}_{\text{bagasse}} \text{ (kcal/kg)} = 4250 - 12 s - 48,5 w$$

La teneur en eau dépend de l'efficacité des réglages des moulins. Un bon réglage donne une bagasse à 45% d'eau, alors qu'un mauvais travail de moulins donnera une bagasse humide à 50% et plus. On adopte en sucrerie des réglages de moulins, de sorte à maintenir la valeur w égale à 48%, comme pour le bois en valeur standard (Hugot, 1987).

2.2. Distribution de la taille des particules

Du fait des différents passages dans les broyeurs de la sucrerie, la bagasse se présente comme un matériau très hétérogène dont la taille des éléments varie de 1.2 mm et 35 cm. Les tailles des éléments constituant la bagasse dépendent de trois critères déterminants, à savoir :

- La variété de la canne
- L'équipement pour récolter (couper) la canne
- Les machines dans la centrale sucrière (certainement la plus importante)

La distribution de taille de particules de bagasse est établie par passage de la matière dans des jeux de tamis de tailles différentes. On obtient la répartition moyenne des particules de bagasse, donnée Tableau 10.

Tableau 10. Distribution des particules par méthode gravimétrique

Taille des tamis	Mesh 1	Mesh 2 .5	Mesh 10	Mesh 16	A travers Mesh 16
Fibres retenues dans le tamis (%)	1 - 3	30 - 40	15 - 25	25 - 35	10 - 15

La distribution des éléments est exprimée en mesh, unité employée pour exprimer le nombre de mailles du tamis par pouce (1 pouce ou inch= 2,54 cm). Les particules ont été passées en humide dans des tamis allant de mesh 1 à mesh 16, pendant 20 min sous jet d'eau à P= 1 atm. Par pesée des éléments retenus dans chaque tamis (après 24h sous étuve à 105°C), rapportés à la masse totale sèche, on peut alors connaître la distribution des particules (en taille).

2.3. Densité des particules

La détermination de la densité de particules est importante pour les applications requérant un allègement en poids, comme pour les matériaux composites par exemple. Les fibres naturelles ont une densité deux fois inférieure à celle des fibres de verre (Meirhaeghe, 2011).

La densité correspond ici au volume de vide total entre les particules de bagasse, en plus des porosités et du volume du lumen des particules. Elle dépend du degré de compactage et de l'humidité de la bagasse, comme présenté Tableau 11. Les particules de bagasse sont poreuses et présentent des vides dans leur structure, laissant de l'espace intra et inter-particulaire.

Tableau 11. Densité des particules de bagasse

% humidité	Compactage	Densité de paquet kg/m³
9-10	Pas de compactage	60
50	Pas de compactage	70
75	Pas de compactage	85
75	Compacté h= 10m	150
75	Compacté h= 20m	250

Dans le cadre de bagasse sortant de la sucrerie, à 48% d'humidité, le poids spécifique apparent lorsqu'elle est lâche est de 80 à 120 kg/m³. Pour cette même valeur de $w = 48\%$, on aura une densité de 200 kg/m³ pour de la bagasse entassée (Hugot, 1987).

La densité de différentes fractions constituantes de la bagasse a été identifiée selon Berndt et Hodzic (Berndt et Hodzic, 2007) et répertoriée Tableau 12.

Tableau 12. Densité des différentes fractions de la bagasse (Berndt et Hodzic, 2007)

Composés	Fraction	Densité
Moelle	5%	220 kg/m ³
Fibres	73%	520 kg/m ³
Ecorce	22%	550 kg/m ³

La densité des fibres est assez proche de celle de l'écorce puisque celle-ci est essentiellement constituée de fibres très liées (et non de moelle). La séparation, s'effectue généralement en humide via une des technique développé précédemment, puisque tenant compte de la différence de densité de fractions. Cette différence de densité permet alors de séparer la moelle par granulométrie en milieu humide.

3. Composition chimique de la bagasse

Alors que les variétés de canne à sucre cultivées diffèrent d'un pays à un autre, la composition chimique des fibres de bagasse est sans variations significatives pour les principaux constituants (Rocha, 2012).

La bagasse et la canne à sucre sont constituées d'une intime association de polymères : cellulose, hémicellulose et lignine, dont la distribution dans la plante est hétérogène entre la paroi cellulaire et la moelle interne. Le Tableau 13 regroupe selon les différents auteurs, la répartition des fractions polymériques dans la bagasse reporté dans la littérature.

Tableau 13. Composition chimique de la bagasse, d'après les principaux auteurs de la littérature

Composants	Poids moléculaire	Cuba9, 1990	Berndt et Hodzic, 2007	Dinu, 2006	ICIDCA, 1990
Cellulose	150000-350000	43-45 %	40-50 %	30-39 %	45 %
Hémicellulose	10000-20000	25-27 %	25-35 %	24-30 %	33 %
Lignine	3000-5000	20-22 %	15-35 %	18-22 %	20 %

L'analyse des différents éléments constitutifs par Dinu (Dinu, 2006), permet de dresser le Tableau 14 suivant, sur la composition primaire de la bagasse.

Tableau 14. Principaux éléments constitutifs des fibres et moelle (Dinu, 2006)

Composants %	Bagasse		Ecorce
	Fibres	Moelle	
Cellulose	38-43	26-36	45
Pentonases	27-32	28-33	30
Lignine	20-23	18-22	18

Ces résultats permettent de constater la plus grande part de cellulose dans les fibres et l'écorce, et non dans la moelle.

IV. Obtention et stockage de la bagasse de canne à sucre

De la canne passée dans les différents broyeurs de la sucrerie on récupère la bagasse fraîche. Durant la récolte, une sucrerie ou une distillerie récupère et stocke chaque jour des tonnes de bagasse avant utilisation. La bagasse représente 30% du tonnage de cannes broyées, et est principalement utilisée pour l'alimentation des chaudières des usines (Ministère, 1986).

Des sucreries et distilleries, la bagasse excédentaire, est selon les années de l'ordre de 10 à 20% du tonnage de bagasse produite, cet excédent est fréquemment utilisée comme engrais pour les sols.

Compte tenu de la présence dans la bagasse de sucre résiduel et d'autres composés fermentescibles, il est important de bien stocker la matière, dans de bonnes conditions, surtout avec une teneur en eau autour de 48-50% (généralement en sucrerie).

La mise en place d'un stockage efficace de la bagasse (en sortie du dernier moulin de l'usine) tient compte des quantités de matières à conditionner avant transformation. Deux paramètres sont importants, à savoir : la saisonnalité de la culture et les phénomènes de fermentation qui pourraient dégrader les particules de bagasse, surtout quand des quantités importantes de matière sont stockées. Sans technique de stockage élaborée, on observe au bout de dix jours une augmentation de la température du milieu, ce qui favorise l'attaque des composés de la bagasse par des microorganismes thermophiles. En employant une telle bagasse fermentée en industrie, le risque d'obtenir des produits finaux de très mauvaise qualité en fin de transformation est élevé.

Pour pallier à ce phénomène de dégradation, des techniques de stockage ont été développées (cf. Tableau 15), fonction de la teneur en eau et des quantités de bagasse, des caractéristiques de l'aire de stockage, mais aussi de la distance sucrerie/unité de transformation et de l'équipement disponible.

Tableau 15. Méthode de stockage de la bagasse selon sa teneur en eau¹⁷

	A l'air libre	Compacté
Méthode sèche	Sillages Silos Piles	Bales Briquettes Pellets
Méthode humide	Piles	—

Dans la mise en place d'une structure de revalorisation canne-bagasse, avant de transformer les particules de bagasse, il est nécessaire de penser au produit final. A partir de là, on peut choisir le type de stockage le mieux adapté, en fonction des moyens et équipements à disposition.

V. Applications courantes des fibres de bagasse

De façon générale, les fibres naturelles connaissent une large gamme d'application. Liée à leurs propriétés thermiques, mécaniques et physico-chimiques. Avant de traiter des applications des fibres/particules de bagasse, un diagramme des principaux domaines d'application des fibres naturelles est présenté Figure 20 (Mussig, 2010). Les fibres naturelles peuvent être utilisées, traitées ou transformées en vue d'une mise en forme pour filature ou comme matériau brut dans la composition de composites.

¹⁷ Ces informations ont été recueillies lors de la formation sur la transformation de la bagasse, au centre de recherche Cuba9 à Cuba, en 2010, avec les professeurs Juan Fernandez et Gloria Villamil.

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

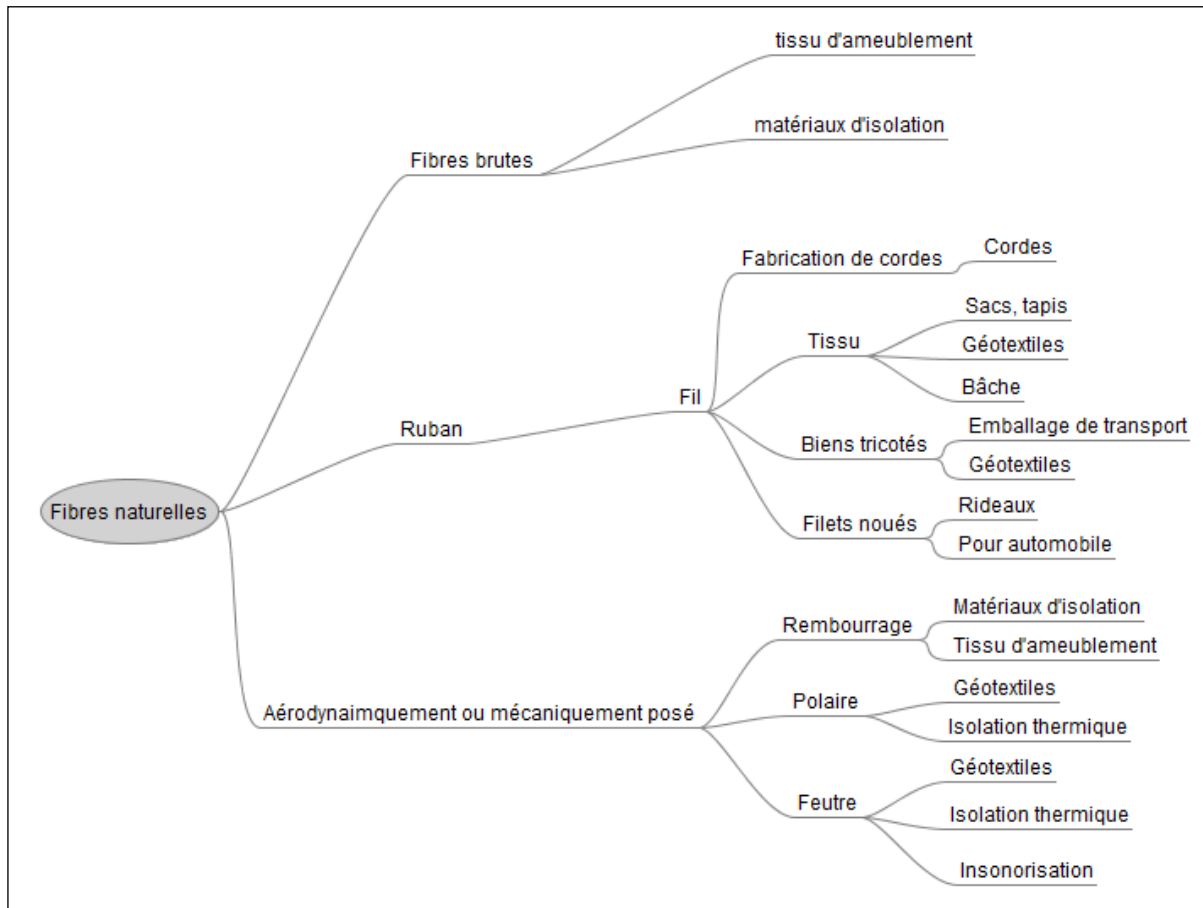


Figure 20. Différents domaines d'application technique des fibres naturelles

Le Tableau 16 présente les domaines d'application des fibres et particules de bagasse à travers le monde, ainsi que les procédés de transformation dans les différents pays détenteurs de la technologie.

Les différentes installations pilotes à travers le monde permettent d'étudier et de tester la faisabilité des produits dérivés. En particulier, la production d'alpha cellulose employé dans le textile, est opérée via procédé viscosique. Quelques précisions sur les applications les plus répandues sont développées à la suite.

Tableau 16. Dérivées de canne, procédés et applications (EADI, 1986)

Produits	Procédés	Produits dérivés	Emplois	Pays fabricant
Fibre de bagasse	Digestion de bagasse + phénol	Articles moulés	Plastique, résines, articles laminés	USA-Louisiane installations pilotes
Bagasse	Carbonisation	Combustible	Usines sucrières Distilleries	Caraïbes
		Brique de charbon	Combustible ménager	Java
	Mélange de vinasse+ bagasse	Compost (fertilisant)	Champs	Jamaïque
	Hydrolyse acide	Furfural	Raffinage de résine et huile de graissage Adhésifs & plastiques alcool/ furfurile produits chimiques pharmaceutiques	Installations pilotes aux USA
	Traitement à l'Acide nitrique	Alpha cellulose	Textile (viscose) Papier	Cuba Installations pilotes aux USA

1. Domaine alimentaire

1.1. Alimentation animale

Plusieurs cultivateurs emploient les excédents de bagasse pour l'alimentation animale, après un conditionnement spécifique. En effet, la bagasse crue est indigeste pour les bovins, à cause de la présence de lignine qui gêne le développement des micro-organismes du rumen. En l'état, la bagasse a une digestibilité de 11,3% qui est améliorée par traitement à la soude à 2%. Après 24h, pour un traitement à 25°C on relève une digestibilité de 50,3% contre une digestibilité de 64,7% pour un traitement à 70°C (Ministère, 1986).

La bagasse une fois traitée est mélangée à la mélasse, au grain, à de la farine de poisson, de l'urée ainsi qu'à d'autres minéraux et vitamines.

1.2. Agroalimentaire

En Martinique, une autre activité s'est développée depuis quelques années (2004) à partir de la bagasse : la production de champignon¹⁸. La création de l'unique champignonnière de Martinique, à Trinité permet la culture et la vente au grand public de trois variétés de pleurotes certifiés bio: *pulmonarius*, *ostreatus* et *citrinopileatus* cultivés sur la bagasse. La première récolte se fait sur les champignons avant qu'ils ne lâchent leurs spores. La bagasse compactée est conditionnée avec le mycélium, en serre d'incubation à 25°C pendant 15 jours, dans des sacs plastiques noirs, percés pour laisser sortir la première récolte. Durant cette période, le mycélium s'installe et grandit à l'intérieur des sacs. En 24h de pousse du champignon : mycélium secondaire (à travers les trous), deux récoltes sont effectuées (une le matin et une au soir). La deuxième récolte s'effectue sur sac ouvert (déchiré), où les champignons peuvent se développer librement. Enfin, une troisième et dernière récolte s'opère en plongeant les sacs dans l'eau. Cette production locale atteint les 30-40 kg la semaine (Lader, 2011).

¹⁸ Le descriptif du procédé de production des champignons est retranscrit suite à la visite sur place de la champignonnière au Galion à Trinité en 2011. La visite a été effectuée ce jour par le propriétaire M. Jacky Pascault, que je remercie une fois de plus pour sa disponibilité.

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

2. Domaine énergétique

2.1. Biocombustible

La bagasse en tant que biocombustible est utilisée comme tel depuis longtemps par les sucreries et distilleries (CTCS, 2005). Elle sert au séchage et à la production de vapeur.

Le séchage utilise directement des gaz (produits agricoles), ainsi qu'un échangeur pour des produits plus délicats (produits alimentaires).

La production de vapeur saturée s'effectue à l'aide de chaudières à tubes de fumée, et à tubes d'eau pour la production de vapeur sèche. Dans ce cas-ci, on peut produire de l'électricité à l'aide d'un turbo alternateur, avec près de 2,2 kg de vapeur/kg de bagasse à la pression de 20 bars, à 350°C. On note une consommation de 10 kg de vapeur/kWh pour un turbo à contrepression, et 5 kg de vapeur /kWh pour un turbo à condensation.

2.2. Biocarburant

Autrement appelé éthanol carburant, le bioéthanol peut être produit à partir de diverses cultures comme le maïs, le blé, la canne à sucre. Développé au Brésil suite aux chocs pétroliers des années 70 qui touchèrent très durement le pays, il fut mis en place le programme « Pro-alcool » afin de développer la filière du sucre et la production d'éthanol de canne (Alsif, 2010).

La production mondiale atteint aujourd'hui 17 milliards de litre par an, avec le Brésil comme premier producteur mondial, devant les Etats-Unis. Traditionnellement cultivée à des fins alimentaires, la culture de la canne prend place à ce jour comme grande source d'énergie. Grâce à son rendement de conversion photosynthétique très supérieur à celui des plantes de climat tempéré, la canne se présente comme source d'énergie relativement propre. En effet, à partir d'une tonne de tiges de canne, on peut obtenir jusqu'à 100 litres d'éthanol carburant.

3. Domaine industriel

3.1. Pulpe et papier

L'emploi de la bagasse pour la production de pulpe chimique permet de réserver le bois traditionnel pour des applications plus nobles et de réduire ainsi la déforestation. Quelques applications notables de la pulpe de bagasse : cellophane, en application textile : la viscose rayonne, esters de cellulose comme acétate ou nitrates, éthers de cellulose ou CMC, grafts et autres dérivés.

Les fibres sont cuites afin d'obtenir une pulpe qui est lavée avant épaissement. La cuisson s'opère avec de la soude à 10% dans un rapport fibre/liqueur de 1/3. La pulpe obtenue est composée de 45% de fibres de bagasse.

Il s'agit d'obtenir une pulpe chimique des plus pures possibles avec un taux de cellulose élevé (avec un faible taux d'hémicellulose et de lignine résiduels). En optimisant les techniques d'extraction et fonction des propriétés de la bagasse en sortie de la sucrerie, on peut atteindre :

- Taux de cellulose > 90%
- Taux de lignine résiduel < 3%
- Rendement de 28-35%

Un rendement supérieur à 35% est signe que les fibres cellulosiques ont été fortement dégradées, et une mesure du DP est indispensable dans ce cas, pour prévenir des défauts en industrie à venir. Toutefois, de tels résultats (rendement de 30%) requièrent un intense *pulping* et blanchiment, limité par la valeur du DP (vue la dégradation de la cellulose).

L'obtention de pulpe, s'opère en six étapes, autour de différentes techniques : avec du bisulfite, par nitration, à l'explosion à la vapeur, à la soude (la méthode la plus répandue).

La première étape consiste en une préhydrolyse à l'eau ou au bisulfite (moins fréquent), à une température de 170°C pendant deux heures dans un réacteur sous pression. On note un rendement de 70%, avec 75% d'hémicellulose extraite.

La préhydrolyse est suivie d'une cuisson alcaline à la soude concentrée à 17%. La bagasse (de pH 3 avant cuisson) est placée 1h dans un réacteur, et élevée à la température de 160°C. C'est

lors de cette étape que le maximum de la lignine présente dans la matière peut être éliminé. Les meilleurs rendements obtenus sont de 30%, avec une lignine résiduelle de 2-3%, et 2 à 5% de pentonases. L'emploi de soude abaisse le DP de la cellulose, laissant dans les meilleurs cas celui-ci à 1000 ± 100 .

Une fois la pulpe récupérée, elle sera rincée, nettoyée puis blanchie au bisulfite. Après un dernier rinçage, la pulpe Alpha cellulose pure à 95% est prête à l'emploi en industrie.

3.2. Matériaux de construction (Ministère, 1986)

Des panneaux de bagasse sont réalisés à partir de bagasse passée au défibreur. A la séparation mécanique, la moelle est dirigée vers les chaudières, et les fibres et particules vers le sécheur. Avant compactage et polymérisation, les résines sont ajoutées aux fibres sèches sous l'effet de la chaleur, ou d'un rayonnement ionisant. Les fibres sont parallélisées en les faisant passer dans un champ électrique de 1500- 3750 V/pouce.

Les fibres de bagasse sont courtes et requièrent en général près de 25% de matériaux à longues fibres pour améliorer la qualité de la pâte avant compactage. Les propriétés mécaniques des panneaux d'agglomérés varient en fonction de la longueur et résistance des fibres, ainsi que des proportions lors de la mise en forme.

3.3. Matériaux composites

Les fibres naturelles renforcent les polymères composites. Présentant l'avantage de la disponibilité, du faible cout, de la facilité d'utilisation, les particules de bagasse de canne à sucre sont des renforts qui améliorent la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Aussi, des études ont permis d'observer l'effet des traitements et prétraitements lors de l'adhésion matrice/fibres.

Le développement d'emballages alimentaires biodégradables, s'installe de plus en plus dans les habitudes des consommateurs, essentiellement des restaurateurs (snack et vente à emporter). Ces éco-emballages sont en ventes sur le marché depuis quelques années, et sont principalement développés par la Chine, l'Australie.

VI. Conclusion

De nombreuses applications des fibres de bagasse ont été exploitées jusqu'alors, utilisant d'une part les particules de bagasse brutes, et d'autre part de la pulpe cellulosique obtenue après traitement sur la bagasse. L'analyse de la composition physico-chimique des particules de bagasse a permis de constater du potentiel fibreux existant, peu exploité en termes de développement textile. Ainsi, afin de déterminer dans quelle mesure de telles fibres issues de la revalorisation de la biomasse peuvent être valorisées, quelques étapes incontournables sont nécessaires.

La première étape concerne l'extraction de fibres assez longues et fines, à partir de la bagasse. Cette étape implique une mise au point d'un protocole d'extraction donnant des fibres satisfaisantes (en terme de longueurs, de coloration et de finesse) dont les propriétés seront étudiées dans un deuxième temps. Le défi ici est de pouvoir extraire des fibres cellulosiques, tout en préservant le caractère hétérogène de la matière brute.

En second lieu, afin de connaître au mieux le matériel « fibre de bagasse », la caractérisation sur les principaux points, physique, mécanique, chimique est essentielle avant de procéder à une éventuelle transformation. Ces caractérisations servent aussi à optimiser les paramètres d'extraction, tout en considérant les rendements finaux.

Ainsi, à partir des travaux effectués sur la bagasse et les fibres d'écorce, les méthodes d'extraction de fibres sont mises en place et les fibres cellulosiques obtenues, analysées selon les critères de validation textile. Les méthodes et matériels employés font l'objet du Chapitre III suivant.

CHAPITRE III
MATERIELS ET METHODES

Après l'étude générale des fibres cellulosiques et fibres de bagasse/canne, ce chapitre s'attache à décrire les différents matériels et méthodes employés tant pour l'extraction des fibres, que pour les techniques de caractérisation chimique et mécanique des fibres extraites. On aborde dans un premier temps le conditionnement des fibres avant et après réception de la matière première, suivie de la mise en place d'un protocole d'extraction.

I. Origine et préparation de la bagasse

1. Origine de la canne et de la bagasse

Avec près de douze variétés cultivées sur toute l'île (hors Territoires anciennement Contaminés par le Chlordécone TCC¹⁹), il est difficile de suivre chaque zone géographique en fonction des variétés. Dans notre cas, (lors de la récupération de matière) les principales variétés de canne récupérées en sucrerie se trouvent à proximité de celle-ci, à Trinité et sont répertoriées en R570 et B59.92. Aussi, il a été établi que les compositions chimique et histologique des principaux composés chimiques de la canne ne varient pas significativement d'une variété à l'autre (Cuba 9, 1990) (Rochas, 2012). L'influence de la variété de la canne, de la hauteur du tronçon de prélèvement, ne sera donc pas considérée dans le cadre de cette étude.

Pour les essais d'extraction, de transformation et de caractérisation menés au LPMT, plusieurs matériaux sont utilisés pour se familiariser avec le matériau canne, dans un premier temps. Quatre types de matériaux sont utilisés:

- La bagasse en provenance de la sucrerie du Galion, appelée « Bagasse Galion ». Elle diffère de celle de la distillerie de par les réglages des moulins/engrenages d'extraction, qui changent le taux de sucre résiduel dans celle-ci. La bagasse récupérée a été séchée à l'étuve sous 105°C pendant 24h, avant d'être envoyée par colis au LPMT.

¹⁹ Les TCC sont interdits de culture. Développé par après au chapitre IV

- La bagasse de distillerie : « Bagasse Mauny », récupérée de la distillerie La Mauny. Elle a été séchée à l'étuve sous 105°C pendant 24h, avant d'être envoyée par colis au LPMT.
- La canne broyée de sucrerie, récupérée lors de l'échantillonnage, après extraction du jus lors du broyage de la canne. Cette fraction sert à l'établissement du coefficient de paie aux agriculteurs. Elle a été séchée en étuve pendant 24h à 105°C.
- L'écorce de canne, récupérée de tige de canne coupée aux champs. L'écorce a été coupée à la main, puis conditionnée en étuve à 105°C pendant 24h, avant d'être transportée par voie postale au LPMT.

Les particules de bagasse La Mauny, ainsi que l'écorce et la canne broyée seront utilisées à titre comparatif, pour observer les transformations structurales des fibres/particules, lors des différents essais d'extraction.

2. Préparation de la matière

A partir des matières premières précédemment citées, une première étape de tamisage est opérée sur les particules de bagasse uniquement. La Figure 21 permet d'apprécier l'aspect premier des matières utilisées dans ces travaux.

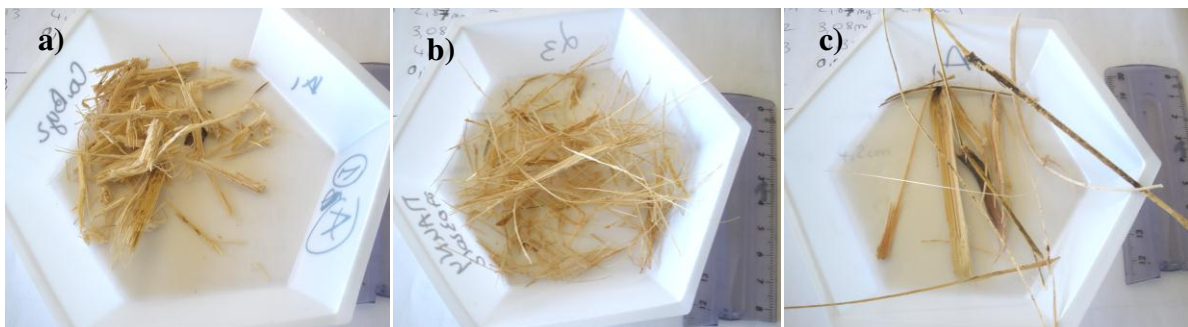


Figure 21. Matériaux vierges: a) bagasse b) canne broyée c) écorce de canne

Les méthodes d'extractions mises au point permettront de passer de particules à fibres de canne (bagasse, canne broyée, écorce). Le terme « fibre » employé dans la suite se réfère indifféremment aux « paquets de fibres » et aux « fibres techniques ». Précisément, la fibre

technique qui sert à la fabrication d'un produit textile est en réalité constituée d'un certain nombre de fibres élémentaires encore liées entre elles.

2.1. Conditionnement de la bagasse

Concernant le conditionnement de la bagasse, la réception de la matière a été possible grâce au concours du CTCS Martinique, de la sucrerie le Galion et de la distillerie La Mauny. Fortement limitée par la saisonnalité de la culture de la canne²⁰, l'étude a été rythmée par les quantités de bagasse et canne broyée récupérées au moment des récoltes (sur toute la durée de la thèse), comme précisé dans le Tableau 17.

Tableau 17. Approvisionnement en matière première tout au long de la thèse

	Bagasse GALION	Bagasse MAUNY	Canne broyée
Quantité récupérée (g)	650	850	516
Récolte considérée	2011 & 2012	2011 & 2012	2012
Conditions de séchage	24h/105°C	24h/105°C	24h/105°C
Sélection des fibres par tamisage	oui	oui	non

La matière première a été récupérée en Martinique au courant des mois de mars à juin, en 2011, ainsi qu'en 2012. Le séchage de la matière a été indispensable pour garantir la non-fermentation des particules bagasse et de canne.

2.2. Sélectivité des particules de bagasse

Lors du passage des tronçons de canne dans l'unité de transformation, les différents réglages des engrenages et moulins qui broient la canne déterminent la taille des particules en sortie.

²⁰ En Martinique, la récolte s'étale en moyenne de février à juin, selon la pluviométrie de l'année précédente.
Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

Ainsi, en sucrerie on passe de tronçons de canne de 20-30 cm, à un mélange hétérogène de résidus d'écorce, de paille, de fibres, de moelle et autres éléments constitutifs de la canne.

En vue d'obtenir des particules de bagasse de longueur le moins dispersé possible, la bagasse est tamisée grâce à une tamiseuse vibratoire Retsch As 200.

Les tamis sont préalablement pesés à vide et les cycles sont lancés pour six minutes à 1,02 mm/g d'amplitude, puis chaque tamis est pesé avec la matière retenue. Le choix des tailles de tamis a été fonction de ce qui était disponible à l'ENSCMu²¹.

Les masses sont exprimées au Tableau 18 : à vide, du tamis le plus grossier (1) au plus fin (5).

Tableau 18. Jeu de tamis utilisé pour les particules de bagasse

Tamis 1	4 mm de 429,2 g	Tamis 5	0,250 mm de 315,8 g
Tamis 2	2 mm de 350,6 g	Fond	Fond de 433,1 g
Tamis 3	1 mm de 347 g	Couvercle	de 262 g
Tamis 4	0,5 mm de 353 g		

II. Protocoles d'extraction des fibres de canne à sucre

L'objectif de cette partie est d'extraire des fibres techniques offrant de bonnes propriétés mécaniques, à partir de la bagasse de canne à sucre. Le procédé viscosse ne sera pas abordé afin de revaloriser la bagasse à moindre impact environnemental, en employant le moins de réactifs/solvants chimiques que possible. On veillera donc à conserver la structure de la fibre, sans extraire de cellulose pure.

1. Choix de la méthode d'extraction

A partir des différentes techniques d'extraction utilisées pour les fibres naturelles (abordé au Cf. chapitre II) des adaptations aux particules de bagasse ont été étudiées sur la base des

²¹ ENSCMu : Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse
Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

données développées dans la littérature. La critique faite des techniques d'extraction en vue de l'obtention de fibre de canne est listée comme suit :

- Le rouissage, essentiellement utilisé pour des fibres longues est une technique d'extraction longue qui nécessite l'action combinée de rosée, de pluie, du vent et du soleil, favorisant ainsi l'action de micro-organismes qui détruisent le ciment pectiques. Le temps nécessaire à cette opération, la taille des particules, et la fermentation facile des fibres de bagasse sont les principaux éléments qui motivent le refus de cette technique dans l'extraction de fibres techniques de bagasse.
- L'extraction enzymatique (assez proche du rouissage), sont préférentiellement développé pour l'obtention de pulpe. Considérant la volonté première de conserver les dimensions des fibres au plus près de la structure d'origine cette technique n'a pas été testée dans le cadre de ces premiers travaux sur la canne à sucre. Elle n'est toutefois pas à exclure.
- Le peignage est une action mécanique qui permet de dénouer et d'aligner des faisceaux de fibres, mais n'est pas utilisable avec les particules de bagasse à cause des dimensions des particules : courtes, hétérogènes, épaisses et fines, avec des changements de section pour une même particules/fibres.
- L'action mécanique de battage des particules en vue de les réduire en fibres, dégrade les particules en les cassant, puisque la structure fibreuse présente des points de faiblesses (à cause de la première action mécanique dans l'unité de transformation).
- L'extraction chimique emploie bien souvent des successions de solvants (acide sulfurique, acide chloridrique, sulfate de sodium, procédé bisulfite, etc...) pour extraire un maximum d'éléments non cellulosiques présents dans les fibres. De la multitude de solvants existants, sera utilisé dans cette étude l'hydroxyde de sodium, car il est le solvant le plus efficace dans l'extraction de la lignine.

2. Approche paramétrique

Afin de connaître au mieux les paramètres qui affectent le plus l'extraction des fibres, les premiers essais ont été menés sur des particules de canne broyées, récupérées lors de l'étape d'échantillonnage en sucrerie (Cf. chapitre I). Le choix d'une approche avec la canne broyée

comme matière première (au lieu de la bagasse) repose sur la volonté de tester et d'observer les fibres extractibles, avant d'étendre le procédé d'extraction aux particules de bagasse.

Ces essais préliminaires permettent d'apprécier par ailleurs, les possibilités d'adaptabilité des méthodes d'extraction selon le matériau canne initial à traiter.

Les paramètres considérés pour cette approche, sont :

- Solvant
- Température
- agitation magnétique
- pression d'extraction.

L'objectif principal de l'étude étant l'extraction et la caractérisation physico-mécanique de fibres de bagasse, aucune mesure physique ou mécanique n'est effectuée sur les fibres issues des essais préliminaires (investissement en temps trop important).

Protocole expérimental d'extraction de fibres de canne broyée

Chaque essai est réalisé à partir d'1,0 g de canne broyée, puis traité à pression atmosphérique, avec les variations de paramètres:

- concentrations en soude : 0,1N ; 1N ; 2N
- solvants utilisés : eau distillée et eau de mer²²
- températures de bain : température ambiante (25°C) et 100°C
- agitation : un peu manuelle et magnétique

Les protocoles de prétraitement et d'extraction ont été mis au point, inspirés de la littérature (absence de norme), puis adapté pour les particules de bagasse, avec pour objectif l'obtention préférentielle de longues fibres fines.

La bagasse brute sèche est conditionnée au laboratoire de métrologie au LPMT dans les conditions standards de température $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et d'humidité relative $65\% \pm 2\%$. Pour chaque essai, la matière est conditionnée au minimum 48h au préalable. Chaque extraction chimique est répétée cinq fois au laboratoire du LPMT, et le procédé d'extraction chimique s'opère à l'eau en milieu basique.

²² Eau de mer récupérée d'une plage caraïbe de la Martinique. Ces analyses ont été effectuées après la mise en place de séances de TP au lycée Professionnel de la Pointe des Nègres pour des classes de BP stylisme de mode.
Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

3. Extraction des fibres de bagasse

Extraction à l'eau : prétraitement

L'extraction à l'eau est une étape de prétraitement de la bagasse. Deux méthodes sont utilisées : une à l'eau distillée et une à l'eau salée. Le choix de travailler en espace clos sous pression est initialement basé sur les processus papetier²³, avec un autoclave dans les conditions précisées en Tableau 19.

