



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

-----  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA  
-----

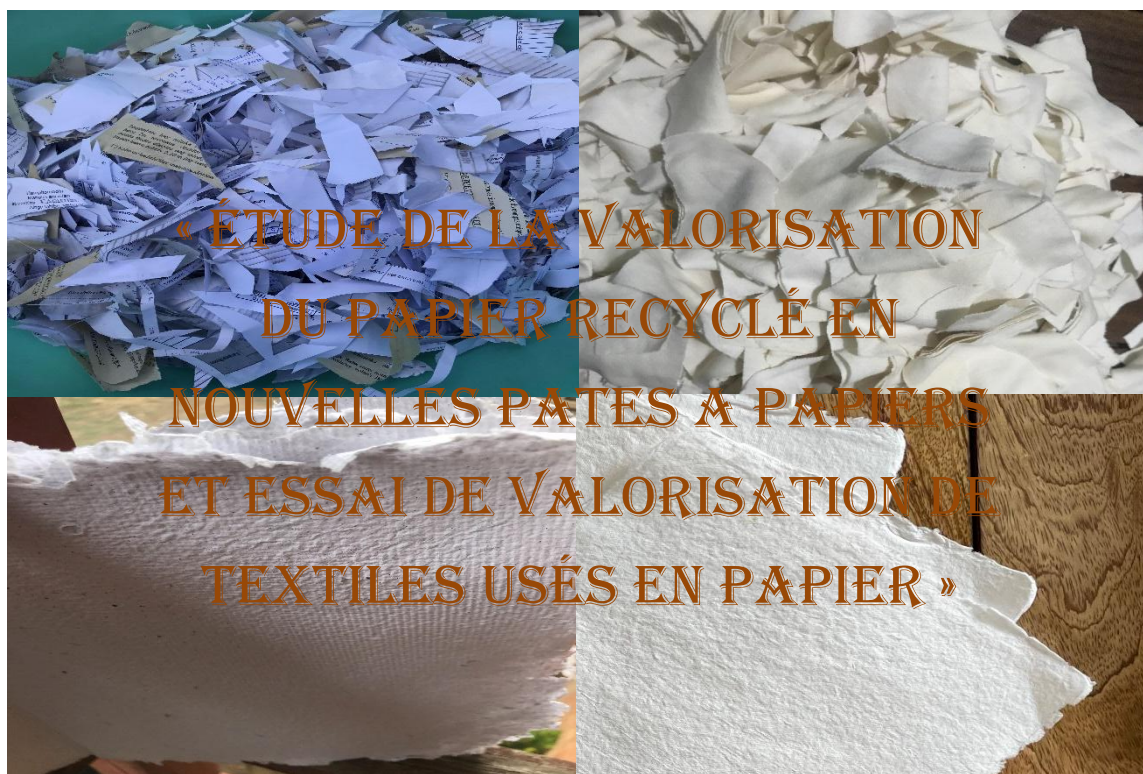


MENTION : GÉNIE INDUSTRIEL

PARCOURS : GÉNIE DE PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

Mémoire de Fin d'Études en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER, TITRE INGÉNIEUR EN GÉNIE  
DES PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS**



Présenté par : HERIMANANTSOA Miora

Promotion 2020





UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

-----  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA  
-----



MENTION : GÉNIE INDUSTRIEL

PARCOURS : GÉNIE DE PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS

Mémoire de Fin d'Études en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER, TITRE INGÉNIEUR EN GÉNIE  
DES PROCÉDÉS CHIMIQUES ET INDUSTRIELS**

**« ÉTUDE DE LA VALORISATION DU PAPIER  
RECYCLÉ EN NOUVELLES PÂTES À PAPIERS  
ET ESSAI DE VALORISATION DE TEXTILES  
USÉS EN PAPIER »**

**Président :** Monsieur ANDRIANARISON Edouard Ravalison, Maître de conférences

**Rapporteur :** Monsieur RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, Docteur

**Examineurs :** Madame ELISOAMIADANA Philippine, Docteur

Monsieur RAZAFIMANDEFITRA André, Assistant

Monsieur RANAIVOSAMOELINA Noelson, Assistant

**Promotion 2020**

**Soutenue le 01<sup>er</sup> février 2022**

# **REMERCIEMENTS**

Avant toute présentation de ce travail de mémoire, je tiens à exprimer mes vifs remerciements les plus sincères tout particulièrement à :