Tableau 19. Conditions de prétraitement des particules de bagasse

Méthode	Quantité de matière initiale	Eau distillée	Eau salée à 35g/l	Autoclave à 120°C (1°C/min)	Classification
1	1g de bagasse vierge	100 ml	-	1h30	BP : Bagasse préhydrolysée à l'eau distillée
2	1g de bagasse vierge	-	100 ml	1h30	BPS : Bagasse préhydrolysée à l'eau salée

L'intensité de coloration des bains de solution, associé à l'aspect des fibres humides, paramètres visibles à l'œil nu permettent d'apprécier l'efficacité du prétraitement, avant de passer au traitement chimique.

Extraction en milieu basique : cuisson alcaline

L'extraction en milieu basique, a été réalisée suivant quatre protocoles différents, dont deux avec préhydrolyse, présenté Tableau 20.

²³ Technique papetière expérimentée lors d'une formation de deux semaines en novembre 2010, au centre de recherche sur la Bagasse, Cuba9, à Cuba.

Tableau 20. Conditions d'extraction chimique à la soude

	Quantité de matière initiale	Soude à 0,1N	Soude à 1N	Autoclave à 120°C (1°C/min)	Classification
Extraction 1	1g de bagasse vierge	-	100 ml	1h30	B-1N : Bagasse extrait à 1N de soude
Extraction 2	1g de bagasse vierge	100 ml	-	1h30	B-0,1N : Bagasse extrait à 0,1N de soude
Extraction 3	1g issu de méthode 1	100 ml	-	1h30	BP-0,1N: Bagasse extrait à 0,1N de soude avec préhydrolyse à l'eau distillée
Extraction 4	1g issu de méthode 2	-	100 ml	1h30	BPS-1N : Bagasse extrait à 1N de soude avec préhydrolyse à l'eau salée

III. Caractérisation des fibres de bagasse

Les fibres sont caractérisées par différentes techniques faisant intervenir : morphologie, structure interne, dimensions et propriétés mécaniques. Toutes les fibres sont placées au moins 48h avant les essais sous atmosphère conditionnée à $65 \pm 2\%$ d'humidité relative et à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, selon la norme NF G00-003.

1. Aspect morphologique

La morphologie de la surface et la section transversale des différentes fibres extraites sont observées par microscope électronique à balayage (MEB) HITACHI S-2360N.

Appareillage

Le MEB fonctionne par réflexion d'électrons excités sur la surface de l'échantillon (Hearle *et al.*, 1998). Le faisceau d'électron est produit par un canon à électron qui consiste en un filament de tungstène soumis à haute tension. Ce canon thermoélectronique est chauffé

jusqu'à 1600°C. Un champ de haute tension permet d'accélérer les électrons et un électroaimant permet de les focaliser. L'image est construite point par point par balayage de la surface par ce faisceau. Les échantillons analysés doivent être métallisés pour permettre aux électrons non diffusés ou réfléchis de s'écouler hors de l'objet observé afin d'en permettre l'observation morphologique des fibres.

L'analyse des échantillons de fibres a été menée à différents voltages entre 15 et 20kV. Des tensions plus élevées pourraient endommager le matériau lors de l'exposition. Les fibres naturellement isolantes ont dû être métallisées, par pulvérisation cathodique de dépôt d'or dans le métalliseur POLARON E5100.

Etude de la morphologie de surface

Le MEB permet d'observer la surface des fibres, à l'échelle mésoscopique, jusqu'à 500 µm par variation de grossissements. Cette observation permet de comprendre et de confirmer les hypothèses émises lors des différents traitements.

Etude de la section

Les fibres sont assemblées en paquets puis introduite dans un tube thermo-rétractable. Une fois le tube chauffé et rétracté, l'ensemble (tube plus fibres) est coupée par tronçons de 2mm à l'aide d'une lame de rasoir réservée à deux coupes maximum. En procédant ainsi, on peut prendre deux micrographies de la section transversale des fibres au MEB. Une fois les images capturées, elles sont traitées avec le logiciel Image J® pour en déterminer les diamètres et aire en section droite des fibres.

Faciès de rupture

Lors des essais de traction, et si la rupture est effective, on récupère les deux extrémités de fibres pour observation MEB. Afin d'observer le faciès de rupture, plusieurs photos sont prises à des grossissements différents.

2. Méthode de caractérisation physique

A partir des différentes fibres obtenues, cette partie tiendra compte des grandeurs physiques les plus abordées dans le domaine textile.

2.1. Détermination du taux de fibre/moelle

La détermination du taux de fibre et de moelle consiste à soumettre la bagasse à un lavage sous jet d'eau à pression égale à $5 \cdot 10^4$ Pa. Les particules de bagasse sont placées dans un jeu de tamis de 5, 12 et 100 mesh, comme illustré Figure 22.

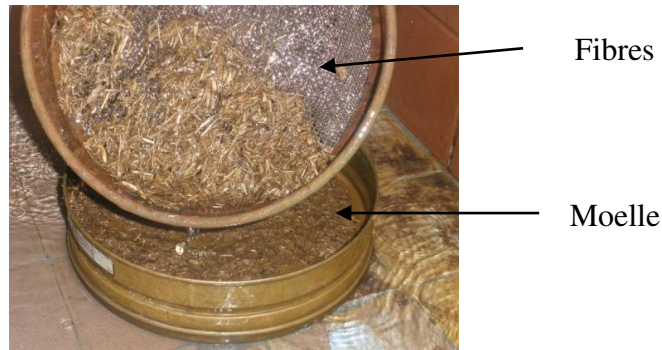


Figure 22. Séparation en humide de la portion fibre/moelle

Sous pression, les fractions de matière se séparent dû à la différence de densité fibre/moelle. Une fois séparées, elles sont séchées puis pesées en référence au poids initial de la bagasse.

2.2. Détermination de la longueur des fibres extraites

La longueur est considérée comme l'une des caractéristiques les plus importantes en textile entrant pour bonne part dans l'appréciation technologique et commerciale des fibres naturelles. Ces fibres sont prélevées aléatoirement parmi les cinq lots de fibres produites pour les quatre types d'extraction. Elles sont identifiées individuellement et mesurées une à une à l'aide d'un maille-mètre. Le maille mètre est un instrument de mesure fréquemment utilisé dans l'industrie, et pour les essais on établit des échantillons de cent fibres par type.

La notion de « longueur moyenne » peut s'avérer être insuffisante pour estimer les longueurs de fibres de chaque échantillon. Pour y pallier, on établit des histogrammes de distributions pondérées.

En associant chaque classe de longueur à la proportion en masse qui lui correspond dans l'échantillon mesuré, on peut dresser une représentation graphique de la distribution en longueur pondérée à la masse (Equation 2). Avec l'établissement de paramètres de centrage, on établit une distribution aléatoire pondérée en masse, autrement appelé diagramme poids

(Barbe). L'histogramme correspondant est utile pour le réglage de certaines machines, ainsi que dans le cadre d'approvisionnement en matière première.

La distribution Hauteur est une distribution aléatoire pondérée en section (Equation 2), qui donne accès au pourcentage numérique de fibres courtes dans un échantillon, à la longueur technique de réglage, souvent utilisée comme base de référence pour le réglage des écartements des trains d'étirage, mais aussi de contrôler et suivre la bonne marche et les réglages de la grosse préparation (initialement mis au point pour le coton et la laine).

Ces deux distributions comportent en des diagrammes et les histogrammes correspondants. Aussi, les histogrammes apportent des éléments très utiles en filature et en préparation de matière, et de réglage de certaines machines.

Equation 2

$$H = (si, li) \qquad B = (mi, li)$$

Avec li : centre de classe mi : masse des fibres si : section des fibres

2.3. Détermination de la finesse par calcul du titre

La finesse des fibres est incontournable dans le domaine textile. Elle peut être estimée par mesure de périmètre, diamètre, aire de section transversale des fibres, etc. Elle sera ici déterminée par méthode gravimétrique, en masse par unité de longueur (masse linéique).

Le titre est déterminé pour chaque fibre technique individuelle, par pesée à la balance électronique (précision 0,01 mg) et par mesure de la longueur au maille-mètre (précision 0,2 mm). Les valeurs du titre sont données par l'Equation 3 suivante :

Equation 3

$$T(tex) = 1000 * \frac{\text{masse de la fibre (g)}}{\text{Longueur de la fibre (m)}}$$

Ce procédé de contrôle a été mené pour tous les types de fibres extraites, avec un conditionnement au préalable de 48 h minimum sous atmosphère contrôlée $65\% \pm 2\%$ HR et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

2.4. Mesure de la finesse par mesure de diamètre

En ce qui concerne les fibres naturelles, bien souvent la coupe en section droite montre le caractère non circulaire des fibres. Les fibres techniques extraites, présentées Figure 23 ne sont ni circulaires, ni de section constante, mais de diamètre elliptique avec des variations de sections mentionnées précédemment. L'aire des fibres via la section transversale se mesure à partir de la formule du diamètre. Il existe deux termes employés pour qualifier la forme de la fibre en section droite, ici diamètre, de façon la plus appropriée possible.

Diamètres apparents

Le diamètre apparent (Figure 23) est déterminé par la méthode du microscope à projection pour une longueur de tronçonnage pour laquelle la fibre prend toutes les orientations possibles (Dreyer, 1994). Le diamètre apparent D_a est donc la moyenne des diamètres projetés d'une fibre d'aire en section droite A.

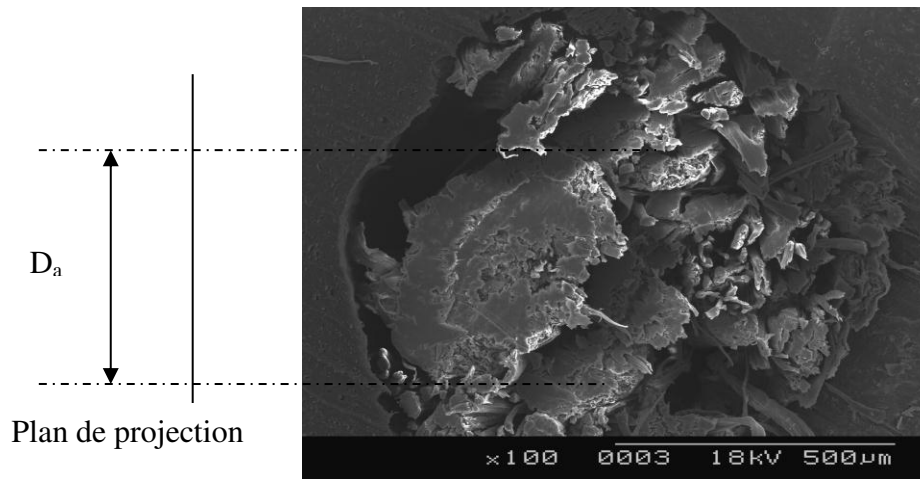


Figure 23. Définition du diamètre apparent d'une fibre de bagasse de section elliptique, vue MEB

Diamètres équivalents

Le diamètre équivalent d'une fibre est le diamètre d'une fibre fictive de section circulaire qui aurait la même masse que la fibre réelle (Equation 4), soit la même aire en section droite, tout le reste étant égal par ailleurs (Dreyer, 1994).

Cette définition est indépendante des techniques de mesures employées, et est souvent rapporté au diamètre gravimétrique d'une fibre, illustré Figure 24.

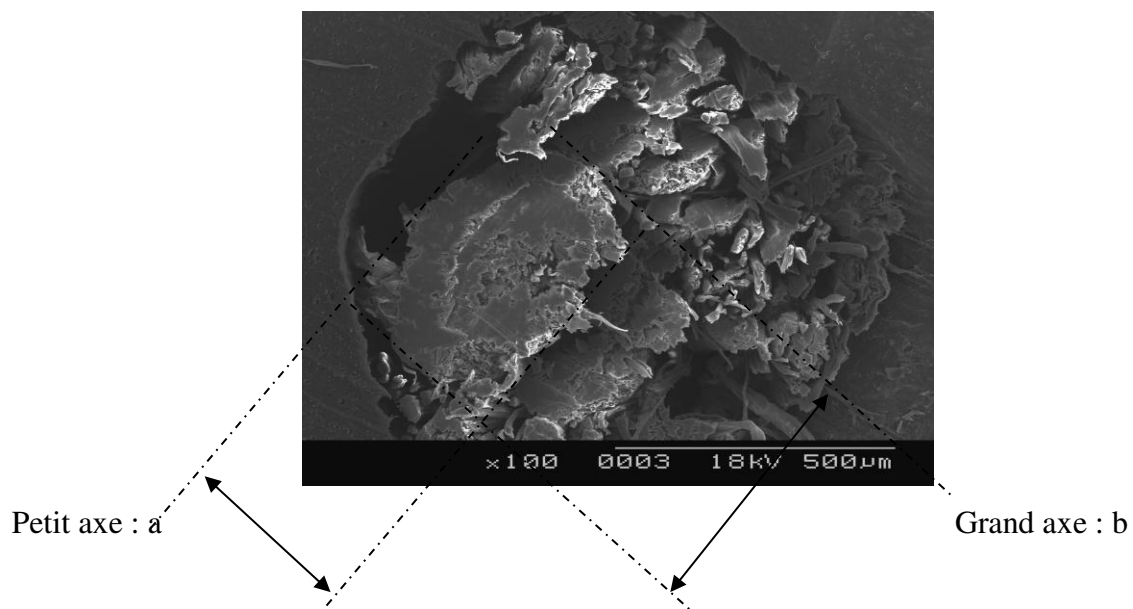


Figure 24. Micrographie électronique de la coupe transversale de fibres de bagasse

Equation 4

$$A = \pi ab/4$$

L'Equation 4 peut aussi exprimer l'aire d'une section en fonction du diamètre équivalent (D_e) pour une fibre fictive de section circulaire, Equation 5.

Equation 5

$$A = \pi D_e^2/4$$

Dans le cas des fibres de bagasse de section non-circulaire, l'aire de fibres est définie à partir des mesures de petit et grand axe (à partir de l'Equation 4) ; ils sont mesurés à l'aide du logiciel image J® sur les images prises au MEB.

Une méthode de détermination directe de la finesse de fibres de bagasse a été proposée par Chiparus (Chiparus, 2003). A partir d'images MEB, desquelles les diamètres ont été mesurés, les aires en section transversale des fibres calculées suivant les équations précédentes permettent d'obtenir leur finesse, via l'Equation 6.

Equation 6

$$Finesse (mTex) = 7507,3 + 0,992 * Aire (\mu m^2)$$

Cette formule met en corrélation la finesse des fibres de bagasse et l'aire de la section transversale comme une alternative pour mesurer le diamètre, en considérant la densité des fibres uniforme, et leur finesse, une variable indépendante. Ces valeurs peuvent être prédites à 95% avec les outils statistiques : distribution de student t, déviation standard S et D fonction de chaque valeur de régression linéaire, suivant la formule Equation 7 :

Equation 7

$$Estimation \pm t * S (1 + D)^{1/2}$$

2.5. Propriété hygroscopique de la bagasse

Les fibres naturelles cellulosiques sont de par leurs hygroscopies très hydrophiles et sensibles aux variations d'atmosphères (humidité et température). En effet, il est reconnu que l'humidité atmosphérique couplée à la température influe sur les propriétés chimiques et physico-mécaniques des fibres, filés, fils, étoffes et autres matériaux textiles (AFNOR, 1987).

Afin de maîtriser la sorption de l'humidité dans les particules de bagasse, deux phénomènes sont considérés : l'adsorption et la désorption. L'adsorption est la capture de l'humidité de l'air ambiant par les fibres, alors que la désorption est la perte de l'humidité. L'hygroscopie des fibres végétales est principalement due aux groupes hydroxyles –OH, à la surface des cristallites de cellulose, dans les régions amorphes de cellulose ou au niveau de l'hémicellulose (Ho Thi, 2008).

Ainsi sont évalués en fonction du temps sous atmosphère contrôlée, le taux de reprise (teneur en humidité) et la teneur en eau.

Taux de reprise

Le taux de reprise se définit comme la quantité d'eau présente dans l'air que peut absorber 100 grammes de matière sèche dans des conditions hygrométriques bien déterminées. Suivant la méthode gravimétrique issue de la norme NF G08-001-4 (AFNOR, 1987), on déshydrate un échantillon de 100g de bagasse, 12h en étuve à 60°C. Une fois les 12h écoulées, et la masse anhydre (M_s) constante, on place l'échantillon dans une pièce sous atmosphère contrôlée (22°C ; 65% HR). Chaque 15 min on procède à la pesée de l'échantillon, jusqu'à obtention de deux pesées successives égales. Cette dernière valeur (M_h), constitue la masse humide de l'échantillon, à partir de laquelle, on calcule le taux de reprise, suivant l'Equation 8.

Equation 8

$$R\% = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

M_h : la masse humide dans des conditions d'humidité et de température données (en g)

M_s : la masse sèche (en g)

Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

Teneur en eau

La teneur en eau ou humidité d'un matériau se définit comme la quantité d'humidité contenue dans 100 grammes de matière humide dans des conditions climatiques bien déterminées (Equation 9).

La méthode gravimétrique permet la mesure de la teneur en eau, en déterminant par évaporation l'humidité des fibres. Pour ce faire, les fibres humides sont placées dans une étuve à 105°C (température de dessiccation). On relève la masse humide au départ, puis on procède à la déshydratation pendant minimum 3h, jusqu'à obtention d'une masse sèche constante (ou presque). On considère la dessiccation comme achevée, lorsqu'après deux pesées successives (15 min d'intervalle), la différence de masse est de l'ordre de 0,05%. On peut alors calculer la teneur en eau du matériau.

Equation 9

$$Q\% = \frac{Mh - Ms}{Mh} * 100$$

3. Méthode de caractérisation mécanique

3.1. Contrôle de la rigidité à la flexion

La notion complexe de la main, liée aux déformations auxquelles les étoffes peuvent être soumises, a été analysée par le professeur Kawabata de l'Université de Kyoto au Japon afin de donner une approche plus objective possible. Par approche analytique, seize paramètres liés aux multiples applications des étoffes proposés par Kawabata ont été regroupés en un ensemble de trois épreuves, simplifiant la structure du problème : comportement mécanique, irrégularité de surface et consistance.

Ces paramètres sont classés en six groupes de propriétés, relevant de la traction, la flexion, la compression, l'état de surface et les paramètres de construction. Ces propriétés sont évaluées grâce à quatre modules indépendants constituant la chaîne de mesure Kawabata.

La rigidité à la flexion est mesurée par le module KES-FB2 SH. Sur ce module, les extrémités des fibres sont pincées par une pince fixe et une pince mobile à l'origine de la flexion pure transmise à l'échantillon (Figure 25). La fibre placée entre les pinces est fléchi suivant un arc-circulaire jusqu'à courbure ($\pm 90^\circ$), définit via une constante. Le moment de flexion une fois détecté, permet de mesurer correctement, par le module, la relation entre le moment de flexion et la courbure.

A partir du diagramme de flexion, on a accès au moment de flexion M (cN.cm/cm) relié à la courbure K (1cm^{-1}), comme vu Figure 25.

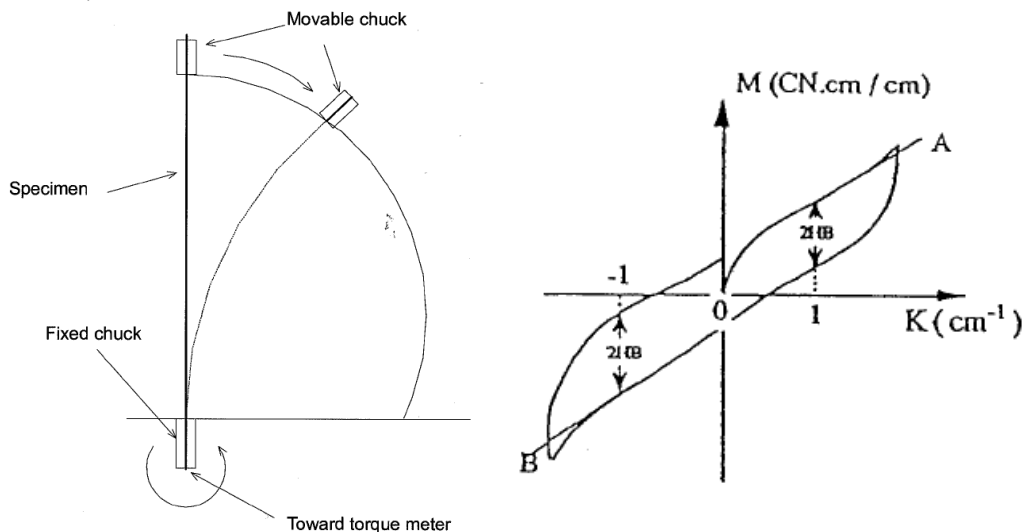


Figure 25. Diagramme de flexion type sur module KES FB2 SH

La rigidité à la flexion B exprimée en $\text{cN.cm}^2/\text{cm}$ ($\text{gf.cm}^2/\text{cm}$), moyennes des pentes du diagramme à $K = \pm 1\text{cm}^{-1}$.

L'hystérésis de flexion 2HB exprimé en cN.cm/cm (gf.cm/cm) est obtenu par la moyenne des deux largeurs du diagramme à $K = \pm 1\text{cm}^{-1}$.

Pour exprimer ces grandeurs en fonction du titre des fibres testées, on utilisera les Equations 10 et 11 suivantes :

Equation 10

$$R = 1020 * \frac{B}{T^2} \qquad \text{et} \qquad H = 102 * \frac{2HB}{T^2}$$

R : Rigidité spécifique d'une fibre exprimée en mN.mm²/tex²

H : Hystérésis spécifique d'une fibre exprimée en mN.mm/tex²

T : titre moyen de la fibre testée en tex

1020 et 102 : des constantes pour passer du gf au mN

A partir de ces deux grandeurs, nous pouvons tirer l'expression du pourcentage de récupération élastique des fibres w . Ce facteur est le rapport entre le travail élastique et le travail total, exprimé par la formule suivante :

Equation 11

$$w\% = 100 * \frac{B}{B + 2HB}$$

Il était nécessaire que la longueur minimale des fibres testées soit supérieure à la distance entre les pinces du module. Pour chaque lot de fibre correspondant à une concentration d'extraction spécifique, seules les fibres de longueur supérieure ou égale à 35 mm sont testées individuellement.

3.2. Contrôle de la résistance à la traction

La mesure de résistance à la traction est une propriété nécessaire dans les processus de transformation des fibres, ainsi que lors des différentes applications des produits finis. Dans un produit textile, les fibres sont fréquemment sollicitées en traction, d'où l'intérêt de l'étude des paramètres : résistance à la rupture et allongement.

Les sollicitations mécaniques : charge et déformation, consistent en l'application d'un effort de traction (parallèle à leurs axes) de fibres techniques individuelles. L'étude du

comportement en traction de fibre individuelle s'effectue à partir des courbes contrainte-déformation.

Les essais en traction sont effectués à l'aide du dynamomètre MTS avec une charge de 100N. Les essais ont été menés sur fibres individuelles préalablement montées sur support cartonné, afin d'éviter tout glissement des fibres lors de l'essai. Les pinces utilisées pour les essais sont des pinces à serrage manuel, et la distance entre pince est de 25mm. Elle a été choisie en rapport à la norme ASTM (ASTM, 1979), faute de norme relative aux fibres de bagasse. La vitesse de sollicitation a été choisie en respect des normes d'essais NF-G07-002 pour un temps de rupture de $20s \pm 3s$. Plusieurs longueurs de fibres ont été testées, en respectant par ailleurs le caractère hétérogène de la matière.

Le digramme force-allongement d'un essai de traction type est donné Figure 26.

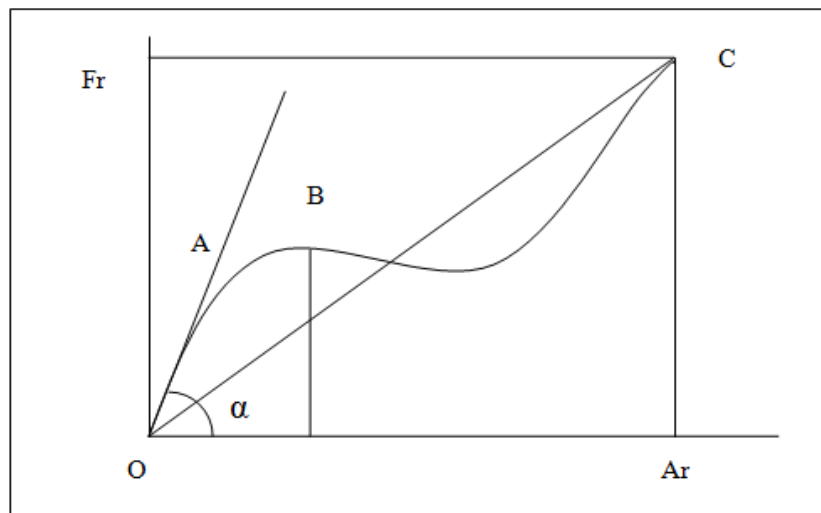


Figure 26. Diagramme type charge allongement

A partir de ce diagramme on repère des zones caractéristiques :

Zone OA : partie élastique qui suit la loi de Hooke

Zone AB : partie de déformation visco-élastique (récupération différée)

Zone BC : partie de déformation plastique (pas de récupération)

La capacité du matériau à s'opposer à une déformation ou la rigidité est caractérisée par le module d'Young, et la loi de Hooke exprimée en fonction du module élastique E ou module d'Young est donnée Equation 12 comme suit :

Equation 12

$$\sigma \text{ (Pa)} = \varepsilon E$$

Pour comparer les différents types de fibres indépendamment de leurs dimensions, certaines grandeurs comme force de rupture, allongement de rupture et module initial sont nécessaires.

La force de rupture (Fr) est la force maximale que peut supporter la fibre dans un essai de traction conduisant à sa rupture. On peut l'exprimer comme contrainte de rupture exprimée en Pa (Pascal), mais pour la terminologie textile, on utilisera la charge spécifique de rupture ou « force spécifique » définie par l'Equation 13 suivante.

Equation 13

$$\tau \text{ (cN/tex)} = \frac{\text{Fr (cN)}}{\text{T (tex)}}$$

L'allongement de rupture relatif (Ar) est la déformation de la fibre rapportée à la longueur initiale des fibres entre pince (de longueur Lo).

L'énergie de rupture (w) pour une fibre individuelle, représente l'énergie exprimée en Joule nécessaire pour la rompre, présentée Equation 14.

Equation 14

$$W \text{ (J)} = \frac{\text{Fr} * \text{Ar}}{2}$$

Le module initial (Mo) est le paramètre caractérisant la forme du diagramme charge-allongement et s'exprime selon l'Equation 15.

Equation 15

$$M_o = \text{tg}(\alpha)$$

4. Méthode de caractérisation chimique**4.1. Solubilité de la bagasse**

L'analyse de la solubilité de la bagasse en eau froide, en eau chaude et en soude est menée suivant les normes respectives TAPPI 207 om-84, TAPPI T212 om-88 et TAPPI T211 om-85. Ce paramètre est déterminant dans le choix des procédés d'extraction, de teinture ou autres transformation utilisant des solvants.

L'analyse de la solubilité en eau s'effectue à deux températures différentes : en eau froide (température ambiante) et en eau chaude (100°C). Ces deux méthodes présentées à la suite, permettent de déterminer les substances solubles dans l'eau selon la température du bain.

La bagasse est préalablement séchée minimum 24 h à 105°C en étuve, et les essais sont faits en duplicatas.

Solubilité en eau froide

Dans un bécher, on place 2 g de bagasse moulu dans 300 ml d'eau à température ambiante (25°C) pendant 48 h. Au bout de 48 h, on filtre la solution et on récupère la bagasse, qu'on place en étuve 4 h à 105°C pour séchage avant la pesée.

L'eau froide retire une partie des composés étrangers comme les substances inorganiques, les tanins, sucres et autres matières colorées.

Solubilité en eau chaude

Dans un erlenmeyer, on place 2 g de bagasse moulu dans 100 ml d'eau dans un bain à 95°C jusqu'à atteindre 100°C pendant 3 h. Le système est monté à l'aide d'une colonne de refroidissement. Au bout de 3 h, on stoppe la manipulation, et laisse la température du bain redescendre. On filtre la solution et on récupère la bagasse qu'on place 4 h en étuve à 105°C pour séchage avant la pesée.

Solubilité dans la soude

La solubilité en soude, se détermine en plaçant la bagasse dans un bain chaud (100°C) de soude à 1%, ce qui permet d'extraire des carbohydrates de faibles poids moléculaires, comme la cellulose et l'hémicellulose.

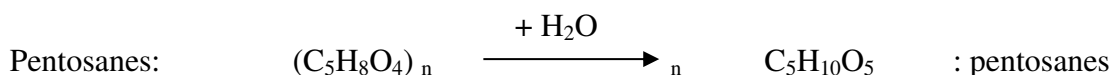
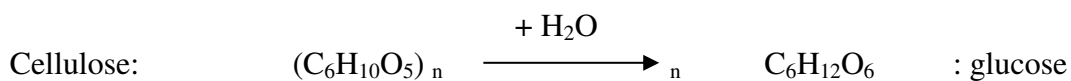
La bagasse est préalablement séchée au minimum 24 h à 105°C en étuve, et les essais sont faits en duplicatas. Dans un bécher, 1 g \pm 1 mg de bagasse moulu est placé dans 50 ml de soude à 1% pendant 1 h à la température de 100°C. La solution est agitée manuellement, à 10, 15 puis 25 min. Au bout de 1h, la solution est filtrée avec 100 ml d'eau chaude : le filtrat récupéré est noir. Il est neutralisé puis filtré de nouveau. La bagasse récupérée est placée 4 h en étuve à 105°C avant la pesée.

Cet essai donne une indication sur la dégradation par la chaleur, la lumière, l'oxydation, etc. qu'à subit le matériau original (précisément : la cellulose, au cours du temps).

4.2. Dosage de la lignine par la méthode de Klason

Le principe de cette méthode gravimétrique repose sur le dosage de la lignine de Klason (résidu insoluble minimum), après hydrolyse des carbohydrates en présence d'un acide minéral concentré.

L'hydrolyse de la cellulose et des pentosanes est d'autant plus rapide que la concentration de l'acide et de la température sont plus élevées. Mais il en est de même de la destruction des sucres qu'il convient d'éviter afin de ne pas former d'insolubles qui seraient pesés comme de la lignine. Pour cela, l'acide H₂SO₄ est employé à 67% (adopté des normes de Klason). La lignine est insoluble dans cet acide tandis que les autres constituants sont solubilisés suivant les réactions suivantes :



Les analyses ont été réalisées par le CIRAD de Montpellier à partir de petites quantités des fibres extraites réduites en poudre.

4.3. Spectroscopie Infrarouge : FT-IR

Les fibres extraites sont comparativement analysées en infrarouge pour évaluer qualitativement les pics d'absorbance constitutifs. Ce qui sera un élément déterminant dans l'optimisation des extractions (et révélateur en terme d'efficacité d'extraction).

Appareillage

La spectroscopie infrarouge est une technique de caractérisation non destructive des composés organiques présents dans un matériau permet de caractériser les liaisons chimiques et les groupements d'atomes. Une mesure qualitative de la cristallinité des polymères semi-cristallins, ainsi que l'orientation des chaînes macromoléculaires sont pris en compte, dans le cas d'une structure orientée.

Les différentes fibres extraites sont finement broyées avant d'être mélangé à 1% en masse au KBr en poudre afin d'obtenir des pastilles à analyser. Elles sont ensuite placées sur le porte-échantillon dans la chambre du FT-IR afin d'obtenir des spectres infrarouge sur une gamme spectrale de 600 à 4000 cm^{-1} . Les différents spectres sont obtenus avec un balayage de 100 scans, avec une résolution de 2 cm^{-1} .

Les spectres sont traités puis comparativement analysés afin de constater des changements structuraux des fibres de bagasse pour chaque traitement.

IV. Conclusion

En dépit de la grande diversité de technique de caractérisation des fibres naturelles, notamment de celles du domaine textile, certains de ses paramètres ont été testés au LPMT et en une proportion moindre à Cuba 9. L'utilisation de plusieurs qualités de matière (bagasse, canne broyée, écorce) permet d'observer les différents changements de surface dus aux traitements appliqués sur matières vierges. Compte tenu des quantités de bagasse (structure, morphologie...), de nombreuses normes ont été adaptées comme base des protocoles d'essais. Quelques appareillages classiques ont servi aux différents tests, et les résultats obtenus pour chaque type de fibre de bagasse sont exposés dans la section suivante, appuyés de discussions.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSIONS

A partir des différentes méthodes de caractérisation mises en place dans la section précédente, nous nous attachons dans cette partie à l'extraction des fibres de bagasse ainsi qu'à l'étude de leurs propriétés. Tout au long de cette section, différents résultats sont comparés à ceux de fibres naturelles, conventionnelles (coton, lin...) et non-conventionnelles (alfa, agave americana...), et à ceux de fibres synthétiques (polypropylène...).

I. Extraction des fibres de bagasse de canne

1. Analyse granulométrique des particules de bagasse

La distribution des particules de bagasse est fortement influencée par les réglages des broyeurs dans l'unité de transformation, qui réduisent les tronçons canne entrants (30 cm de long) en particules de longueurs hétérogènes (jusqu'à 10 cm de long). On répertorie dans le Tableau 21 la distribution des particules de bagasse selon leur tailles, pour deux types de matériaux : en sortie de distillerie (La Mauny) et en sortie de sucrerie (le Galion).

Tableau 21. Distribution granulométrique des particules de bagasse

Taille tamis (mm)	% Bagasse Galion	% Bagasse La Mauny
4	25%	35%
2	23%	16%
1	15%	16%
0,5	19%	18%
0,25	7%	7%
Fond	4%	4%
Pertes	7%	4%

Le tamis de 4 mm (taille des trous) a permis de retenir la plus grande fraction des particules les plus longues, à hauteur de 25% après passage en sucrerie et 35% après passage en

distillerie. Les particules retenues dans le tamis de 4 mm seront employées pour cette étude, car elles sont les plus longues, et préférables pour des transformations textiles.

2. Propriétés hygrométriques de la bagasse

On note une teneur en humidité et un taux de reprise des particules de bagasse, correspondant à la valeur limite vers laquelle tend le taux de reprise en fonction du temps de dessiccation.

Une comparaison de taux de reprise avec d'autres fibres naturelles est donnée Tableau 22 (Govern, 1990) (Morton et Hearle, 1986), pour de point de vue absorption d'humidité dans les conditions normales d'essais (65% HR et 20°C).

Tableau 22. Taux de reprise de quelques fibres références

Fibres	Taux de reprise R (%)	Teneur en humidité Q (%)
Laine	18,5	15,61
Agave americana L.	17,04	14,56
Jute	13,7	12,05
Coton	8 - 11	7,4 - 9,9
Bagasse de Saccharum Officinarum	9,38	7,26
Sisal	9,2	8,42
Chanvre	8	7,4
Lin	7	6,54
Ramie	6	5,6

Les fibres de bagasse de canne à sucre présentent un taux de reprise et une teneur en humidité comparables aux autres fibres naturelles d'origine végétale. Cette valeur peut donner une indication de la réactivité des polymères structurels lors des traitements en milieu aqueux, ainsi que de leur cristallinité.

Avec un taux de reprise de 9,38 % pour la bagasse originale, on s'attend à ce qu'après les différents traitements chimiques, le taux de reprise des fibres extraites augmente. En effet, lors des traitements d'oxydation à la soude, il s'en suit une diminution des sites actifs. Avec des groupements –OH en moins, moins de fixation d'eau est possible, d'où un taux de reprise plus élevé.

3. Solubilité de la bagasse

La solubilité de la bagasse se détermine à partir des particules de bagasse. L'Equation 16 présente le calcul par lequel, à partir de la bagasse sèche, on évalue la solubilité des particules.

Equation 16

$$\%solubilité = \frac{P_i - P_r}{P_i} \times 100$$

P_i : poids initial de l'échantillon en base sèche (mg)

P_r : poids résiduel de l'échantillon (mg)

Afin de déterminer P_i on doit utiliser le facteur de sèche F_s égal à 0,9050 via l'Equation 17.

Equation 17

$$P_b * F_s = P_i$$

De ces deux formules on obtient les valeurs de solubilité de la bagasse dans les différents milieux, donné ci-dessous Tableau 23.

Tableau 23. Analyse de la solubilité de la bagasse

Solubilité en eau froide	Solubilité en eau chaude	Solubilité dans la soude
2,05%	3,04%	31,1%

Avec l'élévation de la température de bain, on observe une plus grande solubilité de la bagasse. La solubilité dans la soude est très élevée et varie avec la fraîcheur de la bagasse.

Cette solubilité est un facteur communément employé par les papetiers comme indicateur de dégradation de la bagasse. Elle se vérifie plus élevée pour une bagasse vieille d'un an, comparé à une bagasse fraîche de quelques jours à quelques mois (Cuba9, 1994). Afin de garantir au mieux les propriétés physicomécaniques des fibres il est préférable de travailler à partir de matière fraîche.

Lors de l'essai, pour la solubilité en eau froide et en eau chaude, le distillat récupéré est de couleur jaune dû à la dissolution des substances solubles dans l'eau (saccharose résiduel, cire...). A contrario, le distillat récupéré lors de l'analyse de solubilité dans la soude est une liqueur noire, preuve de l'extraction de la lignine (et non plus que des sucres ou autres substances solubles dans l'eau) (Cuba9, 1994).

A partir de ces résultats et dans le but d'établir un protocole d'extraction efficace, l'extraction des fibres se fera à la soude.

4. Première approche des paramètres d'influences

L'analyse de paramètres tels que concentration en soude, température de bain d'extraction, présence ou non d'agitation magnétique a été faite dans un premier temps sur des particules de cannes broyées.

L'objectif de l'étude étant la caractérisation physico-mécanique des fibres extraites de la bagasse, il n'y a aucune mesure physique ou mécanique faite sur les fibres de canne broyée.

L'analyse est intéressante, à titre indicatif.

4.1. Protocole expérimental d'extraction de fibre de canne broyée

Le Tableau 24 regroupe les conditions d'extraction mises en place pour travailler sur les particules de canne broyée. Une fois les fibres obtenues, l'analyse microscopique permet de (MEB) permet de comparer les changements de surfaces liés aux conditions d'extractions.

Tableau 24. Conditions opératoires pour extraction à partir de fibres de canne broyée

Solutions		S α 1	S α 2	S α 3	S α 4	S α 5	S α 6	S α 7	S α 8	S α 9	S α 10	S α 11	S α 12
Milieux	Eau de mer		X		X		X		X		X		X
	Eau distillée	X		X		X		X		X		X	
	Soude	-	-	-	-	0.1 N	0.1 N	1N	1N	2N	2N	0.1 N	0.1 N
Température		Température ambiante		100 °C				Température ambiante				100°C	
Action mécanique		Agitation magnétique										-	
												Agitation manuelle	

Cette expérimentation à l'eau de mer permet de penser aux choix de solvants à considérer pour adapter l'extraction aux fibres de bagasse. En somme, il s'agit d'un travail d'observation durant l'extraction chimique, suivie de l'analyse de clichés MEB (Figure 26 et 27). Plusieurs observations notables sont reportées Tableau 25.

Tableau 25. Répertoire des observations notables durant les extractions sans soude

	Couleur de la solution	Aspect des fibres dans le bain
α 1	Jaune clair trouble	Très souples dans le bain Particules en suspension
α 2	Jaune clair trouble coloration immédiate différent du α 1	Assez rigides dans le bain Absence de particules
α 3	Jaune clair trouble	Assez rigides dans le bain
α 4	Jaune clair trouble	Très souples dans le bain Beaucoup de particules en suspension

Lors de ces extractions se dégage, en particulier pour α_1 , α_3 et α_4 une odeur caractéristique comparable à celle du jus de canne. Cette odeur (pour les extraits en l'absence de soude) révèle bien la présence de sucres, polysaccharides, comme on peut le voir sur les micrographies Figure 27 et 28. , ainsi que d'autres éléments solubles dans l'eau, confirmé par la coloration de bain.

Les particules de canne broyées plongées dans un bain d'eau de mer élevé en température donnent des fibres α_1 très souples, libérant des petites particules (en suspension dans le bain), ce qui diffère des fibres α_2 (à l'eau de mer à température ambiante). L'emploi d'eau salée favorise l'extraction soumis à l'élévation de la température (jusqu'à 100°C).

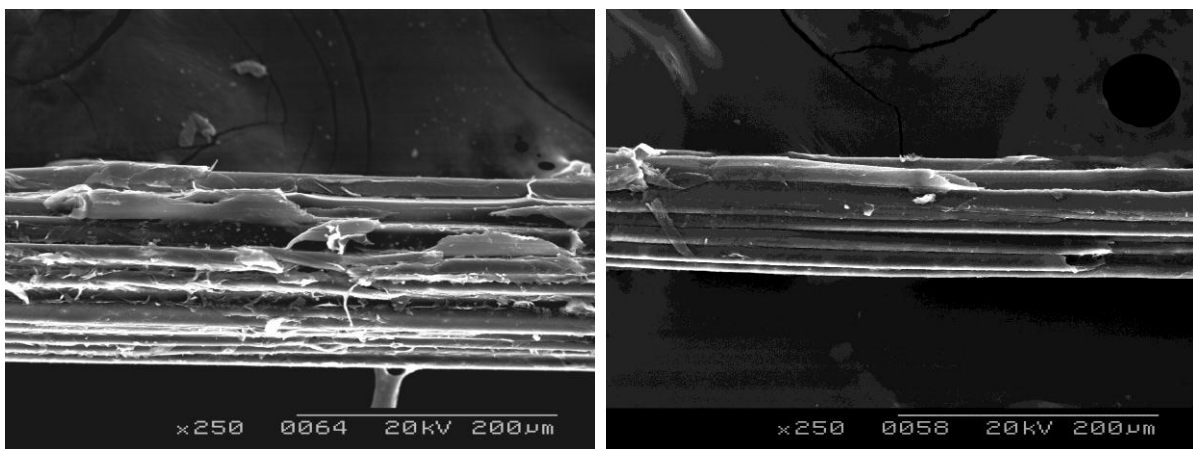


Figure 27. Micrographies électroniques des fibres extraites à l'eau distillée α_1 à gauche, eau de mer α_2 à droite

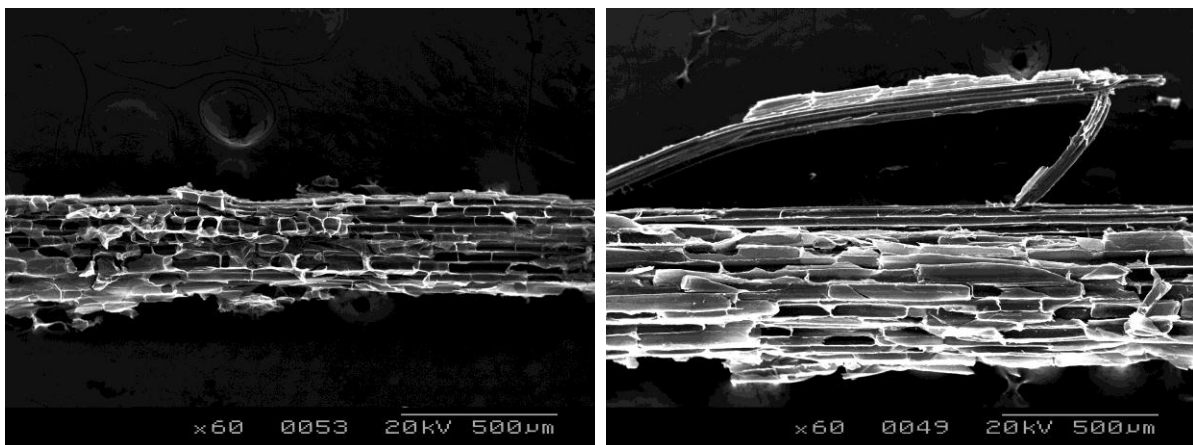


Figure 28. Micrographies électroniques des fibres extraites à l'eau distillée α_3 à gauche, eau de mer α_4 à droite

On distingue Figure 28, les cellules d'accumulation du parenchyme (cf. chapitre I), qui en dépit des traitements sont encore présentes à la surface des fibres élémentaires. Ces éléments sont dits, incrustés sur les fibres (Collier, 1992). En Figure 27, le traitement donne des fibres α_2 et α_1 plus lisses que les fibres α_3 et α_4 . Ces micrographies révèlent que l'influence des différents traitements sur les particules de bagasse.

En listant les différentes observations lors des essais expérimentaux, on obtient le Tableau 26 suivant. Pendant l'extraction, un premier paramètre visuel qui permet d'estimer l'efficacité du traitement, est la couleur de bain. En effet, la soude réagit avec la lignine de la biomasse, donnant lieu à une forte coloration du bain remarquée par un passage d'un jaune clair à un marron foncé. L'obtention de cette « liqueur noire » est signe de l'extraction de la lignine.

Tableau 26. Répertoire des observations notables durant les extractions à la soude

	Couleur de la solution	Aspect des fibres dans le bain
α_5	Jaune clair non trouble Au départ opaque, puis épaissement de la solution suivie du fonçage de la solution	Assez rigides dans le bain
α_6	Transparent Solution devenue épaisse avec formation d'écume	
α_7	Jaune foncé	
α_8	Jaune vert pistache Solution opaque de plus en plus trouble	Fibres moins souples que α_8
α_9	Jaune orangée coloration des fibres : fluo/transparentes	Fibres très souples apparition de plusieurs fibrilles
α_{10}	Opaque	Fibres moins souple que α_9 Absence de particules à la surface
α_{11}	Jaunâtre	
α_{12}	Marron clair Formation de mousse sur le dessus	

Concernant les fibres extraites, pour lesquelles on extrait la lignine, elles sont dans les bains beaucoup plus souples, ce qui appuie l'hypothèse d'efficacité de traitement.

Bien entendu, ces observations restent subjectives et nécessitent des mesures supplémentaires à relier aux propriétés mécaniques des fibres extraites (comme effectué pour les fibres de bagasse).

L'analyse MEB permet de voir les modifications de surface des fibres lors des traitements, qui correspondent aux observations expérimentales (disparition d'éléments incrustés selon les conditions d'extractions).

A première vue, l'utilisation d'eau de mer au lieu d'eau distillée donne de meilleurs résultats sur les fibres, offrant ainsi une possibilité d'utilisation d'eau de mer (locale), pour l'extraction de fibres de canne. Bien entendu, d'autres essais à une échelle pilote seraient indispensables, pour confirmer cette piste de travail, surtout pour une extraction en circuit fermé ou sous pression. En effet, l'emploi d'eau de mer pour de telles réactions présente l'inconvénient majeur de la précipitation des oligo-éléments et sels minéraux (iode, calcium, phosphore, sodium...) présents dans l'eau de mer. Bien que la ressource en eau salée (de mer) soit une alternative intéressante de par son abondance, on s'affranchira pour la suite de l'étude de ces inconvénients, en utilisant (à concentration similaire à l'eau de mer de Martinique) du chlorure de sodium NaCl à 35g/l.

5. Identification des fibres de bagasse extraites

Dans l'élaboration du protocole d'extraction sur bagasse, différents essais ont été réalisés en optimisant le nombre d'opération sur particules, ainsi que le nombre de réactifs intervenant dans le processus d'extraction (en opposition au procédé viscosé). Les résultats présentés ici permettront de mener par la suite, les mesures de caractérisation physiques et mécaniques des fibres extraites selon la sélection faite dans les conditions d'extraction présentées Tableau 27.

L'extraction chimique se fait en deux temps, avec premièrement une préhydrolyse à l'eau distillée ou à l'eau salée à 35g/l NaCl, suivie d'une extraction à la soude. Les fibres obtenues sont répertoriées en Tableau 27.

Tableau 27. Identification des traitements sur particules, sélectionnées pour la caractérisation physico-mécanique

		Hydroxyde de Sodium à 1N	Hydroxyde de Sodium à 0,1N
Avec préhydrolyse	Eau salée 35g/l	BPS-1N	-
	Eau distillée	-	BPD-0,1N
Sans préhydrolyse	-	B-1N	B-0,1N

Cette identification nominale pour les fibres extraites sera utilisée dans toute la suite de l'étude, pour déterminer avec les propriétés physico-mécaniques des fibres extraites, l'influence de la préhydrolyse, de l'eau salée et de la soude.

L'observation visuelle de la couleur de bain, est le premier indicateur de l'efficacité de l'extraction. Lors de la préhydrolyse à l'eau distillée ou à l'eau salée, on constate que l'intensité de la coloration du bain (jaune) est liée au taux d'éléments solubles, dissouts dans le bain. Il en est de même pour l'extraction à la soude, qui par contre, donne un bain de couleur marron foncé. Ici, l'intensité de la couleur du bain est essentiellement liée aux quantités de lignine extraites, selon la concentration en soude. Plus la couleur du bain est intense, plus on a extrait de la lignine (la liqueur noire) (Cuba9, 1994).

La Figure 29 est une photographie de quelques bains d'extraction à différentes concentration en soude.

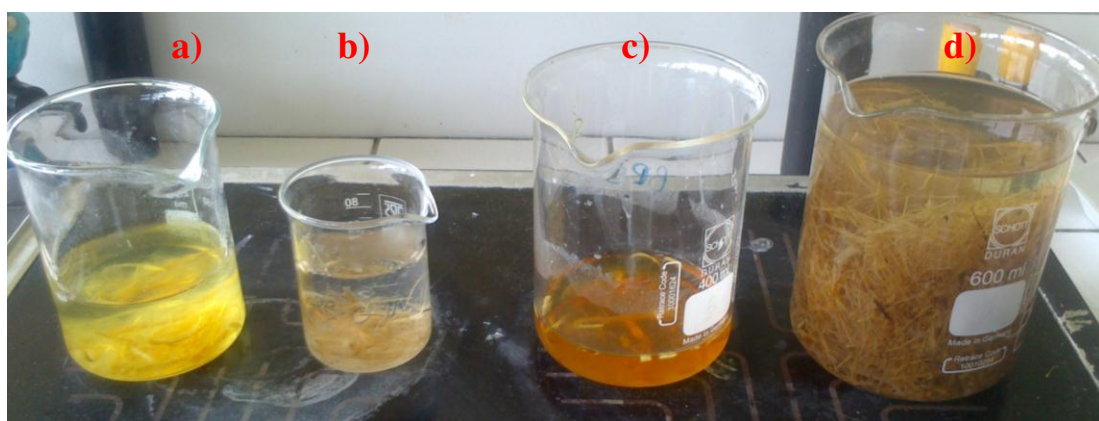


Figure 29. Différentes extractions présentant des colorations de bain différentes selon la concentration en soude a) 1N, b) 0,1N, c) 2N et d) uniquement eau distillée

L'observation MEB des quatre types de fibres obtenues permet de constater les changements morphologiques de la surface des fibres présentés Figure 30.

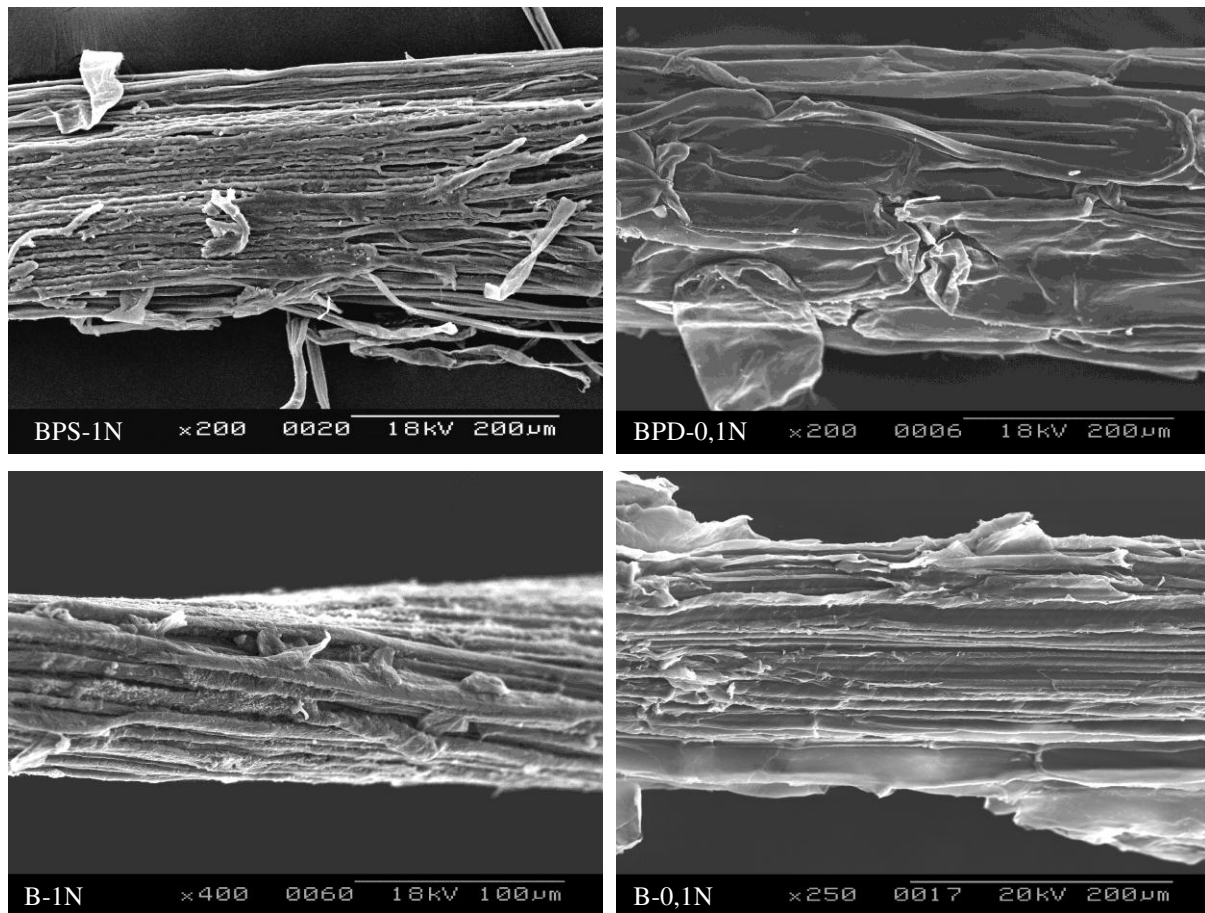


Figure 30. Micrographies électroniques de fibres de bagasse extraites sous différentes conditions

La morphologie de surface des fibres permet de voir qu'en dépit des traitements chimiques appliqués, les fibres élémentaires sont encore liées entre elles. On observe que les fibres élémentaires sont disposées longitudinalement, avec plus ou moins de parallélismes, et un angle fibrillaire remarquable pour les fibres B-1N. Des extrémités de fibres élémentaires sont aussi visibles pour les fibres BPS-1N, ce qui n'est pas le cas pour les fibres extraites à faible concentration en soude.

En effet, des éléments incrustés (pectines, hémicellulose, lignine) empêchent d'accéder aux fibres élémentaires (Dinu, 2006). L'action de la soude à faible concentration est de fait limitée pour extraire les cellules lignifiées et autres éléments présents dans l'espace intercellulaire.

6. Rendement de l'extraction chimique

A partir de la bagasse récupérée en sucrerie, l'étape de tamisage permet de sélectionner vingt-cinq pourcent de particules de bagasse. Les traitements chimiques appliqués aux particules de bagasse donnent entre 44 et 71% de fibres obtenus (matière sèche).

Un tableau récapitulatif des rendements par étape et général est donné Tableau 28.

Tableau 28. Rendement en fibres selon traitement

	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
100% particules de bagasse	100	100	100	100
% de particules sélectionnées lors du tamisage	25	25	25	25
% de fibres obtenues après l'extraction chimique	50	44	60	71
Rendement % fibre obtenue/ bagasse entrante dans le processus	13	11	15	18

Le rendement en fibres de l'ordre de 11-18% (selon le traitement). Ces rendements sont faibles suite à l'obtention de pulpe cellulosique et de petites particules (éliminées lors du rinçage) lors de l'extraction.

Bien que les pratiques des papetiers permettent d'obtenir des rendements plus élevés (de l'ordre de 30%), ces faibles rendements ne présentent pas d'inconvénient majeur pour une filière textile. En effet, loin de détourner la bagasse de son utilisation première comme combustible, l'emploi d'une faible proportion de matière (25% de particules lors de la séparation granulométrique) qui se destinerait au domaine textile, ne pourrait avoir d'impact économique négatif, sur la filière canne. Ainsi, sans avoir à supprimer la bagasse en tant que combustible, cette matière peut trouver une autre source de revalorisation sans pour autant créer de manque à gagner pour les industriels.

7. Dosage de la lignine Klason

L'extraction chimique à la soude permet d'extraire la lignine. Cette analyse permet de mesurer les quantités de lignine encore présente dans les fibres (après extraction). Le graphique suivant, Figure 31, présente les teneurs en lignine résiduelle, mesurées au CIRAD de Montpellier.

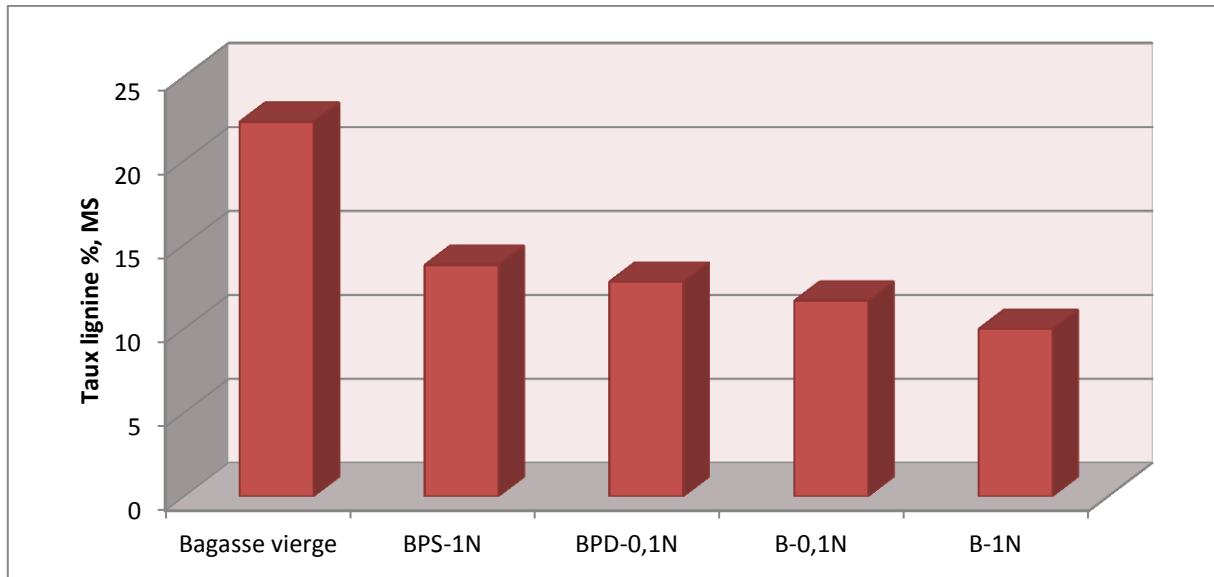


Figure 31. Taux de lignine résiduelle %MS

Les résultats d'analyses sur poudre obtenus montrent l'extraction effective de lignine, par rapport à la bagasse vierge. En revanche, alors qu'on s'attend à ce que les fibres BPS-1N aient le moins de lignine résiduelle, on constate que ce sont au contraire les fibres B-1N, extraites à même concentration sans préhydrolyse.

Plusieurs hypothèses se présentent alors, en recadrant dans un premier temps le nombre d'analyses effectués (deux par échantillon) qui peut être insuffisant pour ce dosage. Deuxièmement, la critique peut être faite sur la fraîcheur du matériau testé qui se dégrade d'année en année, et qui peut donner ajouter une dispersion dans la mesure. Dernier point non négligeable reste, la distribution des éléments physiques issus de la canne, de chaque prélèvement. En effet lors du prélèvement des fibres (avant d'être réduit en poudre), les différentes fibres proviennent de parties de l'écorce, de la moelle ou fibres qui ont des teneurs en lignine et autres différentes. Ceci influe certainement sur la dispersion des résultats.

Comparées aux rendements obtenus par les papetiers (2-3% lignine résiduelle après préhydrolyse et cuisson alcaline à 17%), les quantités de lignine extractible dans cette gamme

de concentration en soude, restent assez faibles. Les présents résultats sont complétés avec l'analyse des spectres infrarouge, donnant une meilleure indication quant aux composés encore présents après extraction.

8. Analyse en spectroscopie infrarouge FT-IR

L'analyse spectroscopique est étudiée ici à partir de la base de données obtenues sur différents plantes lignocellulosiques, mais aussi à l'aide de travaux effectués sur la canne, l'écorce et la bagasse de canne à sucre, édités dans la littérature.

L'analyse des spectres infrarouge en absorbance a permis d'établir le spectre de pics caractéristiques des polymères présents dans la structure, vu sur la Figure 32.

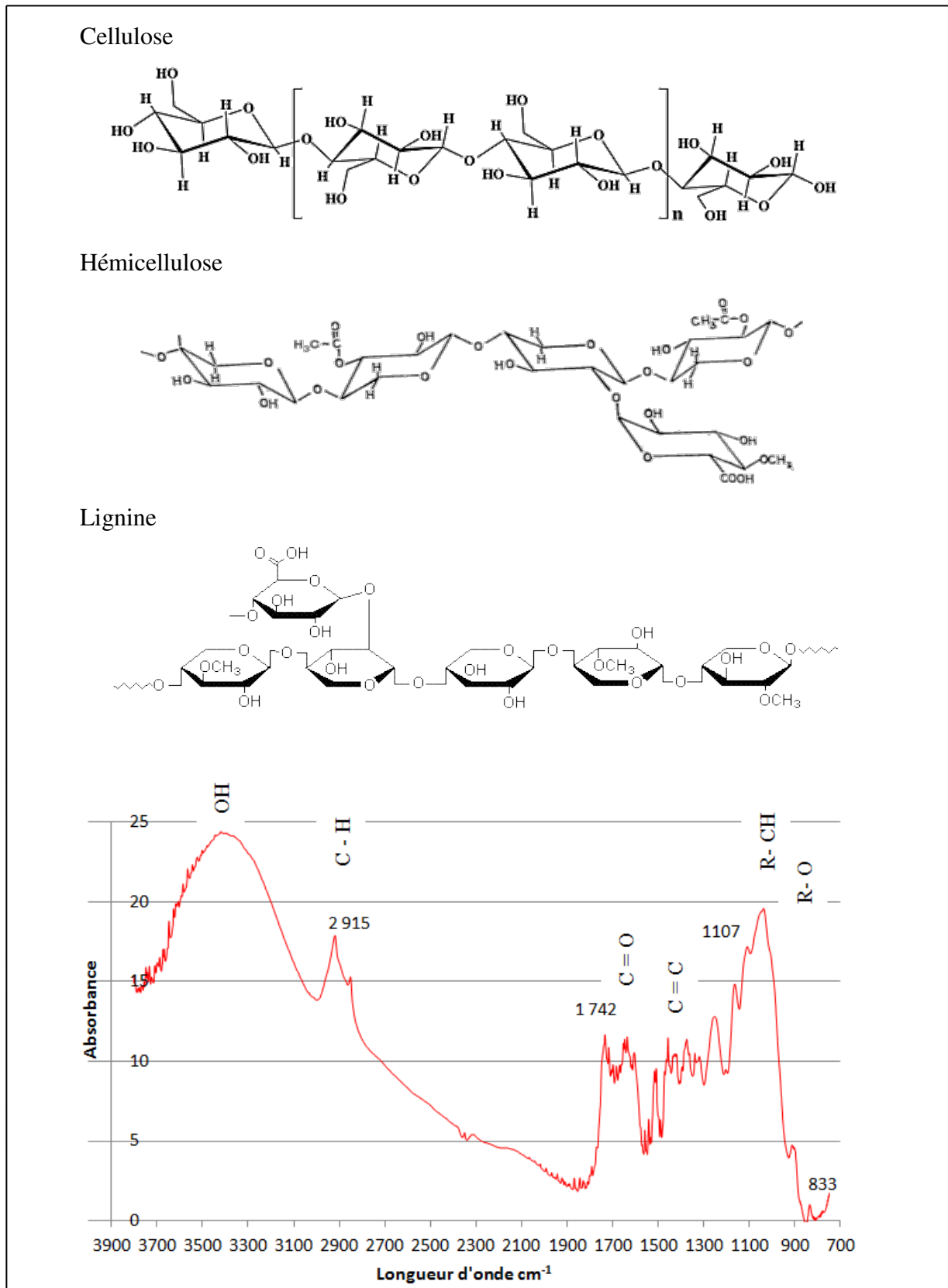


Figure 32. Spectre infrarouge de la bagasse vierge non traitée, avec les principaux

En comparant les spectres de fibres BPS-1N et bagasse vierge, on peut distinctement remarquer (Figure 33) les changements relatifs à la structure interne des groupements polymériques. Ces différences sont marquées au niveau des pics d'intensité, mais il n'y a pas de mesures quantitatives faites, puisque les spectres sont qualitatifs.

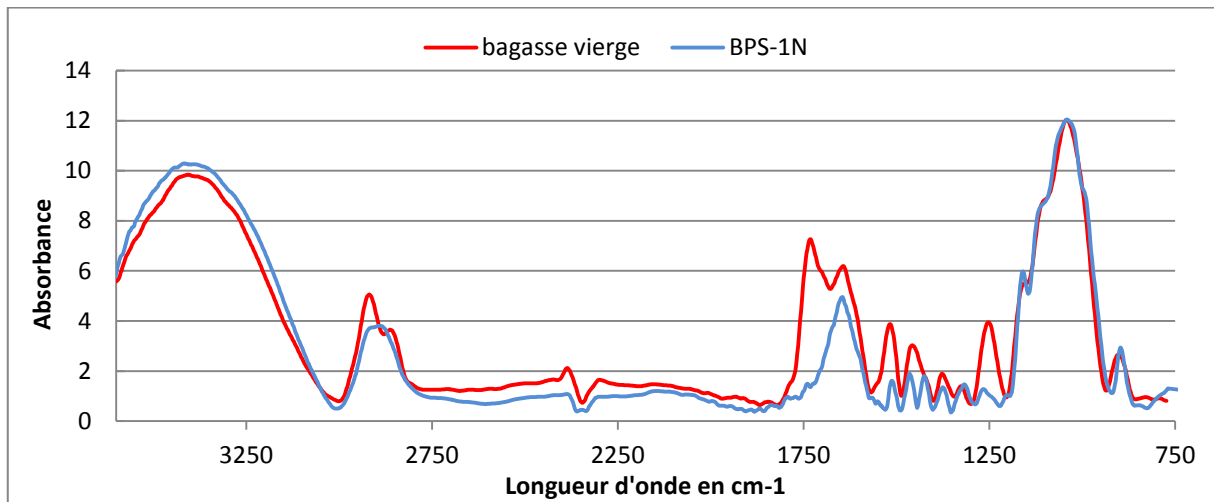


Figure 33. Spectres infrarouge des différents types de fibres extraites BPS-1N

En regardant plus précisément la zone spectrale spécifique à la lignine, entre 800 et 1800 cm^{-1} (Figure 34), on constate que le traitement de la bagasse vierge à la soude, favorise la disparition de certains pics, et la diminution de l'intensité de l'absorbance.