- ❖ M.RAJAONARISON Eddie Franck, Professeur, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra qui a permis, grâce aux différents organismes sous sa direction, d'assurer le bon déroulement de nos années d'études.
- ❖ M.RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Professeur, Chef du département Génie des Procédés Chimiques et Industriels qui m'a autorisé à faire la présentation de ce mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master II en Génie des Procédés Chimiques et Industriels.
- ❖ M.RAVONISON Elie, Docteur, chef de la mention génie industriel de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra (IES-AV).
- ❖ M.RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, Docteur, d'avoir bien voulu m'encadrer et de son précieux conseil.

Je tiens également à remercier les membres du jury présidés par Professeur ANDRIANARISON Edouard Ravalison : Docteur ELISOAMIADANA Philippine, Monsieur RAZAFIMANDEFITRA André et Monsieur RANAIVOSAMOELINA Noelson, pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants et enseignantes de la mention Génie industriel/Génie des Procédés Chimiques et Industriels, ainsi que les personnels de laboratoire de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Je remercie également toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

J'adresse aussi ma plus grande gratitude à l'égard de toute ma famille, mes amis, qui m'ont soutenu pendant mes études à l'IESAV et surtout pendant la préparation et la réalisation de ce mémoire.

# **SOMMAIRE**

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE .....                                                                 | 1  |
| PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE                                                            |    |
| I. LE PAPIER .....                                                                          | 4  |
| I.1. GENERALITES SUR LE PAPIER.....                                                         | 4  |
| I.2. PROCEDES DE FABRICATION DU PAPIER .....                                                | 5  |
| I.3. PROPRIETES ET DIFFERENTS TYPES DE PAPIER .....                                         | 26 |
| I.4. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SUR LA SANTE PUBLIQUE DE<br>L'INDUSTRIE PAPETIERE..... | 28 |
| II. LE TEXTILE .....                                                                        | 34 |
| II.1. TOUT SUR LE TEXTILE .....                                                             | 34 |
| II.2. ETUDE DE VALORISATION DES TEXTILES USES EN PAPIER .....                               | 44 |
| PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE                                                             |    |
| III. VALORISATION DE PAPIER RECYCLÉ EN NOUVELLES PÂTES À PAPIER .....                       | 51 |
| III.1.OBJECTIF DE L'ETUDE .....                                                             | 51 |
| III.2.PREPARATION DE LA PATE .....                                                          | 51 |
| III.3.TRANSFORMATION DE LA NOUVELLE PATE EN PAPIER RECYCLE EN PAPIER ....                   | 55 |
| III.4.DISCUSSION SUR LES PRODUITS OBTENUS.....                                              | 57 |
| IV. ESSAI DE VALORISATION DE TEXTILE USÉS EN PAPIER .....                                   | 58 |
| IV.2. PREPARATION DE LA PATE A PAPIER.....                                                  | 58 |
| IV.3. TRANSFORMATION DE LA PATE EN FEUILLE DE PAPIER.....                                   | 62 |
| IV.4. DISCUSSIONS SUR LES PRODUITS OBTENUS .....                                            | 63 |
| CONCLUSION .....                                                                            | 65 |
| RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE ET WEBOGRAPHIQUE.....                                             | 66 |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                    | 70 |

## **GLOSSAIRE**

**Résineux** : qui provient d'un arbre résineux, qui contient de la résine

**Décantable** : susceptible d'être séparé par décantation

**Ingraisable** : se dit d'un papier résistant à la pénétration des corps gras

**Monofilament** : filament textile unique de grande longueur, obtenu dans la fabrication des textiles artificiels ou synthétiques

**Ignifugeant** : composé ajouté à un matériau macromoléculaire pour supprimer ou atténuer son aptitude à la combustion.

**Résinique** : acide extrait de la gamme de pin

**Buchettes** : gros éléments de fibres accolées

**Défilage** : séparation mécanique des fibres élémentaires du bois en vue de la fabrication de la pâte à papier

**Diterpénique** : qui se rapporte aux diterpènes

**Macroporeuse** : état de surface d'un papier d'impression dont les pores sont relativement gros.

**Offset** : papier basique dit « bureautique » amidonné dont la surface n'est pas lisse comme celle des papiers couchés. Papier avec une forte main, une très bonne opacité et une excellente rigidité.