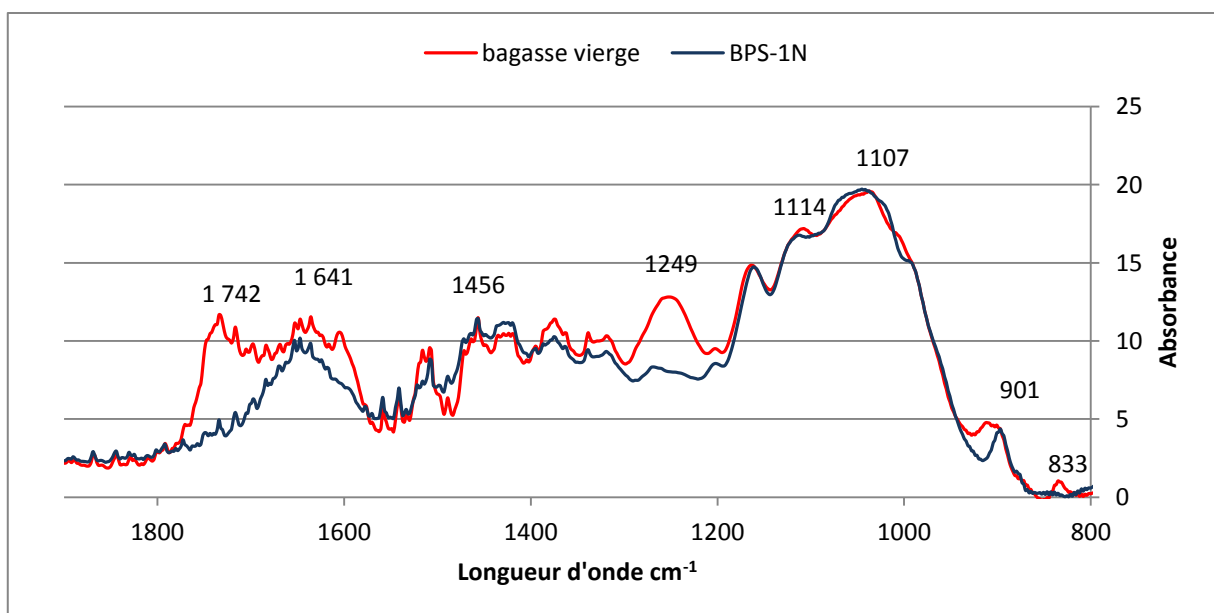


Figure 34. Spectres infrarouge des différents types de fibres extraites BPS-1N

Les autres spectres IR des fibres BPD-0,1N, B-1N et B-0.1N mis en Annexe 2, mettent en évidence les quelques changements notables avec la bagasse vierge initiale.

8.1. Analyse des pics caractéristiques visibles

On remarque sur les quatre spectres infrarouges, la présence des groupements hydroxyles (OH), représentés par une large bande dans la région de $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ (Browning, 1967). Les vibrations de valence reliées aux C-H aromatiques sont aussi communes aux quatre spectres. Elles sont caractérisées par des absorptions dans la région de $2\ 800$ à $3\ 030\text{ cm}^{-1}$.

Les fonctions caractéristiques des unités de base de la lignine sont les fonctions aromatiques, carbonyles (C=O), les alcools et les éthers.

Les fonctions aromatiques sont caractérisées en infrarouge, par des bandes d'absorption dans la région de 1500 à $1\ 600\text{ cm}^{-1}$, ce qui est caractéristique des vibrations C=C du squelette aromatique de la lignine (Silverstein *et al.*, 1991) (Browning, 1967). Aussi, des études fondamentales sur les vibrations du benzène ont montré que le mode de vibration de valence des liaisons carbone-carbone conjuguées du squelette aromatique conduit à l'apparition de quatre bandes situées entre 1650 et $1\ 450\text{ cm}^{-1}$ (Bellamy, 1964). Trois de ces bandes apparaissent dans les spectres de B-1N et B-0.1N à $1\ 463$, $1\ 512$, $1\ 548\text{ cm}^{-1}$, tout comme dans les spectres de lignine alcaline (Browning, 1967). Une bande apparait à 1590 cm^{-1} pour les fibres B-1N uniquement. Cette absorption est caractéristique des vibrations du squelette aromatique, et de la réduction ou de la désintégration des chaînes latérales de la lignine aliphatique (Sun *et al.*, 2005).

Les fonctions carbonyles sont représentées par de larges bandes intenses dans la région de 1600 à 1725 cm^{-1} . D'après Sarkanen et Ludwig (1971), la bande d'absorption à 1660 cm^{-1} est caractéristique des vibrations de valence dans les groupements carbonyle-aryle conjugués.

La présence de ces fonctions est confirmée par les bandes d'absorption à 1653 et 1702 et 1728 cm^{-1} .

Les échantillons analysés présentent une vibration reliée à l'anneau aromatique à 1266 ou 1268 cm^{-1} qui est caractéristique du groupement méthoxyle relié à l'anneau guaiacyle, monomère de lignine principalement présent dans la lignine des bois mous (conifères).

Il est ici intéressant de constater dans ces spectres infrarouges la présence d'anneaux guaiacyles et l'absence des anneaux syringyles. En effet, tandis que la lignine des bois durs (feuillus) sera constituée d'un mélange de monomères de lignine de type guaiacyle et syringyle, l'absence d'absorption dans la région à 1300 cm^{-1} permet de confirmer l'absence de groupement syringyle caractéristiques des feuillus (Fengel et Wegener, 1984).

La bande d'absorption retrouvée pour B-1N et B-0,1N, respectivement à 1055 et 1048 cm^{-1} correspond aux vibrations RC-H et aux alcools R-OH, ce qui implique la présence de fonctions alcools en bout de chaîne.

La différence la plus remarquable entre les différents spectres est le changement d'intensité d'absorbance de certaines bandes caractéristiques, comme autour de 3400 cm^{-1} , et autour de 1050 cm^{-1} . Une analyse plus détaillée des spectres infrarouges de différentes fibres extraites et de la bagasse vierge est présentée Tableau 29.

Tableau 29. Analyse des changements relatifs dans la bagasse après traitement

Bandes cm ⁻¹	Caractère	Traitement			
		BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
3 300	Groupements hydroxyyles OH	x	x	x	x
2900	Liaison C-H aromatiques	Un seul pic, Bande moins large	Quasi-disparition d'un pic		x
1745	Liaisons carbonyles C=O associées à lignine	Disparition du pic	Bande plus étroite	Plus qu'un seul pic de même intensité	Plus qu'un seul pic étroit de grande intensité
1720	Acide carboxylique/groupes esters	Diminution de l'intensité			
1660	Groupements carbonyle-aryle conjugués	Diminution de l'intensité	Apparition de deux pics		
1460/ 510/ 1550/ 1600	Liaison C=C aromatique de la lignine		Intensité supérieure et Apparition de pics à 1420cm-1		x/pic plus intense/x
1590	Vibration d'élongation anneau aromatique (associé à l'extraction de la lignine)	x	x		x
1260				Quasi disparition du pic	Pic moins important
1245		x	x		
1100		x	Apparition d'un pic étroit		x
1098/ 900		Déplacement du pic vers la droite	Bande plus large/pic plus étroit	Pic de plus faible intensité	x/décalage du pic à 890
833			Pic de faible intensité	Disparition du pic	Pic plus intense

L'analyse des spectres infrarouge permet de voir les vibrations d'élongation, les disparitions et déplacements de pics des groupements caractéristiques des différents polymères des fibres de bagasse. Les spectres varient d'une fibre à l'autre, selon le traitement appliqué. On observe notamment pour les fibres extraites à forte concentration en soude, qu'une augmentation de l'intensité des pics caractéristiques de la cellulose avec en parallèle une diminution voir disparition des pics en particulier autour des 1750- 1600 cm^{-1} .

II. Etude des propriétés physiques et mécaniques des fibres extraites

1. Etude de la distribution en longueur

Les différentes fibres extraites présentent des variations de longueurs, qui diffèrent selon le traitement. Le Tableau 30 regroupe les différentes longueurs moyennes en nombre prises sur deux cents fibres pour chaque traitement d'extraction.

Tableau 30. Longueurs moyennes des fibres selon le traitement

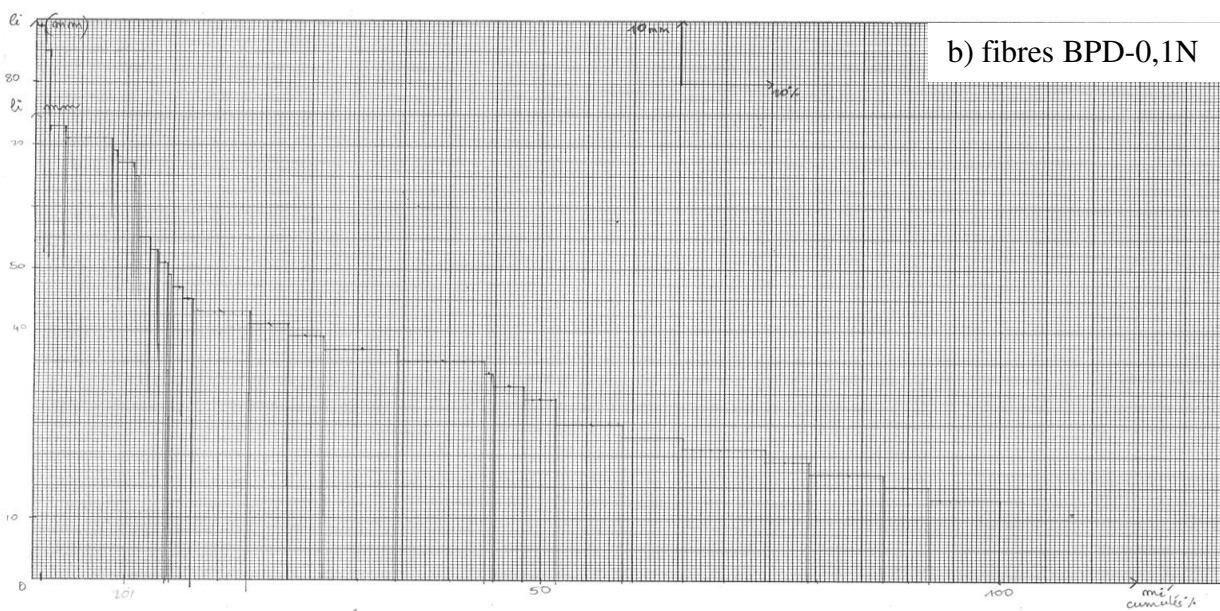
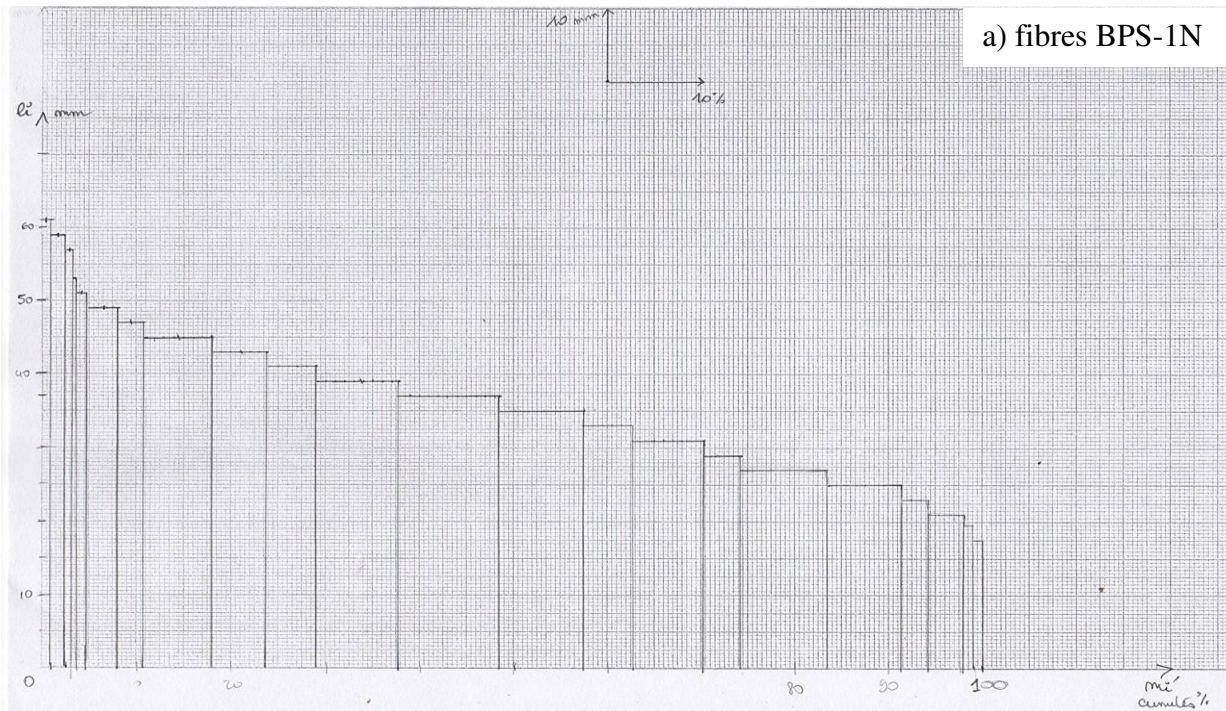
	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Longueur min (mm)	16,5	23,0	21,5	19,5
Longueur moyenne (mm)	29,8	45,6	37,7	37,6
Longueur max (mm)	45,0	89,5	59,0	62,0
Ecart-type (mm)	6,7	16,4	9,9	9,7
CV%	22	36	26	26

Au vue des longueurs moyennes des fibres, aucune différence significative n'est à noter suite aux différents traitements. En considérant la grande dispersion (CV % élevé pour les quatre extractions), l'effet du traitement, en particulier de la concentration en soude, ne peut être un facteur déterminant la longueur des fibres. Aussi, la grande dispersion (CV% élevé), provient de la grande hétérogénéité des particules de bagasse initiales.

De ce fait, la notion de « longueur moyenne » est insuffisante pour estimer les longueurs de fibres de chaque échantillon. Pour y pallier, on établit des histogrammes de distribution numériques et pondérées à la masse.

Distribution en longueur pondérée par la masse

A partir des différentes mesures de masse, les diagrammes de distribution en longueur pondérée en masse sont présentés Figures 35, pour les quatre types de fibres extraites : a) pour les fibres BPS-1N, b) pour les fibres BPD-0,1N, c) pour les fibres B-1N et d) pour les fibres B-0,1N.



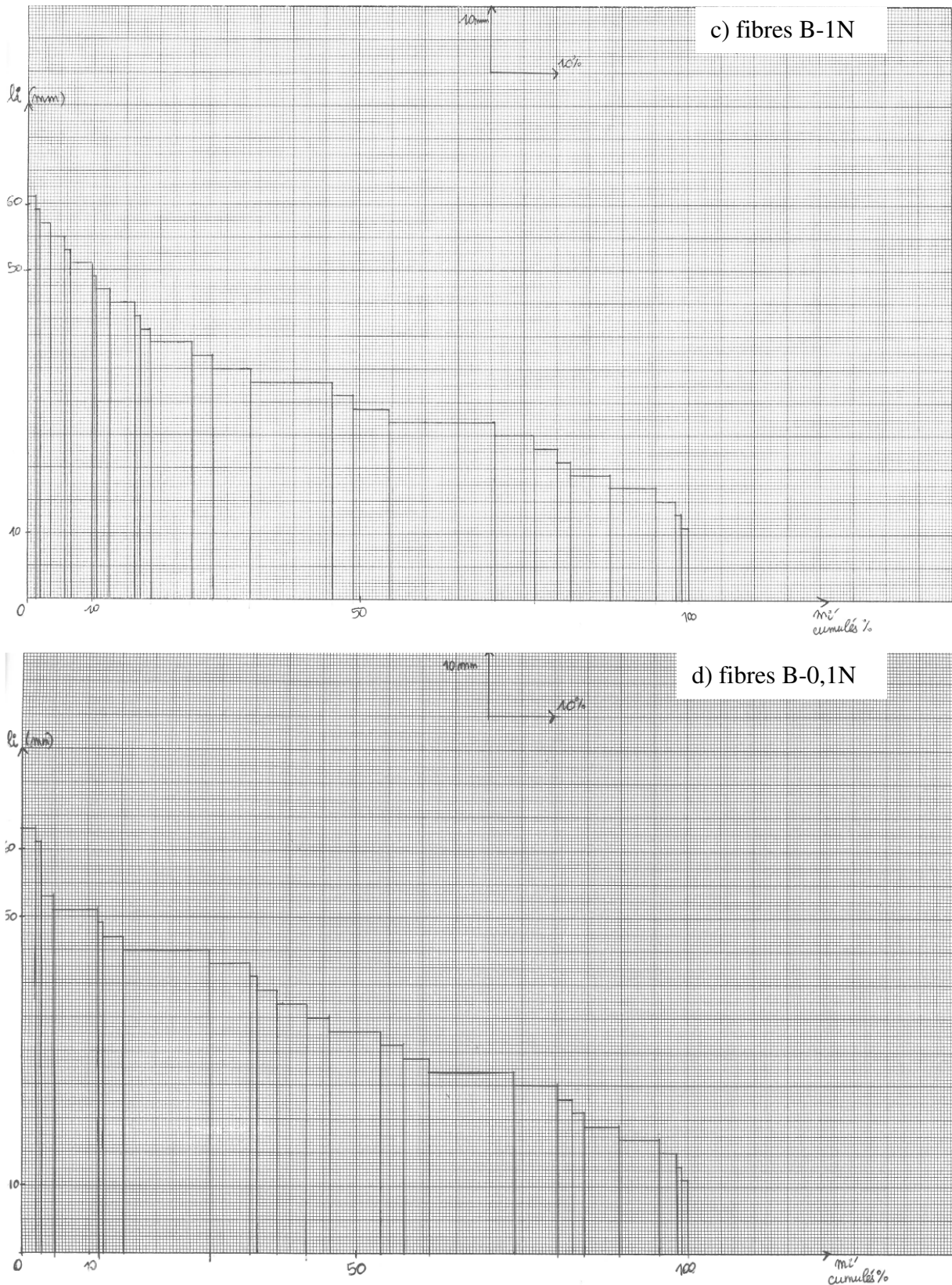


Figure 35. Diagramme poids des fonctions de répartition pondérée par la masse

De ces quatre diagrammes, il ressort que les fibres BPD-0,1N (de longueur moyenne 45.6 mm) présentent une distribution qui pourrait être un inconvénient en industrie, si les fibres doivent être utilisées en l'état. Une étape supplémentaire de séparation des fibres autour d'une classe de longueur s'avère nécessaire. Sur le critère de la distribution en longueur des échantillons, les fibres BPD-0,1N se classent en dernière position (par rapport aux autres types de fibres), pour une utilisation en l'état.

Toutefois, les propriétés mécaniques sont à prendre en compte pour conclure sur la qualité des fibres.

Paramètres de centrage

L'élaboration des histogrammes de distributions permettent de déterminer les paramètres de centrage « Barbe » et « Hauteur ». On définit $CV_B\%$ comme étant le coefficient de variation déduit de l'histogramme Barbe, et $CV_H\%$, celui de l'histogramme Hauteur.

Chaque fibre a été pesée puis mesurée au maille-mètre individuellement avant d'être regroupé par classe de longueur, pour la détermination des paramètres de centrage. Dans le Tableau 31 apparaissent les différents résultats avec les paramètres de centrage tel que barbe et hauteur.

Tableau 31. Paramètres de centrage des différents de type de fibres

	Fibres BPS-1N	Fibres BPD-0,1N	Fibres B-1N	Fibres B-0,1N
Longueur moyenne (mm)	29,8	45,6	37,7	37,6
H en mm	33,33	27,37	27,65	29,56
B en mm	35,63	33,86	31,62	34,16
CVh %	26,29	48,71	37,87	39,43
CVb %	25,33	48,70	35,76	35,14

Ces paramètres de centrage hauteur et barbe, sont significativement éloignés des longueurs moyennes mesurées. Ainsi il convient alors d'aborder la longueur moyenne des fibres avec précaution et précision.

Méthode de sélection des fibres

D'après les diagrammes de distribution des fibres, il est préférable pour l'industrie textile de travailler avec une classe de fibres sélectionnée, autour des paramètres de centrage, fonction de leur fréquence dans l'échantillon analysé, mais aussi des propriétés mécaniques inhérentes aux conditions d'extraction.

2. Etude des diamètres inter fibres

Les fibres extraites à partir de la bagasse ne sont pas circulaires et présentent des variations de section inter fibre. Afin d'évaluer au mieux la forme en section droite des fibres (diamètres) selon le caractère très hétérogène de la matière, deux classes de diamètres ont été mesurées (trentaine de fibres) selon le petit axe et le grand axe. La Figure 36 montre les résultats expérimentaux. L'Annexe 3 rassemble les résultats individuels.

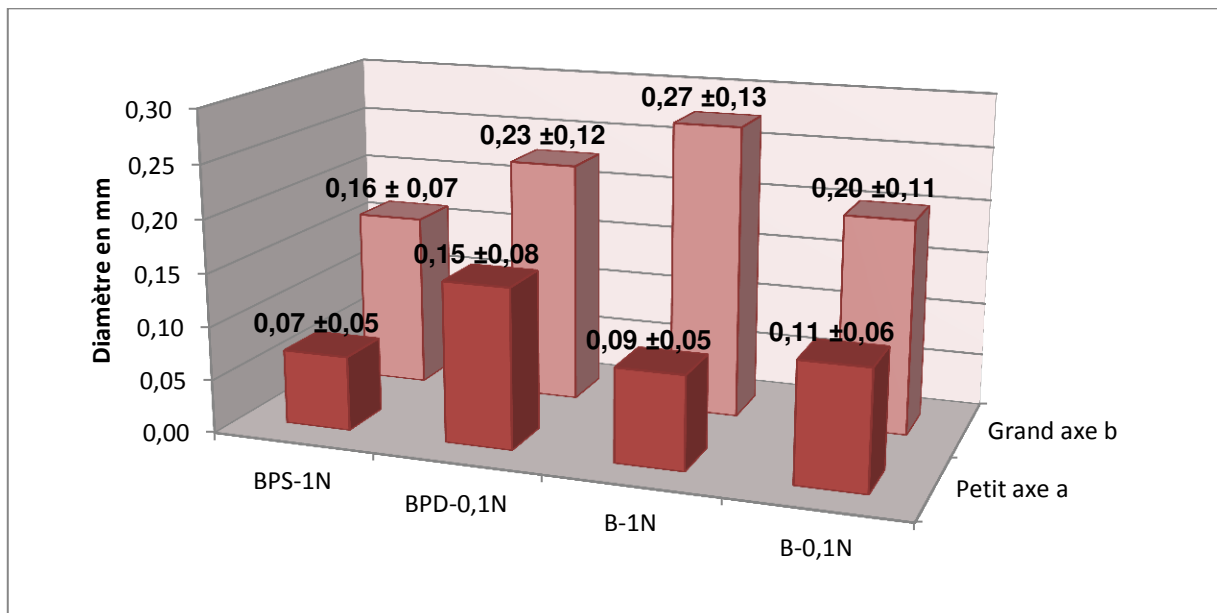


Figure 36. Résultats expérimentaux des mesures inter fibres sur MEB

Ces mesures de diamètre prises au MEB montrent bien la différence significative entre le petit axe et le grand axe, ce, quel que soit le traitement appliqué aux particules de bagasse. A partir de ces différentes valeurs, en plus de constater la forme elliptique des fibres, les

mesures de diamètre ne tiennent pas compte des vides structuraux qu'on observe, comme présenté en Figure 37.

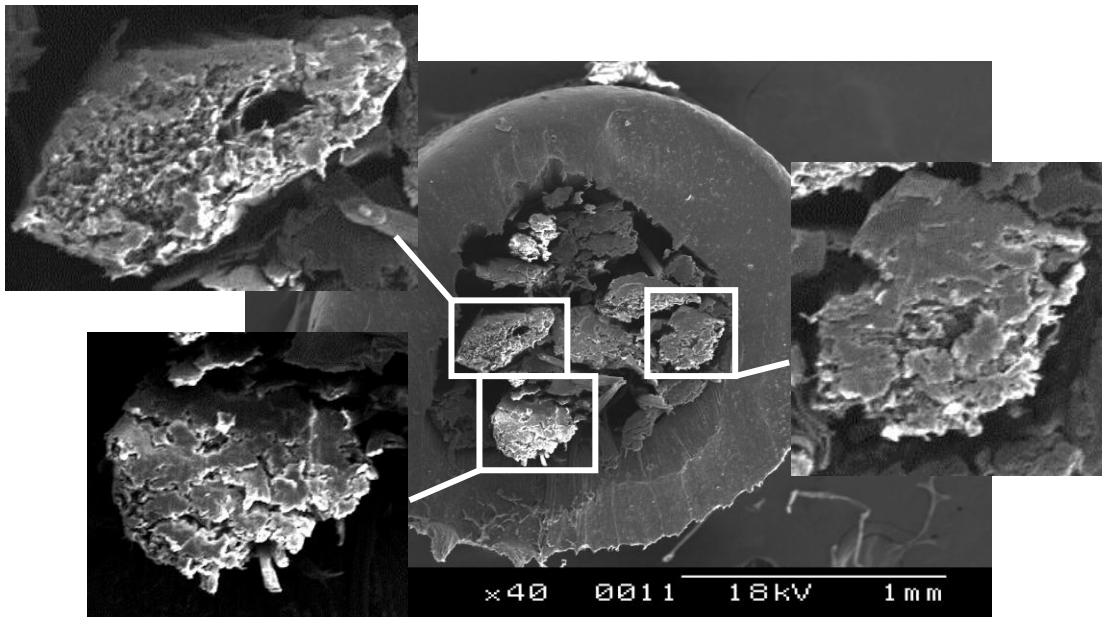


Figure 37. Micrographie électronique d'une coupe transversale d'un ensemble de fibres techniques

Le diamètre moyen apparent représente la moyenne des diamètres obtenus quand la fibre prend toutes les orientations possibles. Ce diamètre devrait être compris entre les valeurs des diamètres obtenues pour les deux axes de la fibre et devrait se trouver proche de la moyenne des deux diamètres, Tableau 32.

Tableau 32. Diamètres moyens apparents des différentes fibres

	Fibres BPS-1N	Fibres BPD-0,1N	Fibres B-1N	Fibres B-0,1N
Moyenne des diamètres (μm)	117 ± 60	189 ± 100	181 ± 90	156 ± 45

Pour les fibres traitées à forte concentration en soude, telle que BPS-1N et BPD-0,1N on a une réduction marquée des diamètres des fibres. Les rapports du grand axe sur le petit axe peuvent être classés en deux groupes : les fibres extraites avec préhydrolyse, présentant un rapport moyen très supérieur à celui des fibres de bagasse traitées à différentes concentration de soude (sans préhydrolyse), présenté Tableau 33.

Tableau 33. Moyennes des résultats expérimentaux des mesures de diamètres inter fibre

Moyennes	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Petit axe a (mm)	0,07 ± 0,05	0,15 ± 0,08	0,09 ± 0,05	0,11 ± 0,06
Grand axe b (mm)	0,16 ± 0,07	0,23 ± 0,12	0,27 ± 0,13	0,20 ± 0,11
Rapport b/a (mm)	2,81	2,83	1,83	1,88
Ecart-type (mm)	1,21	2,00	0,84	0,52
CV%	43,03	70,51	45,78	27,82
LPE% (95%)	19,65	25,49	19,29	9,48

Les fibres d'un même lot présentent une grande disparité de diamètre. Les coefficients de variation très élevés varient de 27 à 70%, avec une limite pratique d'erreur entre 9 et 26%. La grande hétérogénéité provient de la bagasse broyée en industrie.

Comparé à d'autres fibres végétales (Ho Thi, 2008), les fibres de bagasse sont proches des fibres de chanvre, dont la section transversale est quasi-elliptique, avec un petit axe moyen de 0,07 mm et un grand axe moyen de 0,2 mm. Par contre, le diamètre moyen de fibre de coco, (fibres presque rondes) est supérieur au diamètre équivalent de fibres de bagasse extraites: 0,28 mm contre 0,117-0,181 mm pour les fibres de bagasse (Tableau 32).

3. Etude expérimentale de la finesse des fibres de bagasse

Les fibres ont été extraites chimiquement suivant le protocole expérimental établi précédemment : quatre types de fibres BPS-1N, BPD-0,1N, B-1N et B-0,1N ont été produites. Chaque échantillon est formé de cent fibres prélevées aléatoirement parmi les cinq répliques de chaque type de fibre. Les fibres produites à l'échelle laboratoire serviront aux différents tests de caractérisation.

3.1. Détermination de la finesse des fibres par le titre

A partir des pesés et des longueurs de fibres mesurées, le titre (autrement appelé la densité linéaire) est calculé avec les résultats présentés dans le Tableau 34. Les valeurs moyennes sont présentées, encadrées du titre minimum et maximum obtenue.

Tableau 34. Mesure des titres de chaque type de fibres extraites

Fibres extraites	BPS-1N fibres	BPD-0,1N fibres	B-1N fibres	B-0,1N fibres
Titre moyen (tex)	5 < 32 < 94	4 < 39 < 144	9 < 35 < 131	12 < 49 < 142
Ecart-type	24	28	21	32
CV%	74	71	60,5	66
LPE% (95%)	15	19	17	19

Les titres moyens pour chaque type de fibres contrôlées sont très supérieurs aux valeurs fréquemment rencontrées pour les autres fibres naturelles conventionnelles, comme les fibres de coton, de lin, les fibres dures (sisal, agave ou alfa).

La valeur élevée du coefficient de variation pour les quatre types de fibres, révèle une fois de plus le caractère très hétérogène de la matière (qui subsiste, même après traitements). Cette forte dispersion est due à l'hétérogénéité initiale de la bagasse résultant des différentes actions mécaniques de broyage sur les tronçons de canne. Cette réduction non-contrôlée des fibres se retrouve, par conséquent à plus faible échelle : dans les fibres traitées.

Les fibres alors composées de faisceaux de fibres ultimes présentent des variations de sections irrégulières accentuant cette disparité. La limite pratique d'erreur est très élevée, ce qui est propre aux fibres naturelles non-conventionnelles. Le travail statistique avec de telles fibres requiert un nombre de mesures très élevé.

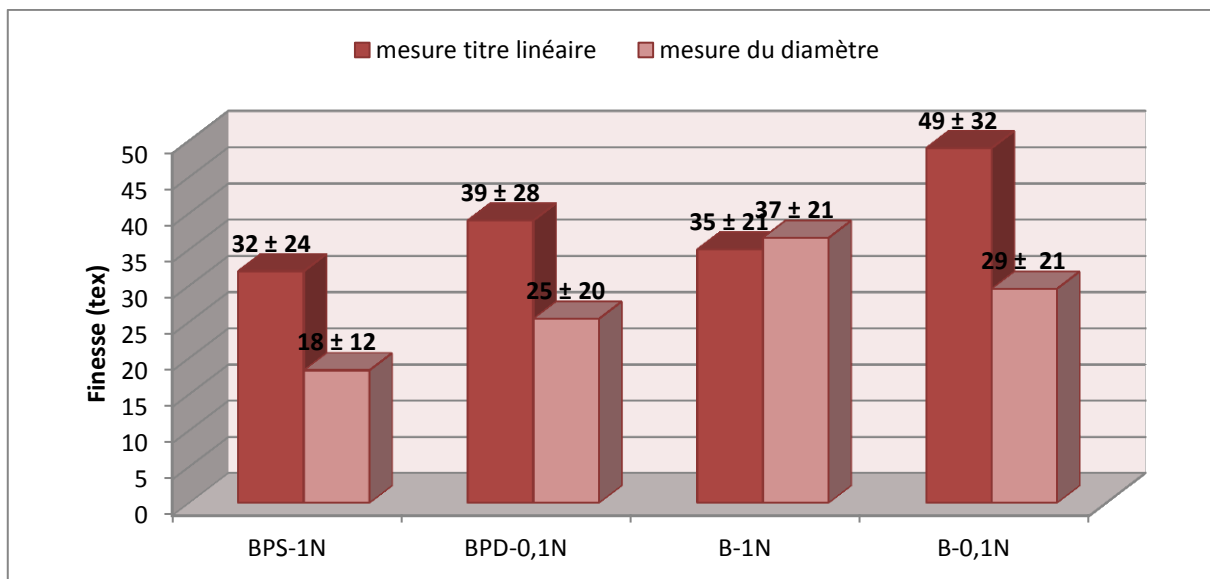
3.2. Détermination de la finesse par mesure de diamètres

A partir des travaux de Chiparus (Chiparus, 2003) et de l'équation 5, vérifions si les valeurs de titre mesurées par la masse linéique se rapprochent de celles calculées par l'aire en section droite des fibres, présenté Tableau 35.

Tableau 35. Mesure de la finesse de fibre de bagasse selon Chiparus

	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Petit axe a (μm)	70 \pm 50	150 \pm 80	90 \pm 50	110 \pm 60
Grand axe b (μm)	160 \pm 70	230 \pm 120	270 \pm 130	200 \pm 110
Aire (μm^2)	8 796	27 096	19 085	17 279
Finesse (tex)	18	25	37	29
Ecart-type (tex)	12	20	21	21
CV%	64	79	58	70
LPE% (95%)	29	29	27	24

Les valeurs moyennes de finesse calculées sont assez éloignées de celles obtenues par la mesure de la masse linéique, comme on peut le voir sur le graphique Figure 38. Toutefois les écart-types se recoupant, et compte tenu de la grande hétérogénéité des fibres de bagasse, l'analyse de ces deux méthodes ne permet pas de privilégier une méthode par rapport à l'autre.

**Figure 38. Comparaison des titres obtenus suivant les deux méthodes**

Il est assez difficile de mesurer avec précision les diamètres en section droite ou l'aire de fibres naturelles, à cause de leur irrégularité de section tout le long de la fibre et de leur porosité. Par conséquent, dans la suite sont utilisées comme titre en tex, les valeurs obtenues par mesure de la masse linéique.

III. Etude des propriétés mécaniques des fibres extraites

1. Etude de la rigidité à la flexion des fibres sur KAWABATA KES FB2 SH

La mesure du paramètre de rigidité permet d'étudier dans un premier temps la flexibilité des fibres extraites, puis dans un second temps la reproductibilité de ce paramètre fortement lié à la structure des fibres extraites.

1.1. Taux de mesurabilité du paramètre de flexion

Le paramètre « taux de mesurabilité » se définit comme le nombre de fibres testées dont les résultats sont exploitables, sur la base des profils obtenus. En effet, à partir des différentes fibres testées, un certain nombre de profils inexploitable s'est retrouvé plusieurs fois pour chaque type de fibres. Le taux de mesurabilité s'exprime en fonction du nombre de mesures validées, rapporté au nombre de mesure total.

La Figure 39 permet de comparer deux profils de courbure de fibre: régulier et irrégulier, ce dernier correspondant aux essais rejetés. Les courbes dont le profil de flexion diffère du diagramme type (à gauche) sont déclassées et considérées comme profils inexploitable.