**Organochlorés** : se dit d'un composé organique de synthèse dérivé du chlore

**Mazout** : résidu de la distillation du pétrole, liquide épais, visqueux, brun, utilisé comme combustible

**Trituration** : réduction d'un corps solide en petites pièces ou en poudres

## **ACRONYME**

| ABREVIATION      | SIGNIFICATION                                     |
|------------------|---------------------------------------------------|
| %                | Pour cent                                         |
| CO <sub>2</sub>  | Dioxyde de carbone                                |
| Cl <sub>2</sub>  | Dichlorine                                        |
| COV              | Composés organiques volatils                      |
| DBO              | Demande biologique en oxygène                     |
| DCO              | Demande chimique en oxygène                       |
| ° C              | Degré celcius                                     |
| TNT              | Textile non tissé                                 |
| Kg/h             | Kilogramme par heure                              |
| Mn               | Minute                                            |
| AOX              | Composés halogénés adsorbables                    |
| PCTM             | Pâte chimico-thermomécanique                      |
| PTM              | Pâte thermomécanique                              |
| UV               | Ultraviolet                                       |
| µm               | Micromètre                                        |
| ISO              | International Organisation for<br>Standradisation |
| g/m <sup>2</sup> | Gramme par mètre carré                            |
| Kg               | Kilogramme                                        |
| PPO              | Papier Pour Ondulé                                |
| BD               | Bande-dessinée                                    |

## **LISTE DES ILLUSTRATIONS**

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Structure d'une fibre de bois .....                                                 | 7  |
| Figure 2 : La cellulose en image .....                                                         | 8  |
| Figure 3 : structure de la cellulose .....                                                     | 8  |
| Figure 4 : Principaux constituants de la lignine .....                                         | 9  |
| Figure 5 : Principaux sucres constitutifs des hémicelluloses.....                              | 10 |
| Figure 6 : Schéma représentatif d'un défibreux .....                                           | 11 |
| Figure 7 : Schéma de la fabrication de pâte thermomécanique .....                              | 12 |
| Figure 8 : Schéma de la fabrication de la pâte chimicothermomécanique.....                     | 13 |
| Figure 9 : Schéma d'un pulpeur .....                                                           | 15 |
| Figure 10 : Les étapes de fabrication de pâte de papier à base de papier recyclé .....         | 17 |
| Figure 11 : Les étapes de fabrication du papier .....                                          | 21 |
| Figure 12 : Schéma d'une opération de filature (à anneaux à gauche et open end à droite) ..... | 41 |
| Figure 13 : Schéma d'une machine à tisser traditionnelle .....                                 | 42 |
| Figure 14 : Schéma d'une pile hollandaise .....                                                | 46 |
| Figure 15 : Détail d'une pile hollandaise ancienne.....                                        | 47 |
| Figure 16 : Les étapes de préparation de la pâte à papier .....                                | 54 |
| Figure 17 : Schéma récapitulatif de la fabrication artisanale du papier .....                  | 64 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Composants chimiques des sources de fibres pour la fabrication de pâte de papier (%) .....                            | 6  |
| Tableau 2 : Agent de blanchiment et condition d'utilisation .....                                                                 | 18 |
| Tableau 3 : Total des solides en suspension et DBO enregistrés dans les effluents non traités (bruts) de diverses opérations..... | 32 |
| Tableau 4 : Autres composants de la fibre de coton.....                                                                           | 38 |

## **LISTE DES PHOTOS**

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| Photo 1 : Papier en morceau .....      | 52 |
| Photo 2 : Bouillie de papier .....     | 53 |
| Photo 3 : Broyage de la pâte .....     | 53 |
| Photo 4 : Pâte broyée .....            | 54 |
| Photo 5 : Pulpe dans l'eau .....       | 55 |
| Photo 6 : Tamisage de la pulpe.....    | 56 |
| Photo 7 : Papier en pâte recyclée..... | 57 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Photo 8 : Matière première .....                            | 59 |
| Photo 9 : Tissus en morceau .....                           | 59 |
| Photo 10 : Trempage des morceaux de tissus dans l'eau ..... | 60 |
| Photo 11 : Cuisson des morceaux de tissu .....              | 61 |
| Photo 12 : Pulpe de chiffon.....                            | 61 |
| Photo 13 : Feuille mise en forme .....                      | 62 |
| Photo 14 : Feuilles de papier en chiffon obtenues.....      | 63 |