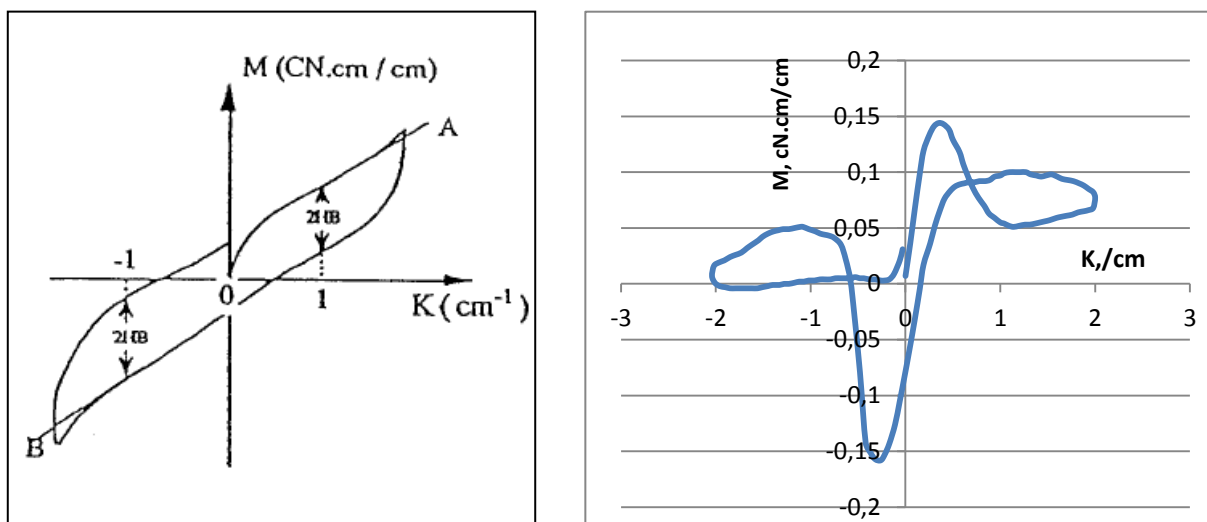


Figure 39. Schéma de diagramme type de flexion (gauche), diagramme de flexion de fibre B-1N déclassée (à droite)

Pour chaque extraction, cinquante fibres ont été aléatoirement sélectionnées. Elles ont été pesées puis mesurées individuellement. De chaque échantillon, seules les fibres de 40 mm de longueur minimale (distance entre pince ajoutée de 5 mm) ont été testées. Le nombre de fibres testées dont les profils sont validés est répertorié dans le Tableau 36.

Tableau 36. Echantillon numérique des fibres testées selon leur type

Type de fibre	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Nombre de fibres testées sur KES	34	31	31	27
Taux de mesurabilité	14,7 %	35,5 %	29 %	-

Sur la totalité des fibres testées, on constate que plus de la moitié ne donne pas de résultats exploitables sur le module Kawabata. L'absence de mesure pour les fibres B-0,1N laisse à penser de l'influence de la finesse des fibres par rapport à la sensibilité du module (variant de 0,08 ; 0,2 ; 0,4 et 1 gf.cm). Aucune des fibres prélevées de ce lot, n'a donné de résultats exploitables pour les flexions en cycle complet.

Deux éléments sont à prendre en considération pour les essais de caractérisation en flexion sur Kawabata : la finesse des fibres limitée par la sensibilité du module. Etant trouvé que la finesse des fibres dépend du traitement (essentiellement, de la concentration en soude), on s'attend à ce que les fibres les plus souples soient celles donnant le plus de résultats lors des essais en flexion. Pourtant, avec un taux de mesurabilité de 14,7% pour les fibres BPS-1N, on comprend que leur réduction en section accentue les défauts structurels révélés sur certains profils.

Ainsi, on s'attend à ce que les fibres extraites à plus faible concentration en soude soient moins fines avec des valeurs de rigidité à la flexion supérieures aux autres et moins sensibles aux variations structurales.

Il en est ainsi des fibres BPD-0,1N de titre moyen 30 ± 13 tex, qui présentent le taux de mesurabilité le plus élevé des quatre : de 35,5%. Plus de fibres peuvent donc être testées sans que les défauts de structure ne soient relevés par le module.

1.2. Expression des résultats expérimentaux

Les résultats des essais de flexion sur les quatre types de fibres sont reportés Tableau 37.

Tableau 37. Résultats expérimentaux des essais de flexion sur chaque type de fibres

Fibres	Titre moyen (tex)	B (mN.mm ² /tex ²)	H (mN.mm/tex ²)	w%
BPS-1N	23,6 ± 7,7	0,04 ± 0,04	0,011 ± 0,006	24,73 ± 19
BPD-0,1N	30 ± 13,6	0,174 ± 0,11	0,023 ± 0,01	42 ± 16
B-1N	34,5 ± 8,3	0,113 ± 0,11	0,014 ± 0,014	38,2 ± 14
B-0,1N	38,2 ± 23,9	-	-	-

Les résultats expriment la rigidité à la flexion comme dépendante du traitement d'extraction employé pour les fibres. Le traitement à faible concentration (BPD-0,1N) s'avère être moins efficace dans l'extraction de la lignine. En effet, les fibres les plus souples sont celles traitées à forte concentration : BPS-1N et B-1N, dû à l'efficacité d'extraction de la lignine.

Les diagrammes de flexion obtenus sur les fibres contrôlées et acceptées présentent des allures similaires à celle présentée Figure 40.

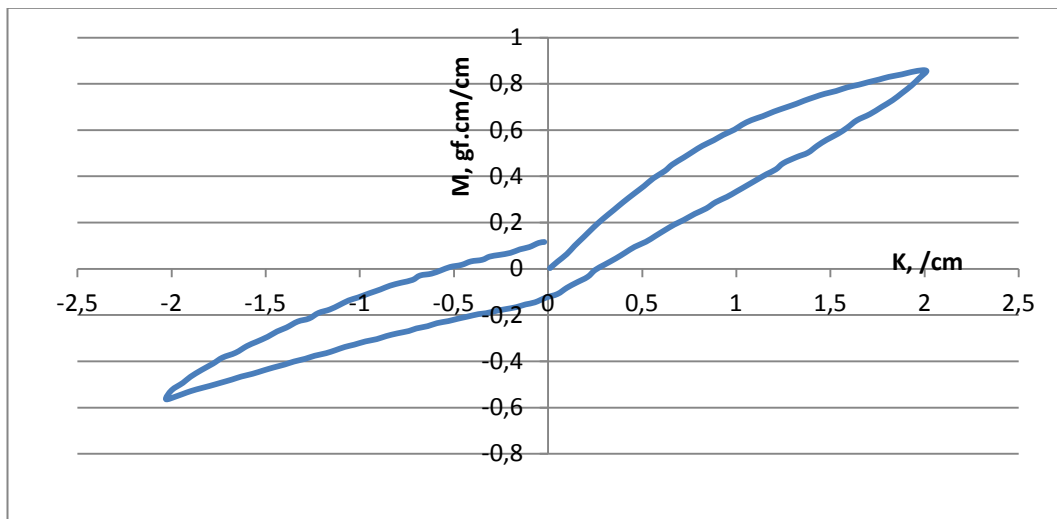


Figure 40. Diagramme de flexion d'une fibre BPD-0,1N

L'examen de ce diagramme décrivant une large hystérésis, révèle que les fibres sont arrivées rapidement dans un domaine de déformation permanent.

Aussi, la non-symétrie de ce diagramme témoigne que les fibres sont de faible capacité élastique, ce qui peut en pratique donner un matériau final de faible résistance, pour des sollicitations répétées en flexion.

En établissant un comparatif avec d'autres fibres testées en flexion sur Kawabata, on obtient le Tableau 38.

La vue générale des résultats montre que les fibres de bagasse ont une faible récupération élastique, avec une concentration en soude qui affecte la récupération élastique des fibres, comme pour leur rigidité en flexion.

Tableau 38. Comparaison du comportement à la flexion des fibres de bagasse avec d'autres fibres

Fibres	B mN.mm²/tex²	H mN.mm/tex²	w%
Bagasse type BPS-1N	0,04	0,011	24,7
Bagasse type B-1N	0,113	0,014	38,2
Agave Americana L. (Msahli, 2002)	0,152	0,026	37,2
Polyamide 6,6 (Collier et al., 1991)	0,169	0,00093	64,4
Polypropylene (Collier et al., 1991)	0,454	0,0189	70,3
Coton (Meredith, 1969)	0,53		
Laine (Meredith, 1969)	0,24		

Ces fibres de bagasse sont plus flexibles que des fibres conventionnelles comme les fibres de coton et les fibres de laine, avec une précision nécessaire sur les conditions de traitement. Cela dit, les valeurs d'hystérésis sont plus importantes pour les fibres de bagasse, comparée à celle de polyamide 6,6, probablement dû à leur caractère faiblement élastique.

Cette propriété (faible capacité élastique) pourra être vérifiée lors des essais en traction. Toutefois, il est nécessaire de considérer les valeurs de rigidité à la flexion avec précautions, en tenant compte du titre moyen des fibres, qui est relativement élevé, comparé au titre moyen d'une fibre de coton.

1.3. Analyse des profils singuliers de flexions de fibres de bagasse extraites

Au cours des différents essais de flexion, de nombreuses fibres ont présentés des profils inexploitable qui se sont répétés, indépendamment des conditions d'extraction. L'analyse de ces profils pourrait apporter une lumière sur le comportement inter-fibres sous l'effet de la courbure de flexion. On peut les regrouper en deux classes de profils particuliers, dont la fréquence pour chaque type de fibre est donnée Tableau 39.

Tableau 39. Répartition des profils singuliers de flexion pour chaque type de fibre

Type de fibre	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Nombre de fibres testées	34	31	31	27
Présentant un profil singulier	32%	41%	16%	-
Profil A /Nombre de fibres testées	23%	3%	10%	-
Profil B /Nombre total fibres testés	3%	19%	6%	-

Les fibres BPD-0,1N extraites à faible concentration en soude ont le plus fort taux de profils particuliers. La Figure 41 est le profil A des fibres qui lors de la courbure ont présenté des rotations autour de différents points de pliure. Ces résultats révèlent la présence de point de faiblesse dans la fibre technique, et ce indépendamment du traitement chimique appliqué.

Toutefois, ce profil est d'avantages présent pour les fibres extraites à forte concentration en soude (23% pour BPS-1N, suivie de 10% pour B-1N).

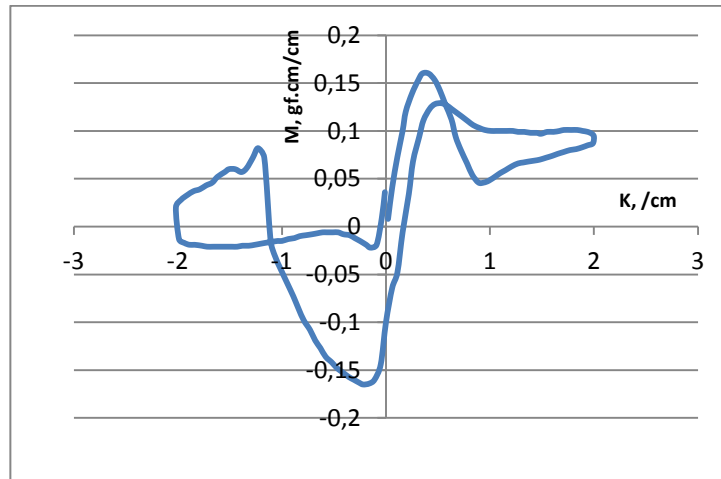


Figure 41. Diagramme de flexion déclassé type : profil A

Le profil Figure 42 a été repéré lors de l'essai pour les fibres présentant un étranglement dans leur structure. Lors de l'essai, la fibre qui suit une courbure dans le plan initial x, du au coude, se courbe en + y, et continue sa rotation dans le plan (x ; z) avec maintien de la courbure jusqu'à retour de la position initiale.

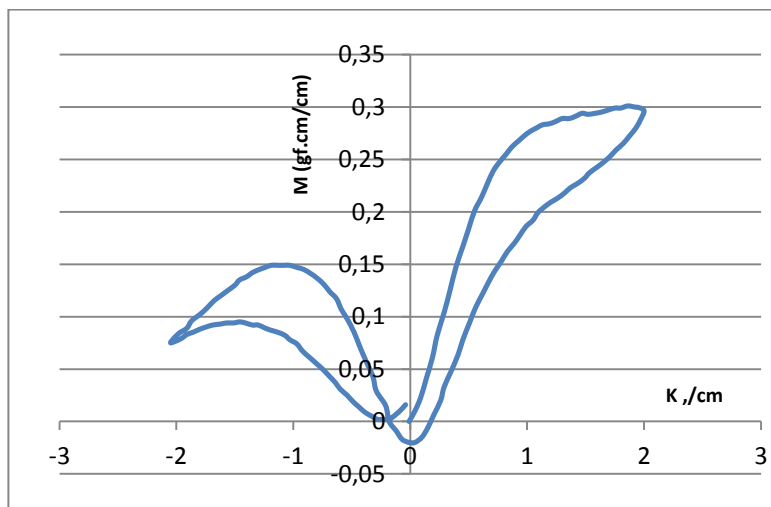


Figure 42. Diagramme de flexion déclassé type : profil B

Ce comportement de fibre est le plus présent pour les fibres de type BPD-0,1N (19%), par rapport aux fibres BPS-1N ou B-1N de représentativité inférieure à 10%.

L'analyse MEB a permis d'observer la disposition des fibres élémentaires à l'origine de tels profils, Figure 43.



Figure 43. Micrographie électronique d'une fibre présentant un coude dans sa structure

Ces comportements à la flexion sur module Kawabata restent tout de même inexplicables, surtout pour les profils A. Ce genre d'étranglement est présent à des endroits non spécifiques (aléatoires) et est probablement une conséquence du passage dans la sucrerie (passage de la canne dans les moulins). Il a paru nécessaire de relever ce genre de comportement car observé à une fréquence non négligeable.

Certainement qu'un nombre plus important de mesures pourraient conforter les tendances observées lors de cette étude. En vue de s'affranchir de ces comportements particuliers, il conviendrait de mettre au point une méthode de sélection des fibres, qui tiendrait compte des irrégularités de structure, des classes de longueurs spécifiques, et qui s'adapterait aux variations de titre.

2. Comportement mécanique des fibres en traction

L'essai de traction met en avant le réarrangement fibrillaire sous l'augmentation de la contrainte, jusqu'à la rupture des chaînes macromoléculaires des fibres élémentaires présentes dans les fibres techniques. Cette partie permet de voir la dépendance des paramètres comportement en traction, conditions d'extraction et finesse des fibres. Dans un

second temps, ces essais de traction permettent de vérifier si les irrégularités de section le long de la fibre technique sont favorables à une accumulation de contrainte.

Pour chaque lot de fibres BPS-1N, BPD-0,1N, B-1N et B-0,1N, cinquante fibres ont été prélevées aléatoirement, préparées et conditionnées pour les essais de traction. Chaque fibre technique a été contrôlée individuellement en traction simple avec un capteur de force de 100N. Afin de s'affranchir de la section et des longueurs initiales fixées, les résultats et courbes obtenues sont exprimés en force spécifique (cN/tex) en fonction de la déformation (%).

2.1. Expression des résultats expérimentaux

Parmi le lot de fibres testées en traction, 25 fibres (de titre variable) ont été sélectionnées pour une longueur initiale d'essai fixe de 25 mm. La moyenne des résultats expérimentaux sont reportés au Tableau 40.

Tableau 40. Résultats expérimentaux des essais de traction sur fibre individuelle

	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Charge rupture (N)	3,0	4,8	3,1	10,5
Allongement (mm)	0,5	1,0	1,1	0,8
Force spécifique (cN/tex)	7,5	13,9	11,0	21,9
Ecart-type	4,4	3,8	6,3	11,7
CV%	58	27	57	53
LPE % (95%)	22	12	25	27
Déformation (%)	2,0	3,9	4,2	3,2
Ecart-type	1,3	1,8	4,3	1,1
CV%	66	46	101	33
LPE % (95%)	26	19	45	17
W (mJ)	1,2 ± 2,1	2,9 ± 4,2	2,2 ± 3,4	4,7 ± 4,4

Les fibres BPS-1N présentent la plus faible force spécifique, ainsi que la plus faible déformation en traction. Confronté à la valeur de force spécifique des fibres B-0,1N,

indépendamment de la finesse des fibres, ces dernières seraient les plus résistantes pour des sollicitations en traction. Cela dit, les valeurs restent relativement proches, ce qui ne permet pas dans l'absolu d'affirmer que la résistance en traction des fibres est directement liée aux conditions d'extraction.

Si les différentes extractions permettaient d'atteindre les fibres ultimes, on aurait comme choix préférentiel l'extraction de type B-0,1N, en raison de la résistance à la traction et de la capacité de déformation élevée (3,24%). Cela dit, à faible concentration, il est très difficile d'obtenir des fibres cellulosiques à faible taux de lignine résiduel. Ceci a été précédemment confirmé avec les résultats du dosage de lignine et les changements en spectroscopie infrarouge mais aussi par les différents clichés MEB.

Aussi, la grande dispersion des résultats ne permet pas de conclure sur l'efficacité d'un traitement en l'état. Il est en effet nécessaire de considérer les changements de structure révélés via analyse MEB. Avant d'aborder l'analyse des faciès de rupture, l'étude du comportement des fibres à la traction, permet d'aborder les changements de structure des fibres face aux traitements d'extraction.

2.2. Etude du comportement à la traction des fibres extraites

La résistance mécanique des fibres techniques testées dépend des propriétés des fibres élémentaires qu'elle contient, et aussi de l'efficacité du traitement (taux de matière non cellulosique résiduel). Le comportement à la traction des différentes fibres extraites, est étudié à partir de diagrammes charge-allongement obtenus lors des essais dynamométriques. Les courbes sont exprimées en cN/tex pour la force spécifique et en % pour la déformation par rapport à la longueur initiale d'essai.

A partir des courbes force spécifique-déformation, deux types de profils ont été observés. La Figure 44 présente le comportement en traction observé pour les quatre types de fibres, alors que la Figure 45, n'a été observé que pour une faible quantité de fibres issues de l'extraction BPS-1N.

A partir des courbes expérimentales Figure 44, on distingue deux zones caractéristiques détaillées ci-après.

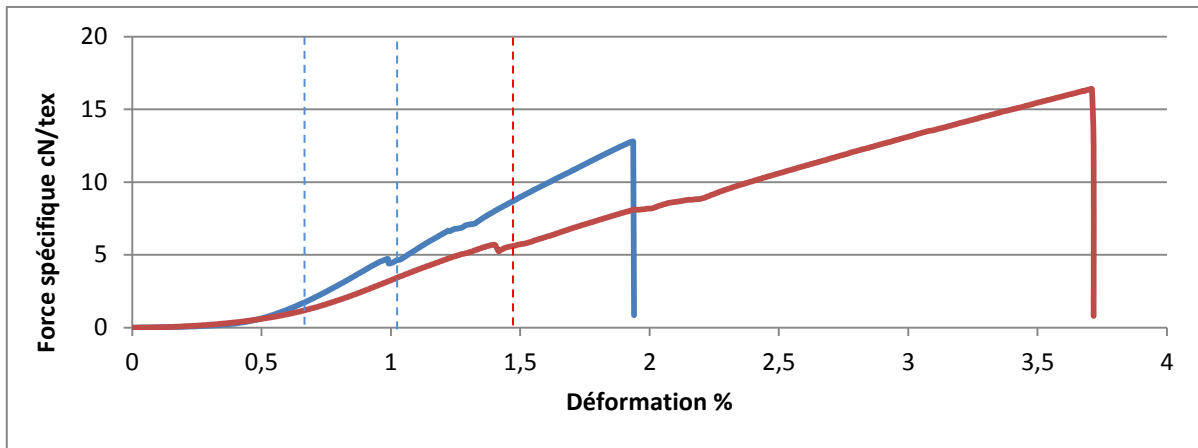


Figure 44. Comportement en traction de fibres techniques

De 0 à 0,5% de déformation, la courbe décrit la mise sous tension de l'échantillon, et n'est donc pas considérée comme faisant partie de comportement en traction des fibres, mais plutôt de l'alignement de la fibre dans l'axe de déplacement de la traverse.

La zone I est la zone élastique linéaire, dans laquelle la contrainte est proportionnelle à la déformation liée par la loi de Hooke. L'arrêt de la contrainte se traduit par une récupération totale, en dépit de l'allongement.

La zone II est une zone quasi linéaire, de pente plus faible, qui commence à la première déflexion. Dans cette zone, on a un réarrangement et allongement des fibres élémentaires pendant l'élongation suivant l'axe de traction. Ce réarrangement ne permet pas la récupération totale et instantanée lors de la suppression de la contrainte.

La déformation à la rupture prise en compte est considérée comme la déformation correspondant à l'effort maximum. A ce point culminant on a rupture, qui s'opère par paquets de fibres (les faciès de rupture Figure 46 à 49 permettent d'apprécier l'aspect de la fibre technique).

Le deuxième comportement en traction observé, illustré Figure 45, présente deux zones caractéristiques.

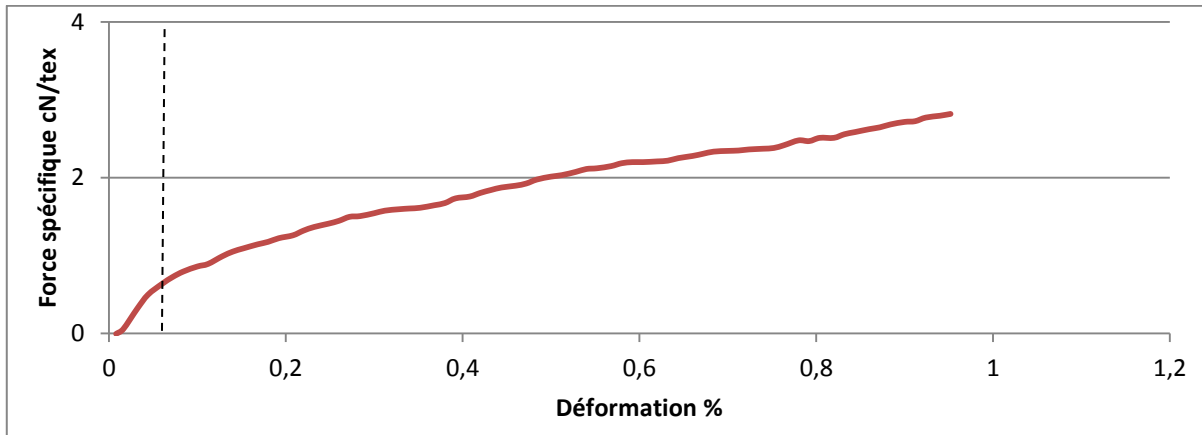


Figure 45. Comportement en traction d'une fibre technique de type BPS-1N

La zone I est la zone élastique linéaire, dans laquelle la contrainte est proportionnelle à la déformation liée par la loi de Hooke. L'arrêt de la contrainte se traduit par une récupération totale, en dépit de l'allongement.

La zone II, après le premier point d'inflexion, présente une quasi-linéarité entre déformation et force spécifique. Plusieurs petites déflexions observables lors de l'augmentation de la charge, correspondent certainement aux ruptures successives des ciments pectiques à l'interface des fibres élémentaires de la fibre technique (Romhany *et al.*, 2003).

La faible pente de la courbe est liée à l'orientation des fibres élémentaires dans la fibre technique. Durant l'essai, les fibres élémentaires subissent une réorientation dans le sens du chargement. Aussi, certaines fibres ou fibrilles, non retenues entre les mors du dynamomètre, se détache de l'ensemble lors du chargement, pouvant provoquer ainsi des déflexions détectables sur les courbes.

La rupture finale génère des séparations ductiles de fibres élémentaires, et non pas par paquets de fibres, comme on peut le voir sur le faciès de rupture Figure 46 à 49.

Conclusion

Le traitement alcalin BPS-1N (à la soude concentrée) modifie les particules de bagasse, en donnant des fibres de résistance à la traction relativement faible, comparé à d'autres fibres naturelles non conventionnelles. Des essais de tractions, il ressort que dans ces conditions, on distingue deux comportements à la traction, provenant probablement du type de fibre. En effet, la matière initiale bagasse étant un mélange d'écorce, de moelle et de fibre, de différente teneur en lignine. Il s'en suit lors de l'extraction, des fibres de l'écorce avec un taux de lignine résiduelle probablement plus élevé que les autres parties. Une analyse comparative avec une extraction ciblée, permettrait d'associer les résultats obtenus ici, selon la partie de la canne

finaleme nt traitée. Autrement dit, certaines fibres extraites à partir de la bagasse, provienne nt de l'écorce (partie de la canne la plus riche en lignine).

Aussi, certaines fibres présentent un allongement relativement important, dû à l'orientation des fibres. Un tel comportement reste toutefois peu visible parmi les fibres extraites à faible concentration en soude.

Comme illustration de ces différentes observations, la partie suivante analyse les micrographies des faciès de rupture, sources de renseignements sur le comportement des fibres à la rupture.

2.3. Analyse des faciès de rupture

L'analyse des faciès de rupture, présentée Figure 46 à 49 est effectuée à partir des images MEB des fibres après rupture au test de traction dynamométrique. Les différents faciès de rupture sont liés aux traitements chimiques appliqués aux particules de bagasse.

Ici sont visibles en Figure 46, les fibres élémentaires qui composent la fibre technique, après rupture. Certaines fibres élémentaires ont des extrémités plus longues que d'autres, ce qui appuie l'hypothèse de ruptures successives de certaines fibres élémentaires. Aussi, la surface des fibres élémentaires fines est lisse.

La rupture des fibres B-1N (Figure 47) s'effectue, par paquets de fibres ultimes encore liées entre elles. On peut aussi distinguer les fibres ultimes qui les composent, présentant de surfaces relativement lisses.

En Figure 48 les fibres ultimes sont peu visibles et non individualisées, malgré la contrainte appliquée lors de l'essai. Elles sont encore liées entre elles, avec quelques éléments incrustés sur toute la longueur des fibres (Collier et *al.*, 1992) ; de ceux qui maintiennent la cohésion intra fibrilles. Les ruptures successives de fibres ultimes ne peuvent donc pas avoir lieu, du au traitement trop faible.

Concernant les fibres traitées à faible concentration en soude, de type BPD-0,1N et B-0,1N, les faciès de rupture, Figures 48 et 49 montrent qu'il n'y a pas rupture successive des fibres ultimes, mais plutôt des ruptures de paquets de fibres (ou groupes) de la fibre technique.

Les deux types de faciès de rupture observés correspondent bien aux comportements des fibres à la traction reportés précédemment par les courbes force spécifique-déformation. Les phases de ruptures de paquets de fibres ultimes sont différentes des ruptures de fibres ultimes (une par une), facilement comparable entre BPS-1N et BPD-0,1N.

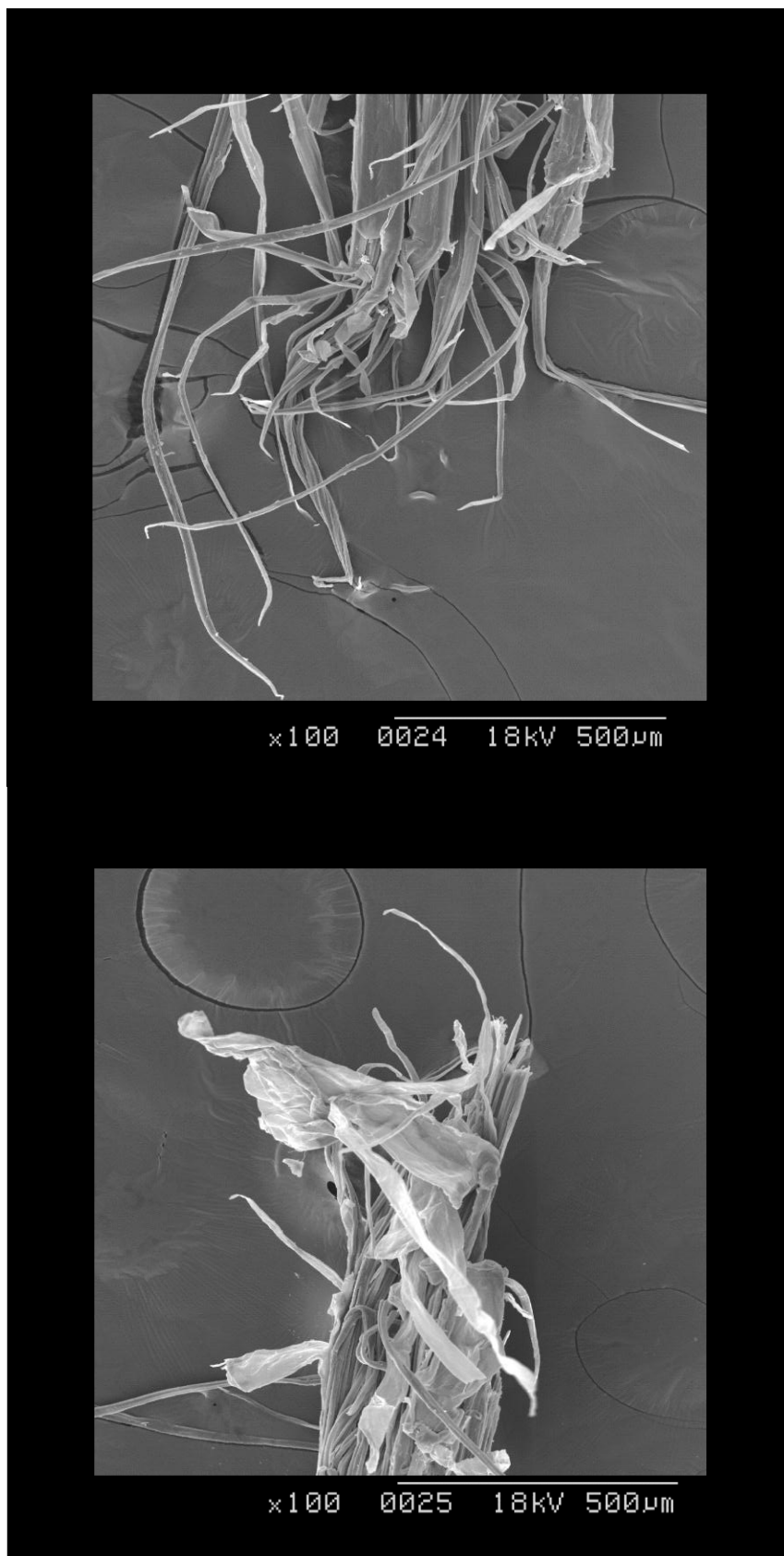


Figure 46. Micrographie électronique des faciès de rupture d'une fibre BPS-1N

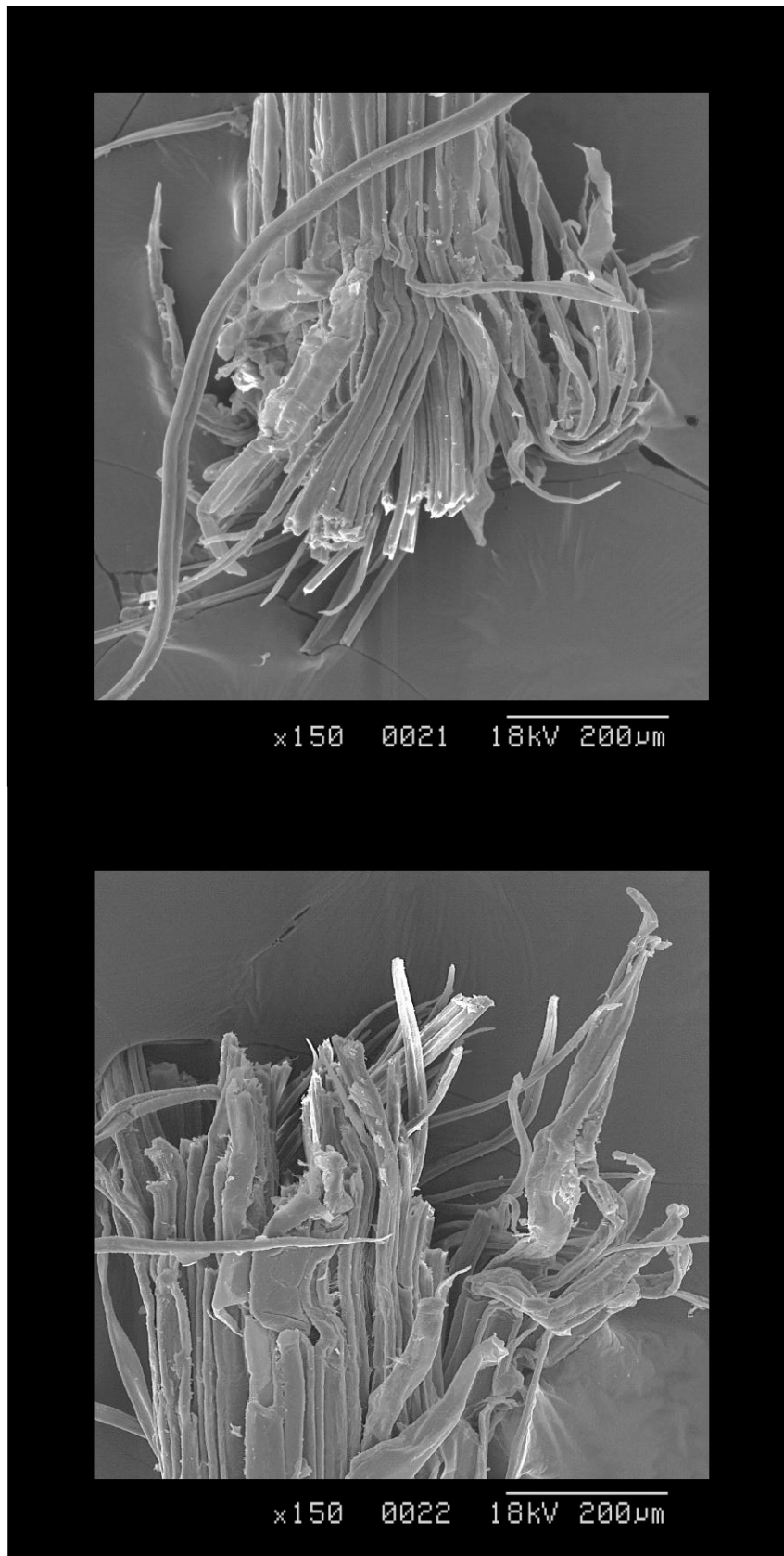


Figure 47. Micrographie électronique des faciès de rupture d'une fibre type B-1N

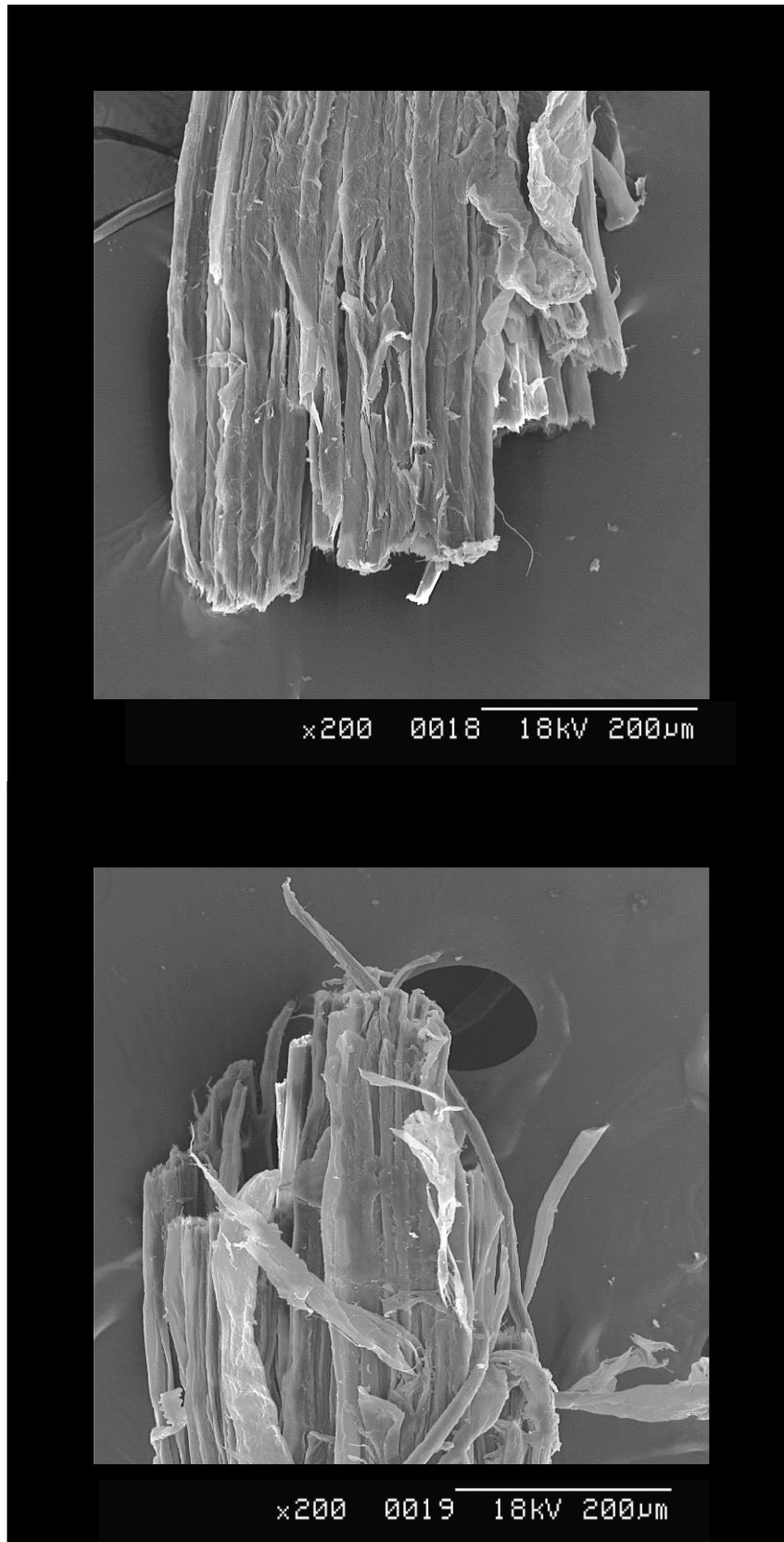


Figure 48. Micrographie électronique des faciès de rupture des fibres de type BPD-0,1N

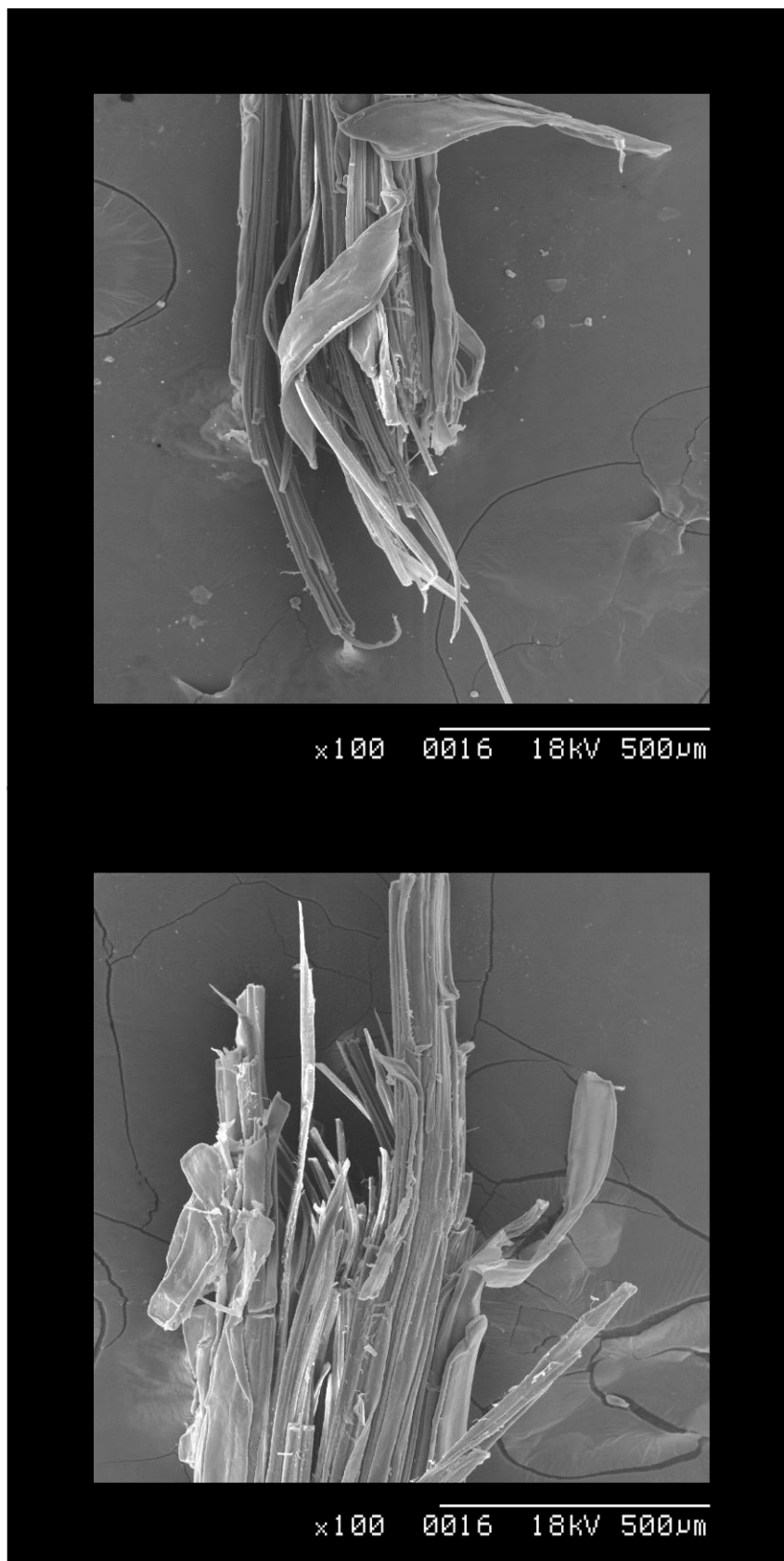


Figure 49. Micrographie électronique des faciès de rupture de fibres de type B-0,1N

Conclusion

Les différents traitements chimiques appliqués aux particules de bagasse affectent la structure interne de la fibre, due à l'extraction partielle de lignine, de pectines et d'hémicelluloses. La structure cristalline de la cellulose s'avère aussi modifiée, selon la concentration en soude utilisée. Bien que le degré de polymérisation de chaque type de fibres n'ait pas été analysé dans cette étude, il conviendrait dans des travaux futurs, d'établir via ce paramètre un facteur de sévérité du traitement alcalin.

L'effet de la soude sur les particules de bagasse donne des fibres relativement fines, mais qui en contrepartie perdent en résistance mécanique. Si le protocole d'extraction permettait d'atteindre des fibres ultimes, elles seraient plus souples (en termes de flexion KAWABATA) que les fibres d'un coton moyen, avec toujours un comportement élastique comparable aux autres fibres naturelles.

L'analyse des faciès de rupture concorde avec le comportement à la rupture des fibres. En ce qui concerne la rupture des paquets de fibres (élémentaires liées entre elles), elle correspond aux déflexions observées lors de l'augmentation de la charge (durant l'essai). Pour les fibres BPS-1N où on a le plus de fibres individualisées, la rupture s'opère par fibre élémentaire, ce qui n'est pas très visibles lors des essais de traction (Figure 46). Par ailleurs, la principale différence des faciès de rupture entre les fibres B-1N (Figure 47) et BPS-1N (Figure 46) réside en l'individualisation des fibres ultimes visibles chez ces dernières.

A partir de ces fibres produites, des essais de micro-filature ont été menés au CIRAD à Montpellier, avec les résultats présentés ci-après.

IV. Domaines d'application des fibres de canne à sucre

Les fibres obtenues présentent des propriétés physiques et mécaniques différentes selon les conditions d'extraction employées. Selon l'analyse des propriétés mécaniques, certaines fibres se prédestinent plus aisément au textile technique, à l'habillement, ou encore à l'isolation. Bien que les caractérisations spécifiques à chaque domaine d'application n'aient pas été poursuivies dans cette étude, nous faisons l'hypothèse d'utilisation de ces fibres dans cette partie.

1. Applications envisageables selon le type de fibres extraites

Sont pris en compte dans le classement des applications possibles des fibres, présenté Figure 50, les éléments suivants : longueur des fibres, titre (finesse), structure/ surface (présence d'éléments incrustés), résistance mécanique en traction et en flexion.

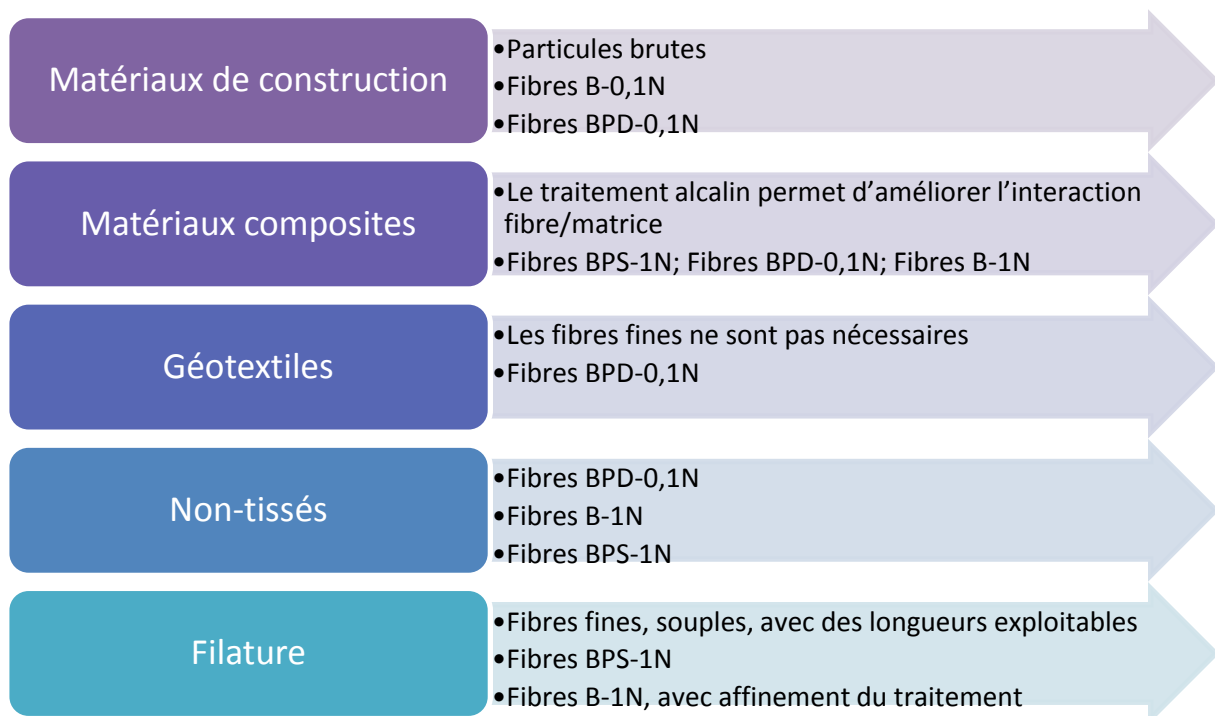


Figure 50. Domaines d'applications possibles des fibres extraites selon leur type

Il est nécessaire d'approfondir selon le domaine d'application choisi les analyses complémentaires à apporter sur la caractérisation des fibres correspondantes, et aussi à affiner le procédé d'extraction des fibres destinées à la filature.

2. Filature en mélange coton-bagasse

L'étape de filature consiste à élaborer un fil à partir des fibres techniques de bagasse. Le procédé de filature, issu du cycle coton cardé, se décrit en plusieurs étapes, de la matière filamenteuses irrégulières à l'obtention d'un fil organisé, régulier présentant une certaine résistance mécanique. Les différentes étapes d'obtention de fil sont données à la suite, dans l'ordre prédéfini, garantissant la qualité et les propriétés du produit final :

1. Ouvraison/ battage
2. Chargeuse/ peseuse
3. Cardage
4. Etirage
5. Banc à broches
6. Filage
7. Bobinage

A partir des fibres de bagasse obtenues, plusieurs étapes n'ont pu être retenues. Les fibres sélectionnées en entrée du procédé de filature, sont les fibres BPS-1N et B-1N. Les essais de filature ont été menés au laboratoire de technologie cotonnière du CIRAD de Montpellier sur une micro-filature classique type coton.

Le battage ou l'ouvraison, est l'étape qui consiste à ouvrir les différents lots de fibres, et de les homogénéiser, tout en les mélangeant. Lors de cette étape, les fibres sont aussi nettoyées et débarrassées de certaines poussières et autres.

Les fibres de bagasses ont été passées légèrement humides, dans une ouvreuse 2 cylindres (marque Graf France, type OSCT), ce qui a permis une seconde action d'individualisation. Ces deux cylindres, illustrés Figure 51, servent à l'alimentation pour l'un et pour l'autre, comme pour la cardé, à l'individualisation, démêlage, mélange et alignement des fibres. Toutefois, l'action mécanique exercée sur les fibres a ce désavantage de les fragiliser, surtout quand elles perdent en humidité. En effet, on constate que plus elles sont sèches, plus les fibres deviennent cassantes sous l'action mécanique.

Dans un second temps, afin d'apporter plus de cohésion entre les fibres de bagasse, celles-ci ont été mélangées à du coton standard 59 A MALI (à hauteur de 30%). En sortie de cette

étape, un voile coton-bagasse relativement homogène est obtenu, après doublage et plusieurs passages successifs à l'ouvreuse. Un premier passage permet d'obtenir un voile coton-bagasse, qui est ensuite replié une fois pour plus d'homogénéisation, avant d'être finalement plié quatre fois. On obtient un voile de 50 cm, avec des fibres disposées assez régulièrement, dans l'ensemble.

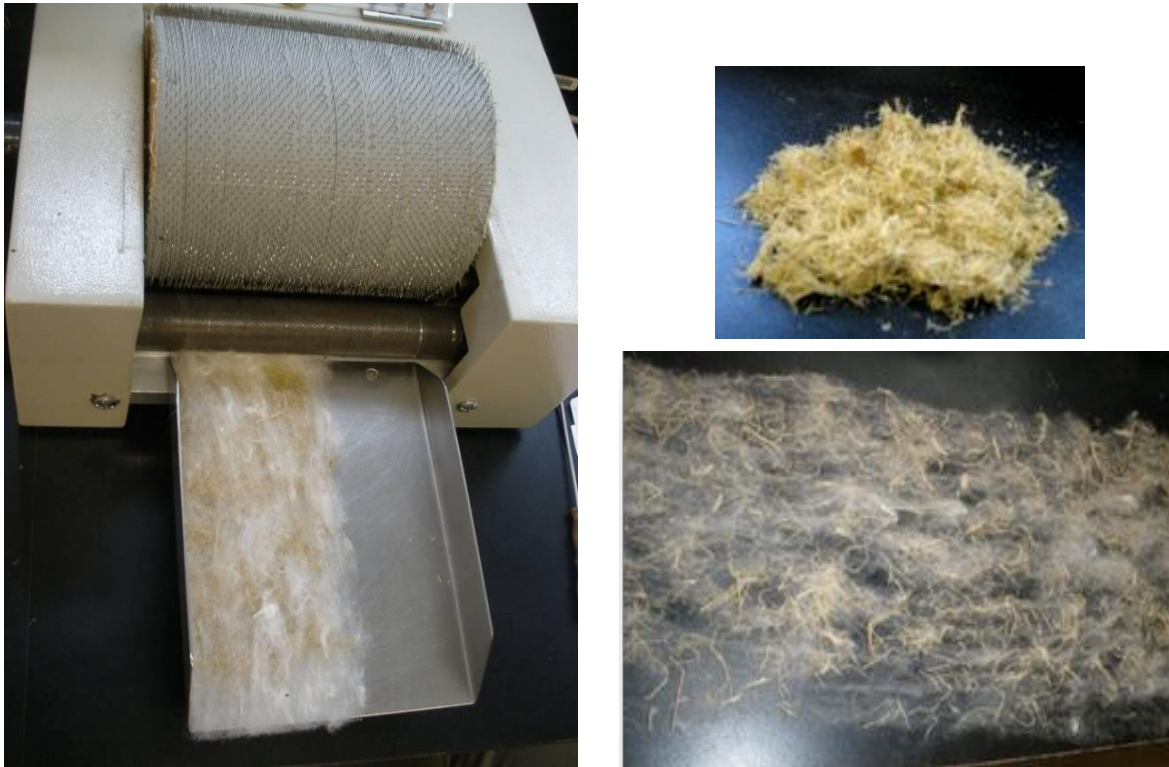


Figure 51. Ouvraison des fibres de bagasse en mélange coton (30%)

L'étape de cardage des fibres de bagasse a dû être abandonnée, car les fibres ne passaient pas entre les dents du grand tambour (et chapeaux). Cette étape est donc inadéquate pour les fibres de bagasse, même mélangées au coton.

Le voile coton-bagasse est alors passé sur un étirage de 10, qui donne un ruban de 5 mètres de 4400 tex, sur une machine Shirley (Shirley Miniature Spinning Plant). Cette étape assure la régularisation de la matière par doublage, homogénéise les mélanges de matières, en complétant l'individualisation et la parallélisation des fibres.

Un premier étirage de 1,50m, a induit le doublage par 6 de 0,25m. Le deuxième étirage, de 2,10m a donné un ruban de 1000 tex. La Figure 52, montre le ruban juste avant le passage au continu à filer, de 4000 tex de titre.



Figure 52. Passage au banc d'étirage: ruban coton-bagasse (30-70)

Le passage à la filature sur continu à filer, a été plein de difficultés majeures, dû au manque de cohésion inter-fibres bagasse-bagasse mais aussi bagasse-coton, comme l'illustre la Figure 53. Pour l'obtention d'un fil de 80 tex, à partir du ruban de 1000 tex, on a regroupement du ruban en quatre, avec emploi de pignons de 84 dents avec un étirage de 50.



Figure 53. Passage sur continu à lanières du mélange coton-bagasse, 80 tex

Lors du passage sur continu à lanières, le manque de cohésion inter-fibres provoque des ruptures successives du ruban, ce qui empêche la formation du corps du fil et ce, malgré la présence de fibres de coton.

3. Filature manuelle 100% fibres de bagasse écrud

Après les résultats peu concluants avec les fibres BPS-1N, lors de la filature sur continu à filer, une dernière tentative de filature a été faite : la filature manuelle, à partir de fibres BPD-0.1 N.

Les fibres ont été passées comme précédemment à l'ouvreuse, afin de récupérer un ruban qui, pour avoir le plus de cohésion possible, a été tourné à la main avec une torsion sens S. Dans un deuxième temps elles ont été retordues à l'aide d'un torsiomètre, sur lequel ont été fixés les deux extrémités du ruban pré-tordu (afin d'appliquer plus facilement une torsion, avec un même sens de rotation). Le fil ainsi obtenu, Figure 53, est relativement grossier: 812 tex, et présente des irrégularités de structure, tout le long.



Figure 54. Filage manuel d'un ruban de fibres type BPD-0.1N après cardage

Le fil ainsi fabriqué n'a pas été testé mécaniquement, car d'aspect il présentait une relative faible résistance mécanique.

En somme de cette expérimentation, il semble que la qualité du produit final soit encore très fortement aux conditions d'extraction des fibres de bagasse qui peuvent être amélioré dans de prochains travaux de recherche. Il ressort parallèlement de cette étude que les techniques

sommaires de filature en pur ne sont pas nécessairement adaptées aux autres fibres naturelles non conventionnelles.

Certains paramètres peuvent alors être revus, tant en amont qu'en aval du processus de fabrication. En amont des post-traitements, l'étape trop sévère de cardage des fibres peut être remplacée par un traitement chimique ou enzymatique, et en aval, l'étape de filature classique, remplacée par une filature au mouillé, par exemple.

CHAPITRE V
APPROCHE ENVIRONNEMENTALE :
ANALYSE DU CYCLE DE VIE

En préambule de ce chapitre, une brève présentation de l'analyse du cycle de vie et des normes correspondantes permettra d'organiser le plan. L'observation commence par la délimitation du système d'étude suivie d'un inventaire des données nécessaires à son élaboration. Cet inventaire est effectué depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la production de fibres de bagasse. Grâce à ces données, une évaluation d'impacts est établie, suivie de l'interprétation des résultats pour estimer l'impact de la production de fibres de bagasse sur l'environnement.

Le travail développé ici est une première approche environnementale qui permet de situer les différentes émissions tout au long du processus de transformation.

I. L'Analyse du Cycle de Vie : Généralités

L'analyse de cycle de vie (ACV) fournit un moyen efficace et systématique pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé.

1. Historique

Suite à la hausse des prix du pétrole (qui mena d'ailleurs au choc pétrolier de 1973), Coca-Cola prend des mesures proactives. C'est ainsi qu'en 1969 sort la première ACV. Ce type d'étude alors nommée « analyse des ressources et du profil environnemental (ARPE) » portait sur l'utilisation de l'énergie, qui à l'époque semblait plus importante que l'utilisation des matières premières ou que l'émission de polluants dans l'environnement. Dans les années 80, l'engouement auprès des ACV s'atténue pour des raisons techniques (absence de logiciels performants) tandis qu'une réelle vague d'intérêt se manifeste à nouveau vers la fin des années 80 et le début des années 90.

Les premières discussions sur la validité des comparaisons apparurent avec les premiers résultats d'études, poussant la communauté scientifique à entrer dans un processus de normalisation dans le domaine.

Aujourd'hui, il existe trois types d'Ecolabels Européens (I, II et III).

2. Les normes ISO

Toutes les études sur l'ACV devant être compréhensible par chacun, l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) s'est attachée à les homogénéiser afin de les rendre cohérentes et comparables, et a ainsi créé différentes normes, dont la norme ISO 14040 :2000 intitulée « Management environnemental- Analyse du cycle de vie- Evaluation de l'impact du cycle de vie ». Cette norme a été révisée depuis et remplacée par la norme ISO 14040 :2006 intitulée « Management environnemental- Analyse du cycle de vie –Principes et cadre ».

L'ISO a défini, en 1997, l'analyse du cycle de vie de la façon suivante :

« Compilation et évaluation des entrants et des sortants, ainsi que des impacts potentiels environnementaux d'un système de produits au cours de son cycle de vie. » (Organisation internationale de normalisation, 1997, p.2)

L'analyse du cycle de vie est donc un outil qui permet d'évaluer la charge environnementale totale d'un produit ou d'une activité. À chaque étape du cycle de vie, la consommation des ressources et la production de polluants seront prises en compte de manière analytique.

Pour réaliser l'ACV d'un produit, le travail s'effectue en quatre étapes distinctes mais interdépendantes avec tout au long de l'étude des retours nécessaires, rendant l'ACV itérative.

Ces étapes sont :

- la définition de l'objectif et du champ d'étude
- l'inventaire des données
- l'évaluation de l'impact du cycle de vie
- l'interprétation du cycle de vie

Différentes normes, présentées Annexe 4, sont ainsi mises en place pour l'élaboration de ces étapes.

II. Objectifs et champs d'étude

1. Objectif de l'étude

L'ACV de fibres de bagasse extraites est une analyse qui permet d'évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie de fibres de bagasse obtenue par traitement alcalin. Bien que la matière première soit d'origine végétale, l'analyse du cycle de vie de fibres obtenues par procédé viscosse ne sera pas abordée ici. Notre ACV portera sur des fibres extraites comme établi dans ce rapport (Cf. chapitre III). Cette analyse tient compte de la culture de la canne, de sa transformation en sucrerie et des différents traitements chimiques et mécaniques employés.

2. Délimitation des frontières du système

L'analyse s'effectue depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fabrication d'un filé de fibres de bagasse, en considérant les étapes l'une après l'autre (du berceau à la tombe).

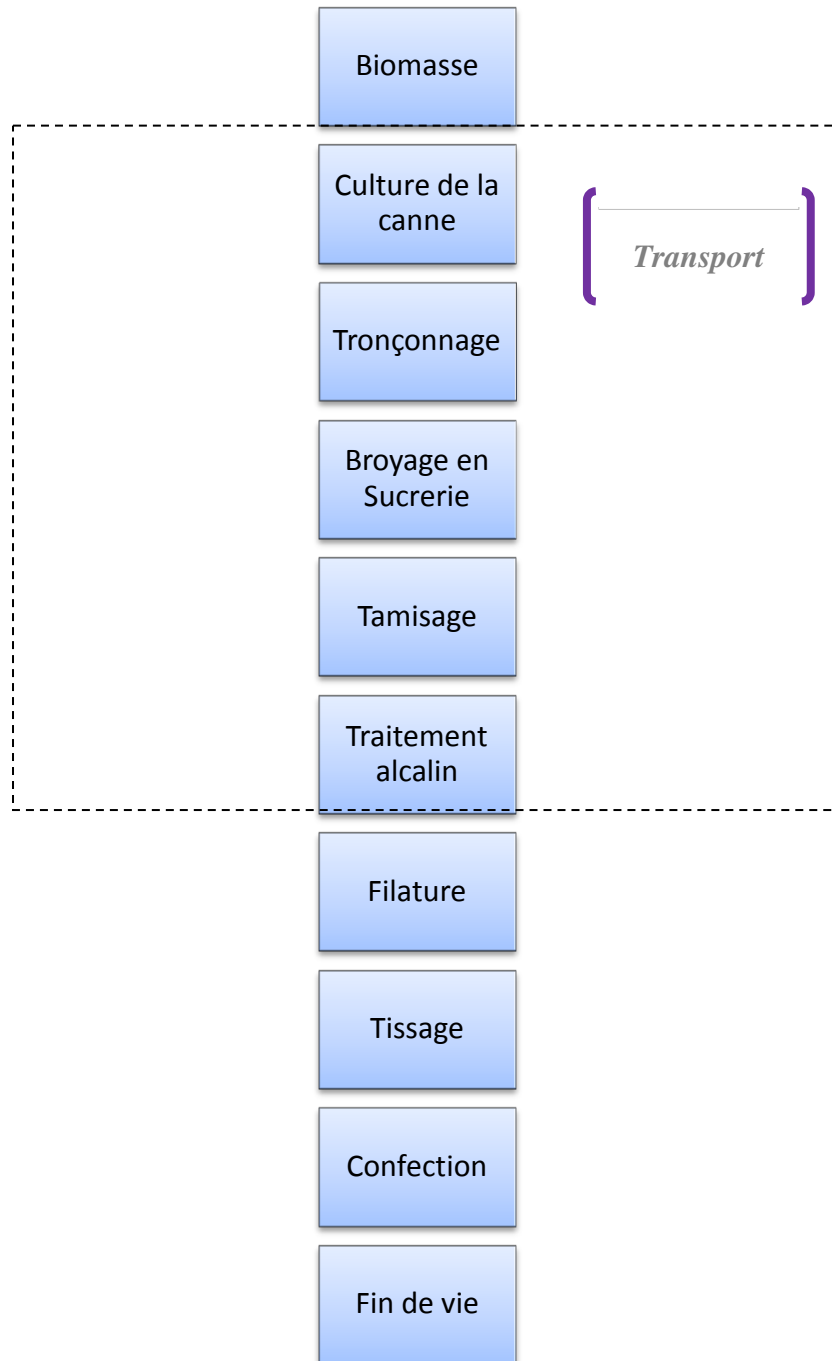
On initie l'étude dès la culture de la canne, mais sans intégrer l'approvisionnement en bouture. On considère les effets d'une transformation faite localement sur le site de la sucrerie pour toutes les étapes du cycle, même si, dans le cadre de nos travaux, l'extraction a été réalisée en métropole.

Les produits chimiques employés pour l'obtention de fibres sont intégrés dans l'acheminement en matière première, et seront abordés à titre informatif.

Le système pour les fibres de bagasse BPS-1N de canne comprend :

- la culture de la canne dans une zone géographique Martinique déterminée
- l'acheminement des cannes et matières premières jusqu'à la sucrerie du Galion
- la fabrication du sucre qui génère la bagasse : matière première de l'étude
- l'extraction des fibres de bagasse en laboratoire pour les fibres BPS-1N.

Le cycle de vie des fibres extraites à partir de la bagasse est présenté en Figure 54.



Légende :  Frontière du système

Figure 55. Présentation générale du cycle de vie pour les fibres de bagasse

3. Choix de la fonction et de l'unité fonctionnelle

On travaille sur filés de fibres 100% bagasse obtenue de la bagasse de sucrerie, prétraitée puis extraite à 1N en soude.

L'unité fonctionnelle est la masse en kg ; elle est la référence par laquelle on normalise les résultats.

Le flux de référence considéré dans cette étude est de 1 kg de fibres. Il correspond à la quantité de produits analysés et consommables utilisés pour atteindre l'unité fonctionnelle.

4. Catégories et qualités des données

La culture de la canne et la transformation en sucrerie sont localisées en Martinique. On considère que l'extraction type est réalisée en Martinique, sur le site de la sucrerie, ce qui nous affranchit d'un transport fictif à intégrer dans l'étude.

La qualité de la bagasse (hétérogénéité des particules, humidité en sortie...) est fonction des réglages de transformation dans la sucrerie. Aussi, les informations recueillies sont réelles et propres à l'usine du Galion. Elles sont ramenées en proportion à la production de bagasse, en considérant qu'une tonne de canne entrée génère 30% de bagasse. Les calculs sont effectués en conséquence, pour être exprimés en unité fonctionnelle.

5. Limites de l'interprétation des résultats

Les données de la culture de la canne, ont été recueillies auprès d'un planteur type. Elles sont exploitées comme base de référence des recherches. Les données de l'usine du Galion datent de la campagne 2010 ; pour ne pas détailler les différentes étapes en sucrerie, le système porte à porte sera considéré. Autrement dit, on considère la fabrication du sucre sans les sous-étapes.

Compte tenu de l'important travail et du temps nécessaire pour une étude complète, la recherche d'informations et la coordination des données ont été limitées, et le champ d'étude restreint. Cette étude est à approfondir avec des données chiffrées.

III. L'ACV de filé de fibres de bagasse écrus : Inventaire des données

L'inventaire des données n'est pas exhaustif, principalement du point de vue de la culture de la canne. Cette partie a pu être établie grâce à la généreuse participation de M. EUGENY, responsable de l'exploitation agricole du Galion, ainsi qu'à celle de M. ANDRE, Directeur général de la sucrerie SAEM Galion.

1. La production de matières premières

Les fibres proviennent de la bagasse issue de la culture de la canne à sucre. La canne à sucre se cultive dans un climat tropical, sans apport d'eau supplémentaire. En Martinique, douze variétés de canne sont cultivées, sur 14 mois (maximum), occupant une superficie de 3760 ha (soit 13,9% de la surface agricole utile). Sur les 204 912 tonnes produites par an, 40% sont destinés à la sucrerie (CTCS, 2013).

Six étapes sont nécessaires pour la production de canne à sucre :

- Préparation du sol
- Sélection des boutures
- Germination et levée
- Tallage
- Croissance
- Maturation
- Récolte en coupeuse automatique.

Une fois la récolte effectuée, les cannes coupées en tronçons sont acheminées dans la cour à canne ou l'aire de réception de la sucrerie. Les tronçons de canne sont réduits en particules de bagasse, après extraction du jus nécessaire à l'élaboration du sucre.

Ci-après sont détaillées les étapes de culture afin d'inventorier les données utiles à l'affectation aux impacts.

Application d'engrais

Les engrais minéraux utilisés sont principalement composés d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K), dans les proportions respectives 20/10/20 de NKP. L'apport aux sols est réalisé à l'aide de tracteurs épandeurs à raison de 400kg d'engrais pour 500 ha.

Lors de fortes pluies, ces engrais peuvent être lessivés vers les rivières, nécessitant alors un deuxième épandage par hélicoptère. Certains agriculteurs procèdent à l'épandage de vinasse dépolluée, riche en matières organiques utiles pour les sols. Lors de la coupe, 60 à 70 t/ha d'amarres et de paille, riches en azote et potassium (Delteil, 1884), sont laissées au champ.

Certaines émissions gazeuses sont dues à différents mécanismes, à l'origine de la transformation de l'engrais sous forme gazeuse ou oxydée (selon l'état physique de l'engrais : liquide, gazeux ou solide). Ces mécanismes peuvent se dérouler sous l'effet de facteurs chimiques, biologiques, climatiques en lien avec la teneur en nutriment des sols. Pour un kilogramme de fibres bagasse produit, il nécessite environ 0,013 kilogramme d'engrais.

La fabrication d'engrais chimiques, qui requiert de l'énergie et diverses matières premières n'est pas prise en compte dans cette étude.

Application de pesticides et d'herbicides

La production cannière n'emploie pas de pesticides et que rarement des herbicides (dans les deux-trois premiers mois suivants la repousse) (Brion, 2010). La fabrication de ces produits n'est donc pas prise en compte dans notre ACV.

La présence d'adventices, fortement problématique, est une forte contrainte en culture cannière. Elle nécessite l'emploi d'herbicides, dans le cadre de la nouvelle législation, plus respectueux de l'environnement. Un désherbant chimique de type Azulam (nom commercial Azulox), est ainsi épandu à la dose de 5 l/ha en deux fois. Quand la canne est plantée, le premier traitement est appliqué avant que l'herbe pousse et que la canne lève. Il est indispensable de ne pas laisser l'herbe fleurir, pour éviter la production puis la germination de nouvelles graines. Les principaux adventices auxquelles sont confrontés les planteurs en Martinique sont l'herbe de Guinée, l'herbe à riz et les lianes. Pour un kilogramme de fibres bagasse produit, il nécessite environ 0,084 kilogramme d'herbicides.

L'irrigation

La culture de la canne ne nécessite pas un grand apport d'eau. L'irrigation des sols est naturelle, elle se restreint aux apports en pluies sur l'année. Toutefois, selon les conditions climatiques, en cas de sécheresse on peut procéder à une irrigation d'appoint en cas de sécheresse, pour garantir au mieux la croissance de la canne et sa richesse en saccharose.

2. La machinerie agricole

Pour le travail au champ et l'approvisionnement de la sucrerie, différentes machines agricoles sont utilisées. On répertorie : tracteurs, récolteuses et camions, dont l'emploi est décrit ci-après.

Les tracteurs

Ils sont utilisés :

- Pour labourer le terrain puis préparer les sillons dans lesquels seront plantées les boutures de canne,
- Pour réaliser le désherbage à l'aide d'une lance, d'une cloche ou d'une rampe : à noter que le désherbage peut également être réalisé par un ouvrier équipé d'un pulvérisateur à dos.

Les récolteuses

La récolte est soit manuelle, soit mécanisée, et s'étend sur une période de quatre à cinq mois.

La récolte manuelle consiste à couper les cannes à la machette, à les épailler puis à les charger dans la benne.

Les récolteuses employées en Martinique sont de type automotrice CaMEco, utilisées aussi en Australie. Ces engins travaillent sur des terrains difficiles, montant régulièrement des pentes de 20-30%. La durée de vie de ces engins fortement sollicités est réduite sur le sol martiniquais : en dix ans, la plus vieille récolteuse a coupé près de 8 000 tonnes de canne, alors qu'au Texas ou en Louisiane, une même récolteuse coupe en un an 250 000 tonnes de canne.

Lors de la récolte semi-mécanique, les cannes sont coupées manuellement (épaillées si besoin), puis ramassées par un *cane-loader* (chargeur à griffes) qui dépose les cannes dans une remorque située dans le champ, pour ensuite être transférées par un *trans-loader* dans le camion de transport.

Dans le cas de la récolte entièrement mécanisée (le plus répandue en Martinique), on utilise une récolteuse-tronçonneuse-chargeuse (machine à couper la canne). La canne est coupée à la base, épaillée et tronçonnée en morceaux de 20 à 30cm. Une remorque auto-basculante circulant à coté réceptionne les tronçons de cannes alors que les restes de paille sont éjectés par soufflerie. Le transport vers les camions de transport se fait via remorque.

Ainsi, quel que soit le type de récolte, on aura des émissions diverses dont les principales sont le CO₂ avec les engins à moteur diesel.

Les camions

Outres les différents engins agricoles, des camions de 20 à 25 tonnes, à moteur diesel, sont utilisés pour transporter la canne récoltée vers la sucrerie. Les principales émissions pour cette catégorie sont le CO₂, ainsi que d'autres gaz tels que CO, NO_x et N₂O, quelques particules en suspension et des hydrocarbures (gaz organique total, hydrocarbures non méthane, gaz organique non méthane et COV) (EPA, 2004).

A ce stade de l'approche environnementale, nous ne disposons pas de suffisamment de données pour approfondir l'étude et dresser un tableau chiffré des différentes consommations et émissions relatives au transport.

3. Fabrication de sucre : récupération de bagasse

Avant de pouvoir récupérer les particules de bagasse, la canne en entrée de la sucrerie doit être broyée. En considérant que la bagasse est un sous-produit à revaloriser, il est nécessaire de tenir compte de l'impact environnemental de la transformation de la canne en industrie.

Lors de la production de sucre, l'impact environnemental d'une sucrerie est basé sur les différentes émissions et rejets. L'actuel directeur de la SAEM Galion (Philippe ANDRE) a accepté de mettre à notre disposition son bilan 2010 de rejets et émissions.

Consommation en eau

En ce qui concerne la transformation en usine (dans la sucrerie), une certaine quantité d'eau est nécessaire pour l'extraction du jus. On relève pour 2010, 372 509 m³ d'eau prélevés en surface de la rivière du Galion (limitrophe à l'usine).

Les rejets

Après passage dans l'unité de transformation des cannes, les eaux de procédé sont refroidies dans des tours de refroidissement, puis traitées en lagunage avant d'être récupérées par des agriculteurs pour l'irrigation des bananeraies. L'usine dispose de trois tours de refroidissement d'une capacité de 1 500 m³/h. L'excès d'eau, de 60 m³/h est rejeté en rivière à une température inférieure à 35°C.

Emission de l'industrie sucrière

En 2010, la sucrerie rejetait près de 19461 tonnes de GES, gaz à effet de serre, pour la chaudière bagasse (biomasse) et 469 tonnes de GES pour la chaudière fuel (énergie fossile). Les différentes émissions de GES relative à 2010 sont reportées Tableau 41.

Tableau 41. Emission des GES en sucrerie sur l'année 2010

Emissions	NOx (kg)	CH4 (kg)	Cox (kg)	N₂O (kg)	NMCOV (kg)	Poussière (kg)	SO₂ (kg)
Totale en 2010	29 337	6 290	28 344	786	8 395	5 921	6 129
Pour 1kg de fibres BPS-1N	1,09E-03	2,35E-04	1,06E-03	2,93E-05	3,13E-01	2,21E-01	2,29E-01

Les émissions de GES en un an, pour la production de bagasse en sucrerie est inférieure à 1g (valeurs similaires pour les autres fibres). Les émissions restent relativement faibles pour cette étape du processus de transformation.

4. Fabrication des fibres : extraction

Les fibres de bagasse peuvent être extraites à proximité de l'unité de transformation principale. On ne tiendra donc pas compte du transport de cette matière. Les particules de bagasse sont d'abord tamisées, puis pré-hydrolysées à l'eau et traitées à la soude (sous autoclave).

Tamissage de la bagasse

Cette étape de séparation granulométrique à sec des particules de bagasse produit beaucoup de poussières. Ces particules de poussières pénètrent rapidement le système respiratoire pouvant provoquer (si manipulées sans masque ni protection) de graves problèmes respiratoires chez l'Homme. Cette étape nécessite essentiellement de l'électricité.

Prétraitement et traitement chimique

Pour solubiliser les différentes substances solubles, les particules de bagasse sont pré-hydrolysées au chlorure de sodium (NaCl) et à l'eau distillée.

Le traitement chimique emploie de l'eau pour les réactions chimiques, avec les quantités les plus importantes lors des étapes de rinçage et de neutralisation. Quant aux solvants chimiques, les seuls qui aient été employés pour l'extraction et la neutralisation sont respectivement la soude ou hydroxyde de sodium (NaOH) et l'acide sulfurique (H₂SO₄).

Ces deux étapes se réalisent dans un bain, monté en température, sous pression dans des autoclaves ce qui nécessite un apport d'énergie et d'eau. Il s'en suit le séchage en étuve à 105°C des fibres extraites, étape qui nécessite de l'énergie. Pour produire un kilogramme de fibre de bagasse, près de cinq litres d'eau distillée sont nécessaires (extraction et neutralisation). Ces étapes entraînent essentiellement une augmentation de la DBO²⁴ (Pin, 2004).

IV. Evaluation des impacts

Parmi les différents rejets effectués dans l'environnement, de la culture à l'extraction de fibres, on retient principalement le CO₂, les SO₂, les NO_x et les composés organiques volatils (COV). Loin d'être les rejets les plus dangereux, ils n'en sont pas moins les plus néfastes, car plus répandus, tout domaine d'activité confondu.

On tire de la culture de canne, du processus de fabrication du sucre, des transports et de l'extraction des fibres, une empreinte de la diversité des rejets.

Les pollutions directes issues de ce cycle de fabrication peuvent avoir des conséquences variées sur l'environnement, telles que :

- Dégradation de la couche d'ozone
- Formation de smog d'été et d'hiver

²⁴ La DBO est la demande biologique en oxygène

- Acidification des milieux
- Eutrophisation des milieux aquatiques
- Effet de serre
- Développement de cancers et mutation de l'ADN

Pour chaque catégorie d'impact (ou effet) sont attribués un ou plusieurs impacts finaux qui est l'effet subit par l'homme, par l'écosystème ou par les ressources. La définition d'impact final par catégorie est : « un attribut ou aspect de l'environnement naturel (écosystème) de la santé humaine ou des ressources, permettant d'identifier un point environnemental à problème » (ISO 14042 :2000)

Affectation des catégories d'impacts à l'inventaire des données

Ici est présenté un inventaire de données affectées aux impacts répertoriés Tableau 42. Les catégories d'impacts peuvent être globales, locales ou régionales, et sont associées aux étapes et produits responsables des effets nocifs.

Tableau 42. Affectation des données d'inventaire aux catégories d'impacts

Echelle d'impact	Catégorie d'impact	Etapes	Inventaire des données
Global	Effet de serre	- Fabrication du sucre -Application d'engrais -Machines agricoles -Transport	CO ₂ et équivalent CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , N ₂ O
Global	Diminution de la couche d'ozone	- Fabrication du sucre -Application d'engrais -Transport	NO _x
Local	Smog photochimique	- Fabrication du sucre -Machines agricoles -Transport	NO _x , COV
Local	Eutrophisation	-Application d'engrais	Phosphates et nitrates
Local et régional	Pluies acides	- Fabrication du sucre -Transport	SO ₂ et équivalent SO ₂ , NO _x
Local	Ecotoxicité terrestre	-Epanchage des engrais	SO ₂ , NO _x , N ₂ O et NH ₃
Global Régional Local	Utilisation de la terre	-Culture	Erosion
Global Régional Local	Utilisation des ressources en eau	-Fabrication du sucre -Prétraitement et traitement chimique -Lavage	DBO
Global Régional Local	Diminution des ressources fossiles	-Machines agricoles -Transport	Gaz, pétrole, charbon
Global Régional Local	Santé humaine	- Fabrication du sucre -Tamisage	NMCOV, particules de moins de 10microns (aggravation des maladies cardiaque et respiratoires)

L'exploitation plus approfondie de ces données serait intéressante car elle donnerait des ordres de grandeurs de consommation des ressources pour la fabrication des fibres de bagasse. L'étude actuelle ne permet pas d'exploiter d'avantages d'informations. Toutefois, cette première approche reste à développer afin d'être comparée à des analyses de cycle de vie d'autres fibres textiles (comme le coton, le lin, la viscose ou le polyester).

Point sur la contamination des sols par la chlordécone

La chlordécone, pesticide organochloré (Figure 55), a été utilisé en Martinique durant plus de vingt ans en traitement contre le charançon du bananier. Ce pesticide POP (polluant organique persistant), hautement dangereux pour la santé et la biodiversité, est interdit d'utilisation depuis 1993.

Peu mobile et se dégradant à une vitesse très lente, sa forte persistance dans les sols est par son ampleur et sa persistance dans le temps, un enjeu sanitaire, environnemental de tous les fronts pour la Martinique et les Antilles. Ainsi, à ce jour, d'importantes surfaces agricoles contaminées restent interdites de culture pour l'agroalimentaire, comme les racines et les tubercules. De ce problème de contamination des sols (Figure 56), ce sont toutes les filières agricoles, maraichères et de la pêche maritime, qui ont été fortement ébranlées. Cet épisode désastreux dont les conséquences sont encore subies par la population, a permis de reconsidérer toutes les pratiques agricoles pour tenter de pallier aux défaillances passées.

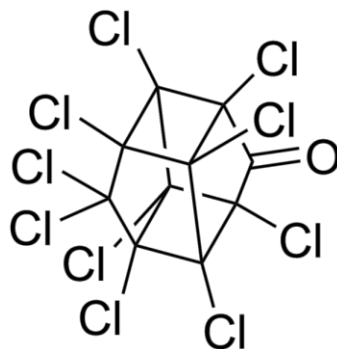


Figure 56. Structure d'une molécule de chlordécone

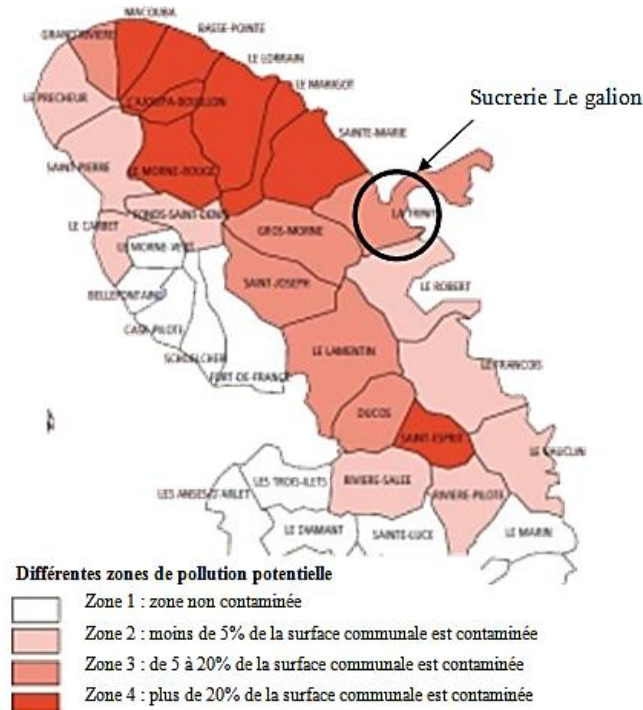


Figure 57. Cartographie des zones contaminées par la chlordécone

Bien qu'on retrouve encore la présence de la molécule chlordécone dans les sols de Martinique, les surfaces agricoles cultivées pour la canne à sucre (Annexe 5) sont faiblement touchées. La canne à sucre est une plante pour laquelle les molécules de chlordécone migrent faiblement dans la tige. Cette caractéristique lui assure encore aujourd'hui une pérennité sur l'île.

V. Interprétation et Conclusion

Suite à l'inventaire des données (Tableau 42), les étapes ayant le plus d'impact sur l'environnement, à l'échelle locale, régionale et globale semblent être le transport et les machines agricoles, ainsi que le passage en sucrerie. Toutefois, sans les valeurs chiffrées, il est impossible de quantifier chaque impact pour ensuite les classer.

Le passage en sucrerie et le tamisage sont les deux étapes ayant un impact sur la santé humaine. Pour prévenir de cette pollution et de maladie, de nombreuses précautions ont été prises, notamment concernant la sucrerie, qui traite les émissions conformément aux lois en vigueur.

L'étape d'extraction chimique avec le passage en sucrerie sont certainement celles utilisant le plus de ressource en eau, et qui générera une pollution ciblée du milieu aquatique si le traitement n'est pas correctement effectué avant rejet à l'évier ou à la rivière (respectivement laboratoire et sucrerie).

Il est intéressant de relever le bilan carbone de la culture de la canne, ainsi que les enjeux relatifs à la revalorisation des fibres de bagasse.

Bilan carbone

La canne à sucre fait partie des plantes de type C4 et constitue de ce fait un véritable piège à carbone. En effet la canne absorbe 60 tonnes de CO₂ et rejette 42 tonnes d'O₂ par hectare par an (Courteau, 2005).

Lors de la transformation de la canne, la bagasse produite est brûlée, libérant du CO₂. Ces émissions sont alors réabsorbées lors du cycle de croissance suivant de la plante. Les champs de canne sont de fait, de véritables puits de carbone. Par ailleurs, la culture au vert favorise le stockage dans les sols de grande quantité de carbone. Près de 1,6 tonne de carbone est stocké dans les vingt premiers centimètres du sol, au cours des quatre premières années de culture (Cerri *et al.*, 2004).

Enjeux de la filière canne en Martinique

En abordant les différentes dimensions d'un développement durable dans la fabrication ou la conception d'un produit, il est important de tenir compte des différentes dimensions intervenant dans la durabilité. La Figure 57 suivante met en évidence ces différentes dimensions. La législation à laquelle sont soumises les industries en termes de rejets est en application depuis 2005. Elle stipule que les déchets doivent être valorisés par réemploi ou par toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables.

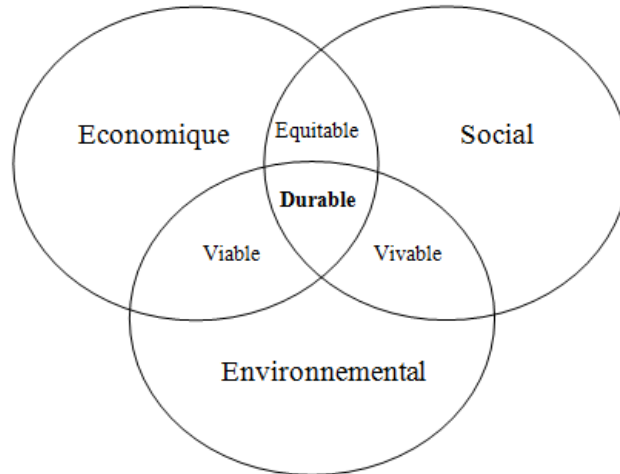


Figure 58. Les trois piliers du développement durable

La revalorisation est une démarche locale et régionale qui touche tous les acteurs de la filière canne. A l'échelle du planteur martiniquais, compte tenu des variations climatiques et de leur impact sur les cultures, la diversification des cultures au champ est vivement encouragée par la Région et la Chambre d'Agriculture. A l'échelle industrielle, compte tenu de la saisonnalité de la culture, la sucrerie entend développer une politique d'énergies renouvelables, en implantant sur site une turbine à combustion (TAC) de 40MW fonctionnant au gazole. Il s'agit d'une installation biomasse-charbon réunissant deux fonctions : chaufferie de sucrerie brûlant la bagasse d'une part, ainsi que centrale électrique de base avec des caractéristiques éprouvées de fiabilité, disponibilité et de respect des normes anti-pollution. Un tel projet du pôle énergétique de la Martinique apporte une réponse optimale aux problèmes posés par l'accroissement des besoins d'électricité de l'île tout en assurant la pérennisation de la filière canne martiniquaise.

La création de pôle de recherche sur la revalorisation de la biomasse en Martinique permettrait un retour des savoirs et un dynamisme commun de la population surtout chez les plus jeunes. En effet, le constat fait et qui maintient depuis des décennies est celui de l'implantation des jeunes diplômés à l'extérieur, car partis étudiés en Métropole ou à l'étranger. L'ouverture scientifique qui permettrait de développer la recherche, et de diversifier l'activité en rapport avec la biomasse (avec à plus faible échelle l'artisanat...).

L'étude a permis d'avoir une idée générale sur les différents impacts environnementaux du produit fibres de bagasse. Ayant travaillé avec des données partiellement qualitatives, mais

aussi quantitatives, il reste assez difficile d'estimer certains impacts, ainsi que les consommations énergétiques à chaque étape du processus. Il est possible toutefois d'avancer que le passage en sucrerie présente plus d'impacts sur l'environnement (ce, à toutes les échelles) que l'extraction chimique, à prendre toutefois avec précautions. En effet, une telle observation est menée à titre indicatif, sans données qualitatives pour conclure sur cette hypothèse.

L'ACV permet de se rendre compte de l'étendue des ressources et données nécessaires pour estimer l'impact sur l'environnement de la production de fibres de bagasse. Chaque interprétation et conclusion d'ACV doit tenir compte des limites, hypothèses et du champ d'étude, car il s'agit essentiellement de résultats de modélisations.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

I. Conclusions

1. Résultats acquis

Ce travail représente l'étude des fibres de canne à sucre extraites chimiquement à différentes concentrations en soude à partir de la bagasse. La bagasse, communément employée comme combustible dans les unités de transformation, ne connaît pas de valorisation textile à l'échelle industrielle. Les différents résultats acquis lors de cette étude ont permis de confirmer le potentiel textile des fibres de bagasse. Premièrement par la mise en œuvre d'un procédé d'extraction n'utilisant que très peu de produits et solvants chimiques (à partir de la biomasse bagasse). Et deuxièmement par la caractérisation physico-mécanique des différents types de fibres obtenues, permettant d'affirmer la place de ces fibres naturelles non-conventionnelles dans le domaine textile.

Ce mémoire de thèse constitue une contribution à la connaissance de matériaux fibreux issus de plantes naturelles exotiques, à l'étude et à la caractérisation de fibres extractibles de bagasse de canne à sucre. La mise au point du protocole d'extraction a été possible à partir de travaux publiés dans la littérature, principalement développés pour l'industrie papetière.

Extraction chimique

La méthode d'extraction chimique (par opposition à l'extraction mécanique) est la plus efficace pour des fibres lignocellulosiques. L'objectif principal étant la revalorisation en l'état des particules de bagasse (dans toute leur hétérogénéité), l'extraction chimique se limite à l'emploi d'un seul réactif (l'hydroxyde de sodium), avec comme degrés de liberté la concentration, la pression, le temps et la température de réaction.

L'étape de préhydrolyse (comme prétraitement) permet d'éliminer dans un premier temps un maximum d'hémicellulose (et autres composés solubles dans l'eau) avant de procéder à l'extraction alcaline de la lignine. L'emploi d'eau salée lors de la préhydrolyse facilite l'attaque des agents chimiques au niveau des différents sites actifs, suite au gonflement de la structure polymérique. A l'issue de ces traitements, on obtient quatre types de fibres (BPS-1N, BPD-0,1N, B-1N et B-0,1N) dont la structure chimique est analysée (FT-IR, dosage Klason), les propriétés physiques mesurées (longueur, diamètre, finesse) et les propriétés mécaniques évaluées (en flexion, traction), avant emploi des fibres en filature (type coton).

Caractérisation physique

Les dosages de Klason, suite aux différents traitements, révèlent que l'étape de préhydrolyse ne garantit pas une plus grande extraction de la lignine. Néanmoins, les fibres extraites à forte concentration avec préhydrolyse (BPS-1N) sont les plus fines (32 tex), avec des diamètres supérieures (rapport a/b : 2,81 mm) aux fibres extraites sans préhydrolyse (B-1N ; B-0,1N). L'évaluation du titre montre que les fibres les plus grossières sont celles extraites à faible concentration en soude sans préhydrolyse (B-0,1N).

L'examen au microscope MEB a permis de constater la disparition d'éléments non cellulosiques incrustés sur la surface des fibres en fonction du traitement. Les fibres les plus lisses sont obtenues à forte concentration en soude et ce, avec ou sans préhydrolyse (BPS-1N ; B-1N). Grâce à l'analyse des spectres de spectroscopie infrarouge FTIR, on peut constater l'efficacité de la soude, à différentes concentrations, par la diminution ou la disparition de certains pics caractéristiques de groupements (lignine, pectines, hémicellulose), mais aussi par l'augmentation du pic caractéristique de la cellulose.

Alors que l'action de la soude est vérifiée sur la structure polymérique, les fibres restent liées entre elles: les fibres ultimes ne sont pas séparées.

Caractérisation mécanique

En termes de comportement mécanique, les fibres BPS-1N, les plus fines obtenues sont de fait aussi les plus souples. A cause de leur finesse, elles sont aussi les moins résistantes à la traction (7,55 cN/tex) avec une faible capacité à la déformation (1,97%), alors qu'à la même concentration mais sans préhydrolyse (B-1N), on obtient plus du double de la capacité de déformation (4,25%), avec une meilleure résistance à la traction (11,01 cN/tex).

En dépit de l'optimisation du traitement d'extraction des fibres à partir de la bagasse de canne à sucre, les résultats mécaniques mettent tout de même en évidence l'efficacité des traitements, ainsi que la possibilité du choix des conditions d'extractions, selon l'application souhaitée. En effet, des fibres de bagasse peuvent être intégrées dans un matériau composite. Selon les propriétés mécaniques désirées, il suffit de choisir un des procédés d'extraction (optimisé) qui tiennent compte des résultats de caractérisation des fibres. De par leurs propriétés, les fibres de bagasse trouvent leur place dans la composition de textiles techniques

comme les non-tissés, les composites ou les géotextiles. Le protocole d'extraction selon le produit auquel les fibres de bagasse sont destinées, afin de valoriser au mieux ce sous-produit de la filière canne.

Les essais en micro-filature (type coton) réalisés au CIRAD ont permis de constater les limites des techniques de transformation conventionnelles. Bien que les résultats de filature en mélange coton-bagasse soient peu concluants, cette piste d'ouverture n'est toutefois pas à écarter. En effet, des essais de filature en mélange avec d'autres fibres non conventionnelles restent des pistes à exploiter avec une optimisation au préalable des conditions d'extraction. Aussi, les propriétés des fibres techniques obtenues laissent présager des qualités des fibres ultimes qu'il serait possible d'obtenir. En conséquence, en vue d'opérer en filature, il est nécessaire de reconsidérer la structure de la matière brute entrante en début de processus, tout en affinant les conditions d'extraction.

Les perspectives d'utilisation des fibres sont présentées par la suite.

2. Limites et verrous technologiques

Caractérisation chimique

Une limite à ne pas négliger dans l'optimisation des conditions d'extraction est la concentration en soude. En effet, la soude trop concentrée favorise la dégradation de la cellulose, après attaque de la lignine. Ce facteur limitant, appelé sévérité, doit être pris en compte lors de la revalorisation des particules de bagasse par voie chimique. Des analyses quantitatives (et non plus qualitatives) renforceraient aussi la connaissance du matériau fibre de bagasse, surtout aux vues des changements de structures au cours des transformations. Une mesure du degré de polymérisation des fibres DP serait incontournable pour donner suite au travail présent.

Caractérisation physique

Les distributions en longueur des différents types de fibres obtenus apparaissent comme indépendantes de la concentration en soude, dû à la grande dispersion numérique. Fortement influencé par les réglages des broyeurs dans les unités de transformation, les fibres extraites gardent le caractère hétérogène de la bagasse initiale.

Les mesures de caractérisation physique requièrent des méthodes instrumentalisées permettant de classer les fibres, en évitant des mesures fastidieuses à la main.

II. Perspectives d'utilisation des fibres produites

L'évaluation du potentiel textile et fibreux des fibres de *Saccharum officinarum* permet d'envisager des perspectives d'avenir dégagées par l'ensemble des travaux. La thèse « prend vie » quand les résultats dégagés de l'étude peuvent être exploités à plus grande échelle, être cités pour enrichir la connaissance des matériaux souples fibres, et permettre la poursuite des travaux par d'autres recherches.

Les fibres B-0,1N présentent une bonne résistance mécanique en traction, mais pas en flexion (sur Kawabata). Elles sont, suite aux conditions d'extraction assez grossières, avec des éléments incrustés (pectines, hémicellulose...) sur toute la surface des fibres.

A cause de la présence de ces éléments incrustés, leur emploi reste assez limité en textile technique. Pour des matériaux composites, avec de telles fibres on serait face à un manque d'adhésion matrice/résine. N'ayant été que très faiblement transformé chimiquement, elles peuvent être employées pour des applications similaires à celles de la bagasse brute.

Aussi, un domaine qui permettrait de les utiliser serait l'habitat et la construction : comme panels d'agglomérés pour les matériaux de constructions ou comme isolant (thermique ou utilisation fréquente des fibres naturelles) avec des tests-caractérisations complémentaires nécessaires.

Les fibres extraites de type BPD-0,1N ont cet avantage de ne nécessiter que de faible concentration en soude pour l'extraction. Par contre, elles sont peu souples, et de ce fait leur utilisation pour des matériaux sollicités en flexion est limitée. La grande disparité en longueur est aussi un inconvénient qui ne permet pas d'utiliser les fibres, sans passer par une sélection de longueurs de travail, au préalable. Aux vues des différents résultats, elles pourraient après optimisation du traitement et essais complémentaires, servir dans les textiles techniques comme les non-tissés, les composites ou les géotextiles.

Le traitement offre d'avantage de possibilités d'emploi que les fibres B-0,1N.

Les fibres extraites de type B-1N sont fines et souples avec des surfaces relativement lisses. En optimisant l'extraction (avec ajout d'ultrason par exemple), ces fibres pourraient servir en filature, pourvu qu'une méthode de filature spécifique aux fibres non conventionnelles soit adaptée. L'emploi de soude concentrée est un paramètre à considérer pour la neutralisation chimique des eaux résiduelles. En termes de propriétés mécaniques, les fibres sont assez souples, avec une bonne résistance à la traction et une capacité de déformation comparable aux fibres naturelles conventionnelles. Elles pourraient ainsi être employées pour des non-tissés ou des matériaux composites. Par contre, leur finesse peut-être l'élément limitant pour l'emploi des fibres en géotextile.

Les fibres BPS-1N sont lisses, très fines mais ne présentent pas un fort potentiel à la déformation. Leur finesse engendre une diminution de la résistance en traction ce qui influe sur les applications envisageables. Leur faible rigidité en flexion et leur finesse, en dépit de leur longueur pourrait servir à les employer en filature, après optimisation des procédés d'extraction. Elles pourraient aussi servir en non-tissés, et pour certains matériaux composites (selon le cahier des charges).

Après cet aperçu de domaines d'applications des fibres, on retiendra qu'une optimisation du procédé d'extraction est nécessaire pour produire des fibres qui répondraient au mieux au cahier des charges. Cette étude, qui constitue une première approche de caractérisation des fibres de bagasse, nécessite des analyses chimiques et physico-mécaniques complémentaires, plus en relation avec le domaine d'application envisagé. Aussi, au-delà des manipulations expérimentales, il serait intéressant d'établir des relations entre la structure polymérique et les propriétés des fibres, en favorisant les outils numériques de modélisation.

La connaissance structurale fondamentale est un préalable nécessaire pour mieux comprendre, prédire, modéliser et modifier le rôle joué par les macromolécules de la bagasse dans de nombreux phénomènes de reconnaissance et d'interactions, ainsi que leur comportement et propriété dans les différents matériaux investis.

D'un point de vue structurel, anatomique ou morphologique, des cannes à fort potentiel fibreux seraient mieux appropriées pour une filière textile. En agissant sur la matière

première, il serait intéressant de choisir une variété adaptée, pour produire plus d'énergie et d'autres produits dérivés, à partir de la biomasse lignocellulosique ou du sucre. En ce sens, l'objectif serait de développer des programmes d'amélioration variétale, qui permettrait de produire des variétés de canne plus riches en fibres²⁵ (>30%). A notre connaissance, un tel programme est conduit par la *West Indies Central Sugar Cane Breeding Station* à la Barbade (WICSCBS, 2013). Dans un second temps, des parcelles de cannes adaptées à la culture de ses variétés à haute teneur en fibre seraient spécifiquement dédiées. Cela dit, la mise en place de terres dédiées aux cannes riches en fibres servirait en tout premier lieu à l'apport énergétique de l'île, et pourraient dans un second temps voire parallèlement, servir au domaine textile (sans pour autant concurrencer l'industrie sucrière et rhumière). Une orientation textile (ou textile technique), pourrait être une volonté affirmée de diversification et d'ouverture pour le développement.

Un tel développement permettrait d'étendre les surfaces agricoles et de produire mieux (surfaces disponibles, techniques culturales...) tout en diversifiant l'activité de la filière. Ceci consoliderait par ailleurs, des ponts entre les différents acteurs de la filière canne, pour valoriser et promouvoir la recherche en terme de connaissance, revalorisation et valorisation des coproduits dérivés.

²⁵ Les espèces *Saccharum spontaneum* et *S. robustum* ont des teneurs en fibres respectives de 31,8% et 24,8%.
Davina MICHEL – Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR. (1985). Détermination de la force et de l'allongement de rupture par traction, méthode simplifiée. NFG 07-002.

AFNOR. (1987). Textiles. Fibres et fils- Détermination de la masse commerciale d'un lot NF G08-001-4.

AFNOR. (2005). Textiles : Atmosphère normale de conditionnement et d'essai. NF G 00-003.

Aguiar MM, Ferreira FR, Monteiro RTR. (2010). Use of vinasse and sugarcane bagasse for the production of enzymes by lignocellulolytic fungi. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Volume 53 n°5, p. 1245-1254.

Allix A. et Gibert A. (1956). Géographie des textiles. Paris : Librairie de Médecis, p.228.

Alsif AS. (2010). Le Brésil et les biocarburants, l'internationalisation d'un enjeu énergétique par le Sud. Independencias - Dependencias - Interdependencias VI Congreso CEISAL. 30/06-03/07/2010, Toulouse (FRA).

Artschwager E. (1925). Anatomy of the vegetative organs of sugarcane. *Journal of Agriculture Research* 30, p.197-221.

Artschwager E. (1940). Morphology of the vegetative organs of the sugarcane. *Journal of Agriculture Research* 60, p.503-549.

ASTM. (1979). Test method for breaking tenacity of man-made textile fibers in loop or knot configuration. ASTM 3217-1779. USA: ASTM Norms.

Bambanaste R, Fernandez N, Villamil G. eds (1985). La industria de los derivados de la caña de azúcar. Editorial científico técnico, La Habana, Cuba.

Berndt et Hodzic. (2007). Bagasse Fibre for sustainable manufacturing. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. Vol.1, 289-300.

Bellamy LJ. (1964). The infrared spectra of complex molecules. Wiley, New-York, p.161-177.

Bledzki A.K. et Gassan J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, vol. 24, pp221-274.

Boussarsar H. (2008). Application de traitements thermique et enzymatique de solubilisation et saccharification de la fraction hémicellulosique en vue de la valorisation de la bagasse de canne sucre. Thèse de doctorat : Chimie Physique Industrielle- Génie biologique, Université de Reims Champagne-Ardene, France et Université de Sfax Pour Le Sud, Tunisie.

Botta S. (1978). Estudios morfológicos y anatómicos de la caña de azúcar. Su relación con la sequía; tesis para optar por el grado de C. Dr. En Ciencias, La Habana, Cuba

Brion L. éd (2010). Le rhum agricole A.O.C. Martinique. Lauma éditions la case à rhum.

Browning. (1967). Method of wood chemistry. Interscience Publishers, New-York, volume 2.

Brugnago RJ. (2011). Effect of steam explosion on the production of sugarcane bagasse/polyester composites. *Composites Part A* 42, p.364-370.

Cerri CC, Bernoux M, Feller C, Correa de Campos D, Del Luca AF, Eschenbrenner V. (2004). Canne à sucre et séquestration du carbone. Académie d'Agriculture de France, p.15.

Chiparus OI., Chen Y. (2003). An image method to evaluate bagasse fiber dimensions. *Bioresource Technology*. 90, p. 305–309

Chiparus O.I. (2004). Bagasse fibre for production of nonwoven material. Thèse de doctorat : Ecologie humaine. Université de Louisiane et Roumanie.

Collier JR, Wei PT, Collier BJ. (1991). Bending of internally reinforced rayon fibers. *Journal Textile Institute*, Vol.82, N°1, p. 42-51.

Collier B & J, Agarwal P, Lo Y.W. (1992). Extraction and Evaluation of fibers from sugar cane. *Textile Research Journal*. 62 (12), p.741-748.

Collier B. J., Arora, M. S. (1994). Water Pretreatment and Alkaline Treatment for Extraction of Fibers from Sugar Cane Rind. *Clothing and Textiles Research Journal*. 14(1): 1-6.

Courteau A. (2005). La canne à sucre et l'environnement à la Réunion : revue bibliographique. Rapport de stage de Maitrise : Université de Franche-Comté : Besançon. p.45.

CTCS. (1990). Analyse du bilan canne-bagasse. Documentation interne CENTRE TECHNIQUE DE LA CANNE ET DU SUCRE DE MARTINIQUE.

CTCS. (2005). Valorisation de la Bagasse. Document interne CENTRE TECHNIQUE DE LA CANNE ET DU SUCRE DE MARTINIQUE.

CTCS. (2013). Site du CENTRE TECHNIQUE DE LA CANNE ET DU SUCRE DE MARTINIQUE. Consulté en ligne le 01/07/13.<http://www.ctcs-martinique.org/>.

Cuba9, GEPLACEA, PNUD, ICIDCA. (1990). Atlas del bagazo de la caña de azúcar. Geplacea/Pnud.

Cuba9, Filial de la ATAC. (1994). I taller sobre celulosa, papel y derivados del bagazo.

Dallel M, Lallam A, Leon M, Renner M. (2011). Physical and mechanical characterization of Alfa (stipa tenacissima L.) fibres for textile applications. AUTEX Congress, Zadar, Croatia.

Delteil A. (1884). La canne à sucre. Chalamal.

Dreyer C. (1994). Contribution à la modélisation de l'influence des caractéristiques des fibres de laine peignée sur les propriétés de textiles linéaires. Thèse de doctorat : Mécanique, Université de Haute Alsace-Mulhouse, France.

Dinu I. (2006). Erosion control products from sugarcane bagasse. Thèse de doctorat : Science de l'Ingénieur, Université Alexandru Ioan Cuza, Roumanie.

EADI E. coordonnateur. (1986). Canne à sucre, Martinique-Caraïbes associées. Encyclopédie vivante, Association Populaire pour l'Education scientifique APES, p.28-90.

EPA. (2004). Soil preparation. Environmental protection agency. Consulté en ligne le 20 juin 2013. <http://www.epa.gov/agriculture/ag101/cropsoil.html#molboard>.

Faostat (2013). Production mondiale canne à sucre. Consulté en ligne le 16 mars 2013. <http://faostats.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?pageID=567#ancor>.

Fengel D. et Wegener G. (1984). Wood chemistry, ultrastructure, reaction. Walter de Gruyter, New-York.

Filho GR. (2007). Characterization of methylcellulose produced from sugar cane bagasse cellulose: Crystallinity and thermal properties. *Polymer Degradation and Stability*, 92, p.205-210.

Gallion G. (2013). Martinique Terre, sans sucre. *France-Antilles* n°, p.4-5, vendredi 8 février 2013

Gomez G. (2012). Abécédaire de chimie organique, Le bois : rudiments sur sa composition et son utilisation pour la pâte à papier. Consulté en ligne le 18 janvier 2013. <http://webpeda.ac-montpellier.fr/wspc/ABCDORGA/Famille/CHIMIEDUBOIS.html#TROIS>

Gong C.S, Maun C.M., Tsao G.T. (1981). Direct fermentations of cellulose to ethanol by a cellulolytic filamentous *Fungus Monilia* sp. *Biotechnology Letters*, 3, p.131-144.

Mc Govern J.N. (1990). Fibers, Vegetable. Polymers-Fibers and Textiles, a Compendium. New-York: John Wiley and Sons, p.412-430.

Hartley R.D., Jones EC. (1977). Phenolic components and degradability of cell walls of grass and legume species. *Phytochemistry*, 16, p.1531-1534.

Hearle J.W.S., Lomas B., Cooke W.D. (1998). An Atlas of Fibres Fractures and Damage to textiles. Cambridge, London: CRC Press, Woodhead Publishing Ltd.

Ho Thi Thu Nga. (2008). Etude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco. Thèse de doctorat : Génie, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, p.22-27

Hugot E. (1987). La sucrerie de cannes. 3^{ème} édition Technique & Documentation Lavoisier.

ICIDCA (1990). La industria de los derivados de la caña de azúcar. INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Editorial científico-técnica La Habana, p.111.

IRD, Inra (2006). Valorisation de la bagasse de canne à sucre : les biotechnologies au service de l'industrie papetière. *Actualité Scientifique*, fiche n° 252.

Jaspard E. (2012). Structure chimique de la cellulose. Consulté en ligne le 23/11/12 <http://biochimej.univ-angers.fr/Page2/COURS/3CoursdeBiochSTRUCT/2GLUCIDES/1Glucides.htm>

Kirci H. et Akgül M. (2002). Production of Dissolving Grade Pulp from Poplar Wood by Ethanol-Water Process. *Turk J.Agric*, Vol.26, 239-245.

Kunhad R.C et Singh A., Eriksson K.E.L. (1990). Microorganisms and enzymes involved in the degradation of plant fiber cell walls. *Adve. Biochemistry Biotechnology*, 57, p. 45.

Kuwahara M. Glenn J.K, Morgan M.A., Gold M.H. (1984). Separation and characterization of two extracellular H₂O₂ dependent oxydases from lignolytic cultures of *Phanerochaete chrysosporium*. *FEMS Microbiology Letter*, p.169.

Laser M., Schulman D., Allen S.G. (2002). A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane for conversion to ethanol. *Bioresource Technology*, 81, p.33-34.

- Lader Christelle (2011). Des champignons bios en Martinique. *France-Antilles Martinique*, article de presse du 04/03/2011
- Leroux J. (2003). Modification des fibres de celluloses amélioration des propriétés hydrophiles des pates bisulfites. Thèse de doctorat : Chimie Organique, Université de Bordeaux I, France, p.21-24.
- MacMillan J.D. (1994). Pretreating Lignocellulosics Biomass : a Review In : Enzymatic Conversion for fuel production, M.E Himmel, J.O.Baker, an R.P. Overend eds., ACS Symposium Series 566, chap.15, American Chemical Society, p.411-437.
- Martin J.P. (1938). Sugarcane diseases in Hawaï. Experiment Station of Hawaï Sugar Plant Association, p.295.
- Martin C., Marcet, Thomsen. (2008). Comparison between wet oxidation and steam explosion as pretreatment methods for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse in Bagasse pretreatment, bioethanol. *Bioresources* 3(3), 670-683.
- Meirhaeghe C. (2011). Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France. Fibres recherche développement ®, ADEME.
- Meredith R. (1969). Proceedings of fifth International Congress on Rheology. University of Tokyo Press, Vol.1, p.43.
- Meslien S. (2009). La canne à sucre et ses enjeux aux Antilles françaises, des origines au début du XXe siècle. Centre Régional de Documentation Pédagogique de la Martinique
- Ministère. (1986). Traitements envisageables pour la bagasse. Colloque : MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT & FONDATION DE L'EAU. Février 1986.
- Morton W.E., Hearle J.W.S. (1975). Physical Properties of Textile Fibers. London: The Textile Institute & Butterworth and Co., 2nd Ed, p.441.
- Morton W.E., Hearle J.W.S. (1986). Physical Properties of Textile Fibers. London: The Textile Institute & Butterworth and Co., 2nd Ed, p.170.
- Müller F.M. (1960). On the relationship between properties of straw pulp and properties of straw Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 43 (2), 209A-218A
- Mussig J. (2010). Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and technical Applications. Jorg Mussig Editor
- Nuissier G., Grignon-Dubois, Bourgeois P. (2005). Les déchets de distillerie, nouvelles sources de cire de canne à sucre. *Biofutur* 251, p.45-48
- Pin E. (2004). Analyse de cycle de vie d'un tee-shirt, fabriqué à Montréal, en coton versus polyester. Faculté des sciences. Maîtrise en Environnement. Université de Sherbrooke.
- Patureau J.M. (1982). Sugar series: By products of cane sugar industry: an introduction to their industrial utilization. 2nd Ed.Elsevier, volume 3.
- Rocha G.J.M. (2012). Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production. *Industrial Crops and Products* 35, p.274-279.

- Romhany G., Karger-Kocsi J., Czigany T. (2003). Tensile fracture and failure behavior of technical flax fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, p.3638-3645.
- Rowell R.M. et Anand R. (1997). Utilization of natural fibers in plastic composites: problems and opportunities. *Lignocellulosic Plastics Composites*. A.L. Leao, F.X. Carvalho & E.Frollini, Eds, pp.23-51.
- Saheb D.N., Jog J.P. (1999). Natural fiber polymer composites: A review. *Adv.Polymer Technology* 18(4), p. 351-363.
- Sanjuan R., Anzoldo J., Vargas J., Turrado J., Patt R. (2001). Morphological and chemical composition of pith and fibres from Mexican sugarcane bagasse. *Holz als Roh-werkstoff*, 59, p.447-450.
- Sarkaren K.V. et Ludwig C.H. (1971). *Lignins*. Wiley interscience, New-York, p.292.
- Silverstein R.M., Bassler G.C , Morill T.C (1991). *Spectrometric identification of organic compounds*. John Wiley& sons 5ed, New-York, p.419.
- Siquiera G., Bras J., Dufresne A. (2010). Luffa Cylindrica as a lignocellulosic source of fiber, Microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals. *BioResources* 5 (2), p.727-740.
- Sun R.C, Lawther J.M, Banks W.B. (1996). Fractional and structural characterization of wheat straw hemicelluloses. *Carbohydrate Polymer* 29, p.325-331.
- Sun X.F., Xu F., Sun R.C., Flower P., Baird M.S. (2005). Characteristics of degraded cellulose obtained from steam explosion wheat straw. *Carbohydrate Research*. 340 (1), p.97-106.
- Tappi. (1986). Nonwood plant fiber pulping. Progress report n°17. Tappi press
- Turner, A.J. (1949). The structure of textile fibers VIII- The long vegetable fibers, *Proceedings – The Structure of Textile Fibers –Turner*, p.972-984.
- Techn Ass Paper Pulp Ind., 43 (2), 1996, 209A-218A
- United Nations.(1955). *Pulp and paper prospects in latin America*. United Nations, New York.p.256-295.
- Villacencio E.J. (1980). Method for preparing bagasse dissolving pulps and producing rayon having a degree of polymerization of at least 800 therefrom.US Patent 4.199.399.
- van Dillewijn. (1960). *Botanique de la canne à sucre*. H.Veenman éditeur. pp. 391
- Voinot, D. (2007). *Caractérisation des composés organiques volatils issus du séchage du bois. Application au chêne rouge et au pin gris*. Maitrise en Sciences du bois. Université Laval, France
- Wertz JL. (2011). *Les hémicelluloses*. Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège. Document Valbiom.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche descriptive de quelques variétés de canne (site internet du CTCS) B59.92 - La Canne Roseau.....	1
Annexe 2 : Spectres infrarouge des fibres BPD-0,1N, B1N et B-0,1N.....	5
Annexe 3 : Mesures des diamètres petit et grand axes	6
Annexe 4 : Différentes normes de management environnemental	6
Annexe 5 : Cartographie du suivi des pesticides en Martinique en 2007	7

Annexe 1 : Fiche descriptive de quelques variétés de canne (site internet du CTCS)
B59.92 – La Canne Roseau

DESCRIPTION BOTANIQUE

Origine :
Barbade (WICSCBS)
Parents :
B 41.045 x NCo 310

Tige

La tige est de couleur jaune-verdâtre. Elle être recouverte d'une épaisse couche de cire blanchâtre chez les jeunes cannes, qui augmente avec le degré d'humidité, devenant gris-noir. Exposée au soleil et à maturité, la tige devient jaune foncé, avec quelques tavelures de couleur orangé à rouge.

Les entre-nœuds sont de forme conoïdale sur les jeunes cannes et en forme de barillet sur les cannes matures. Légèrement courbés, ils impriment à la tige un profil en zigzag. Ils sont de diamètre petit à moyen, suivant les conditions de culture, et assez courts.



Anneau de croissance, bande radiculaire et bourgeon

L'anneau de croissance est jaune-brun, droit et renflé. La bande radiculaire est de couleur verdâtre, prenant la couleur de la tige à maturité.

Le bourgeon occupe une position haute ou centrale dans la bande radiculaire. Il présente une teinte jaune paille. De forme ronde ou ovée, il est d'assez petite taille, bien aplati contre la tige et muni de petites ailettes.

Feuilles

Le limbe est vert-jaunâtre à vert pâle, assez étroit. Il est lancéolé sur les jeunes cannes et légèrement retombant sur les cannes matures.

La gaine, initialement verte, devient rosée, puis couleur paille, tachetée de rouge. Avec une gaine moyennement adhérente, les feuilles s'épailent naturellement en bas de la tige et se

détachent assez aisément vers le haut. La gaine est très pubescente, ses poils étant toutefois peu piquants.

L'auricule est moyennement développée, deltoïde, pouvant atteindre 1 à 1,5 cm. L'ochréa, bien contrasté, est brun-vert et un peu gaufré. Assez large, triangulaire puis rectangulaire, il présente une marge basale horizontale à retombante.

CARACTÈRES AGRONOMIQUES ET INDUSTRIELS

Levée, tallage, croissance et floraison

Canne à lever lente mais régulière, au tallage très important, à croissance vigoureuse et homogène, la Canne Roseau assure une bonne couverture du sol. Par ailleurs, elle présente une tenue en rejeton exceptionnelle. Bien entretenue, elle témoigne d'une très grande longévité. Elle fleurit modérément.

Résistances et Adaptations

Cette variété est très résistante aux conditions de milieu et de culture, dont les traitements herbicides. Rustique par excellence, elle est facile à cultiver et considérée comme une variété « anti-risque ». Elle s'adapte particulièrement bien aux sols du centre et du sud, qui présentent une bonne rétention en eau.

La dureté de son écorce lui confère une certaine résistance aux prédateurs (borers, rats), sauf en cas de fortes infestations. De plus, elle est tolérante au charbon et résistante à la rouille. Avec un épaiillage modéré et un port très érigé, même après brûlage, elle convient bien à la coupe mécanique.

Rendement agricole et qualité technologique

Elle se caractérise par de très bons rendements agricoles. Sa richesse est aussi appréciable, si de bonnes conditions de sécheresse favorisent la maturation. Sa pureté et son taux de fibre sont moyens. D'un usinage aisé, avec une bagasse brûlant bien, en plus d'un jus aromatique, elle est très appréciée en distilleries.

EVOLUTION

Variété longtemps dominante en Martinique, en décroissance très progressive, avec l'implication des producteurs de canne dans la politique de diversification variétale.

R 570 – La Canne Paille

Hybride :
R 570 (RP 67.347)
Origine :
Réunion (CERF)
Parents :
H 32.8560 x R 445

*DESCRIPTION BOTANIQUE**Tiges*

La tige est verdâtre, prenant une teinte jaune, très légèrement rosée à maturité. Elle est recouverte d'une cire abondante, partiellement noire en conditions humides. Quelques tavelures sont apparentes.

Les entre-nœuds sont cylindriques et légèrement courbés. Ils impriment un léger profil en zigzag à la tige. Très longs, ils sont de diamètre moyen.

Anneau de croissance, bande radulaire et bourgeon

L'anneau de croissance, bien droit, apparaît généralement vert à brun. La bande radulaire est jaune, de largeur moyenne et constante, surplombée par une cicatrice foliaire protubérante.

Le bourgeon occupe une position basse dans la bande radulaire, avec une ligne de *primordia* radulaires bien nette au-dessus. Il est jaune, assez petit, peu proéminent, rond et glabre.

Feuilles

Le limbe est vert, de largeur moyenne avec une bordure en dents de scie. Les feuilles sont retombantes au tiers supérieur de leur longueur. La gaine foliaire est verte, très adhérente et peu pubescente. La masse foliaire est abondante.

On note une auricule triangulaire de taille moyenne, avec la présence de poils à la base, tandis que la ligule est poilue sur la face externe.

L'ochréa est foncé, tendant vers le brun-rougeâtre. Il est large et triangulaire, avec une marge supérieure convexe et une marge inférieure assez horizontale.

*CARACTÈRES AGRONOMIQUES ET INDUSTRIELS**Levée, tallage, croissance et floraison*

Excellente croissance. Tallage abondant. Du fait de sa forte vigueur végétative, elle a tendance à repartir en végétation en fin de campagne, avec la saison des pluies. Bonne tenue en repousse. Floraison modérée.

Résistances et adaptations

Variété à large adaptation, qu'il faut toutefois éviter de planter dans les bas-fonds trop hydromorphes, du fait de risques accrus de verse. Par contre, en Martinique, elle valorise bien les parcelles considérées comme « ingrates » (zone sèche, sol à faible réserve en eau), mieux notamment que la Canne Roseau.

Il s'agit d'une canne sensible aux herbicides. Résistante au charbon et à la rouille, elle est tolérante à l'échaudure des feuilles et sensible à la maladie des stries chlorotiques, en plus d'une certaine sensibilité au pokkah boeng. Elle résiste par contre assez bien aux attaques de rats, sa fibre étant délicate à sectionner.

Cette variété possède un port érigé en début de végétation, puis évasé en cours de végétation. Sous le poids des tiges, elle se prête facilement à la verse en fin de cycle. Cette tendance à la verse, ainsi que la caractéristique filandreuse de sa fibre et la présence d'une paille abondante et adhérente gênent la récolte mécanique. Celle-ci exige un affûtage fréquent des couteaux des récolteuses.

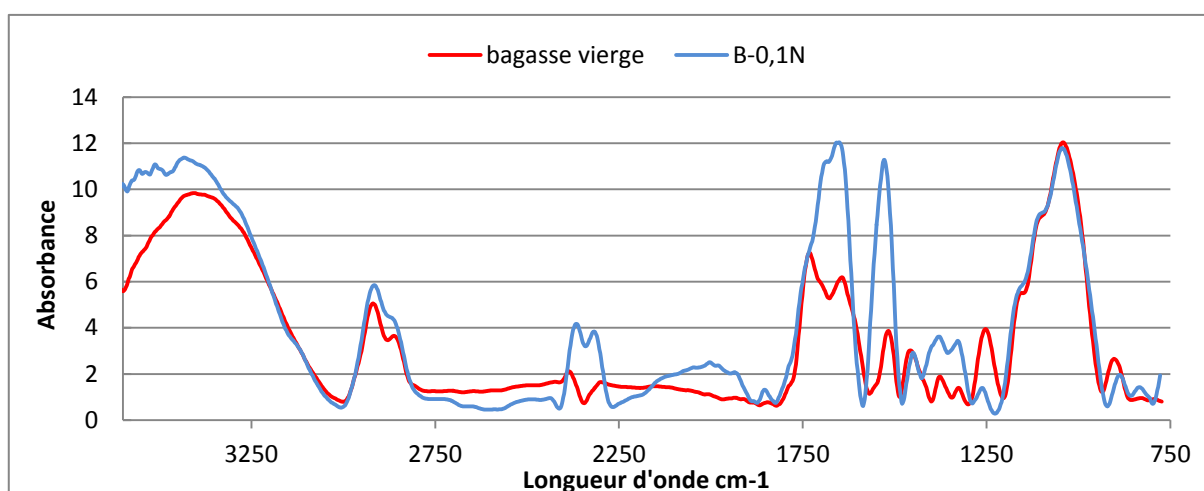
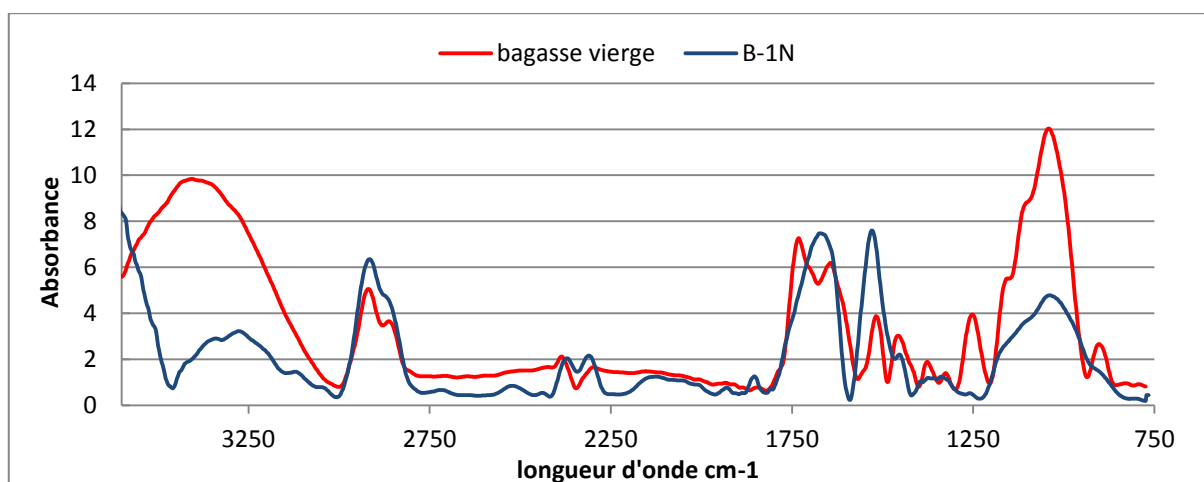
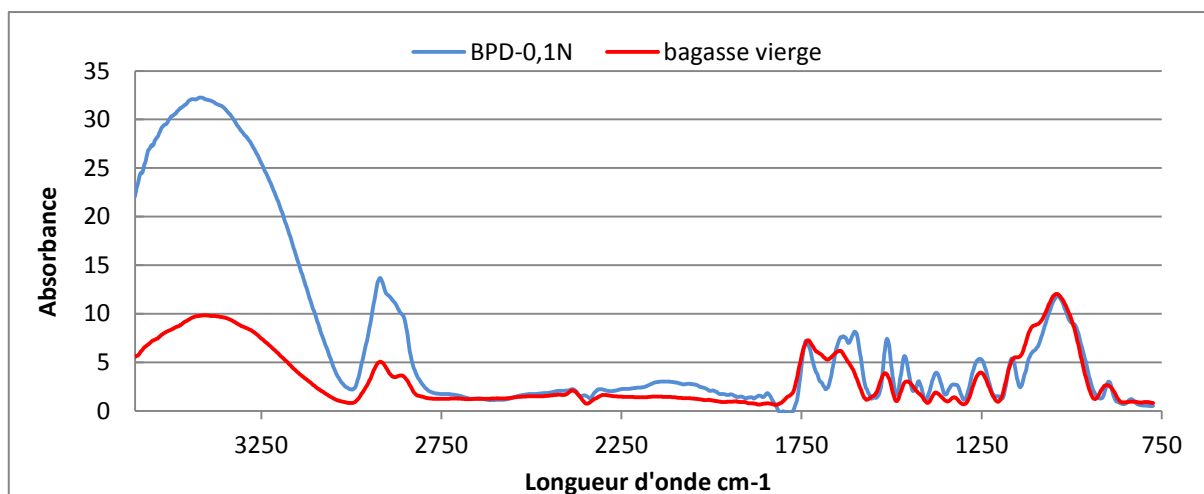
Rendement agricole et qualité technologique

Elle donne en général d'excellents tonnages et une bonne richesse. Récoltée trop tardivement, elle s'avère toutefois sensible à la sur-maturation. Outre son faible taux de fibre, elle a l'avantage de se caractériser par une pureté élevée ; deux caractéristiques fort appréciées notamment en sucrerie.

EVOLUTION

Variété qui a connu un bel essor dans les années 1990, mais dont le développement reste toutefois modéré, du fait de ses contraintes pour la mécanisation de sa récolte et de quelques difficultés d'usinage dans certaines distilleries agricoles de l'île.

Annexe 2 : Spectres infrarouge des fibres BPD-0,1N, B1N et B-0,1N



Annexe 3 : Mesures des diamètres petit et grand axes

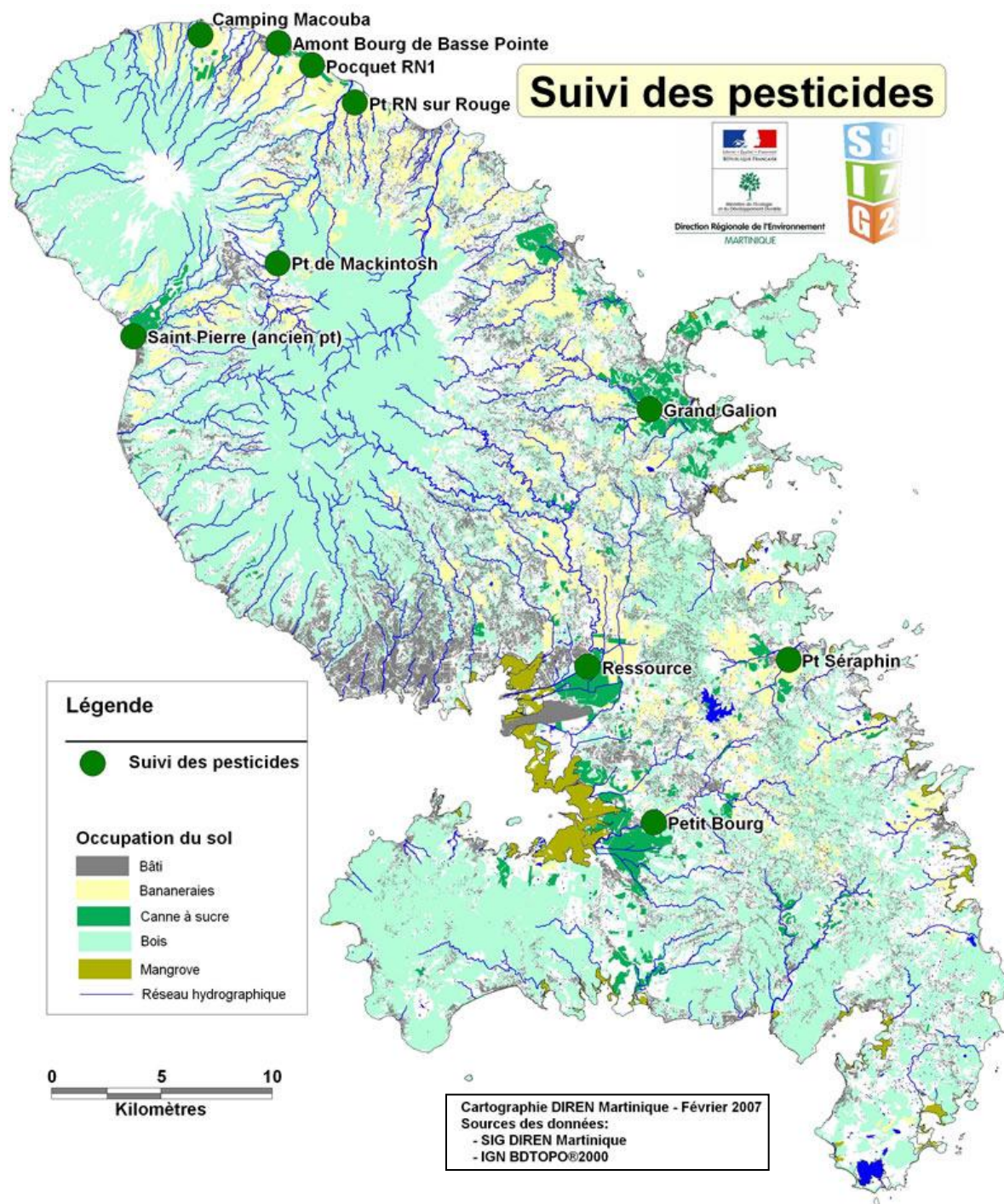
Petit axe a	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Moyenne (mm)	0,07	0,15	0,09	0,11
Ecart-type (mm)	0,05	0,08	0,05	0,06
CV%	69,20	55,34	58,75	55,75
LPE% (95%)	31,61	23,31	21,24	19,00

Grand axe b	BPS-1N	BPD-0,1N	B-1N	B-0,1N
Moyenne (mm)	0,16	0,23	0,27	0,20
Ecart-type (mm)	0,07	0,12	0,13	0,11
CV%	43,78	51,39	47,57	55,00
LPE% (95%)	20,00	18,58	20,04	18,74

Annexe 4 : Différentes normes de management environnemental

Norme	Date de parution	Indice de classement	Tirage	Titre	Commentaires
NF EN ISO 14 040	Octobre 2006	X30-300	1 ^{er} tirage	Analyse du cycle de vie	Principes et cadre
NF EN ISO 14 041	1998	P62-002	4 ^{ème} tirage 2007 :01	Analyse du cycle de vie	Définition de l'objectif
NF EN ISO 14 044	Octobre 2006	X30-304	1 ^{er} tirage	Analyse du cycle de vie	Exigences et lignes directrices
FD ISO/TR 14 047	Octobre 2003	X30-307	1 ^{er} tirage	Evaluation de l'impact du cycle de vie	Exemples d'application de l'ISO 14042
XP ISO/TS 14 048	Février 2003	X30-308	1 ^{er} tirage	Analyse du cycle de vie	Format de documentation des données
FD ISO/TR 14 049	Décembre 2000	X30-309	1 ^{er} tirage	Analyse du cycle de vie	Exemples d'application de l'ISO 14041 traitant de la définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire

Annexe 5 : Cartographie du suivi des pesticides en Martinique en 2007



Evaluation du potentiel fibreux et textile de la canne à sucre (*Saccharum officinarum L.*)

Ce travail de thèse porte sur l'extraction et la caractérisation mécanique des fibres de canne à sucre. A partir de la bagasse de canne à sucre, résidu fibreux de l'industrie sucrière, des techniques d'extractions sont mises en place afin d'extraire des fibres techniques, dont l'analyse des propriétés chimiques et physico-mécaniques définira par la suite, les domaines d'application textile possibles.

Les fibres de canne obtenues ont d'abord été étudiées d'un point de vue physique et morphologique, à partir de mesures et d'observations de leurs sections et de leurs profils. Ainsi, l'analyse de la distribution en diamètre et en longueur des fibres ont été étudiés avec l'établissement de paramètres de centrage barbe et hauteur (longueur pondérée à la masse), ont permis de déterminer leurs tailles moyennes, leurs finesses et leurs dispersions tout en vérifiant l'effet des conditions de traitement. Ont ainsi été obtenus différents types de fibres, présentant des propriétés mécaniques (en flexion et en traction) variées en relation avec les changements de structure dus à l'extraction. Les performances mécaniques de ces fibres restent comparables aux autres fibres naturelles, confirmant ainsi leur potentiel textile. Une première piste de valorisation de ces fibres a été envisagée lors de la fabrication d'un fil de canne à sucre. Des essais de filature ont ainsi été menés sur micro-filature, en 100% fibres de canne mais aussi en mélange 30-70% coton/bagasse.

Enfin, une introduction à l'approche environnementale basée sur l'analyse de cycle de vie, a été succinctement abordée, ouvrant le champ à d'autres études.

Les résultats montrent que le potentiel textile de la canne à sucre est quantifiable, et que ses fibres extractibles, sont comparables à d'autres fibres naturelles non conventionnelles utilisés dans le domaine textile.

Mots Clés: Canne à sucre, *Saccharum officinarum L.*, bagasse, fibre, extraction, lignine, caractérisation, flexion, traction, propriétés mécaniques, fil, textile, ACV

Evaluation of the fibrous and textile potential of sugarcane (*Saccharum officinarum L.*)

This doctoral dissertation deals with extraction and mechanical characterization of sugarcane fibers. From bagasse, the fibrous residue left from the sugar mill, several extraction conditions were investigated in order to extract technical sugarcane fibers.

At first, morphological and physical characterization were analyzed, based on their sections and longitudinal profiles. Thus, mean size, fiber fineness and scattering were studied regarding adjusting parameters barbe and hauteur, for the fiber length distribution as weighted mean.

Different types of technical fibers were obtained and their mechanical characterization as bending and tensile properties linked with the extraction conditions. Mechanical performances of the extracted fibers are common to other natural fibers that confirm their textile potential.

To valorize these fibers, some experiments were conducted by producing sugarcane yarn. A micro-spinning were piloted for a 100% bagasse and 30/70% cotton/bagasse yarn made.

Finally, an introduction to an environmental approach was analyzed, based on the lifecycle analysis from the sugarcane culture to the fiber extraction, opening new perspectives to study.

The results show that good fibers can be extracted from sugarcane, thanks to its chemical and physical composition, but also can be characterized for textile application.

Keywords: Sugarcane, *Saccharum officinarum L.*, bagasse, fiber extraction, lignin, characterization, bending property, tensile property, mechanical properties, yarn, textile, lifecycle