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Bien que nous puissions le tenir pour acquis, le papier est toujours avec nous, documentant notre monde et nous rappelant les possibilités illimitées de la vie. Inventé par les Chinois il y a 2000 ans, le papier est depuis utilisé comme support de communication. Initialement, le papier était fabriqué à partir de fibres d'écorce de mûrier, de papyrus, de paille ou de coton. Le bois n'est apparu comme la principale matière première pour la production de masse de papier qu'au milieu du XIXe siècle.

La page imprimée est immédiate, son message transcende les cultures ; une expérience tactile qui demande de l'attention et crée du désir. C'est un passeport pour la connaissance, un support de stockage, un outil de persuasion et une forme d'art divertissante.

Durant ces dernières décennies, le papier a principalement été fabriqué à partir de fibres de bois provenant d'arbres. Plus de 50 % des forêts défrichées dans le monde sont transformées en livres, journaux, cartons et cartonnages, ou même assez banalement : en papier toilette. À l'échelle mondiale, 42% du bois sert à fabriquer du papier et 17% du bois utilisé est extrait de forêts vierges. Ce sont des forêts naturelles qui possèdent une richesse biologique précieuse et qui doivent être préservées. Bien que la déforestation ne soit pas principalement causée par l'industrie papetière, son impact n'est pas négligeable.

Mais il existe une alternative à la déforestation. En réalité, le papier n'est pas toujours fabriqué à partir de bois. Par exemple, les Égyptiens le fabriquaient en utilisant du papyrus. Et pendant des siècles, l'humanité a écrit sur des peaux d'animaux. Ces dernières années, l'industrie du papier s'est tournée vers ses origines en s'intéressant aux fibres alternatives, donnant alors au « papier sans arbre » (tree free paper) ses lettres de noblesse.

Aujourd'hui, le papier provient de plus en plus de matière recyclée. Il est composé d'au moins 50% de fibres cellulosiques de récupération qui proviennent de déchets de papier imprimé. Sa qualité a longtemps été remise en question : trop absorbant pour l'encre et très poussiéreux, ce qui favorisait le bourrage des

imprimantes. À l'heure actuelle, de nombreux progrès ont été réalisés, contentant ainsi beaucoup d'organismes et d'administrations qui l'utilisent.

Le but de ce mémoire est une « Etude de la valorisation du papier recyclé en nouvelles pâtes à papier et essai de valorisation de textiles usés en papier ». Le principal objectif de ce travail consiste à exploiter les fibres de récupération pour la production de nouvelles pâtes de papier.

Pour atteindre notre objectif, nous adopteront un plan qui se divise en deux parties. Nous allons avancer l'étude bibliographique dans la première partie, ensuite, la seconde sera consacrée à l'étude expérimentale.



PARTIE I : ÉTUDE  
BIBLIOGRAPHIQUE

# **I. LE PAPIER**

## **I.1. GENERALITES SUR LE PAPIER**

### **I.1.1. Définition**

Il existe plusieurs définitions du papier :

- Feuille fabriquée à partir de végétaux réduits en pâte et séchés, servant à écrire e à emballer. [1]
- Feuille sèche et mince, faite de substances végétales réduites en pâte pour écrire, imprimer, envelopper, essuyer, absorber.[2]
- Matériau en feuilles minces fabriqué à partir de fibres végétales. C'est un support d'écriture et de dessin avec de nombreuses autres applications. [3]
- Matière se présentant en feuilles minces et sèches composée essentiellement de fibres ou de morceaux de fibres adhérant les uns aux autres. (Le papier a un grammage inférieur à 224 g. Au-dessus de cette valeur il s'agit de carton.) [4]
- Le papier est un matériau à structure poreuse, anisotrope (ses propriétés varient selon la direction considérée), constitué essentiellement de fibres cellulosiques enchevêtrées, réparties en feuille mince, et agglutinées par des liaisons naturelles de type hydrogène (liaisons –OH ou hydroxyles).[5]
- Matière à base de cellulose, faite de fibres végétales naturelles ou transformées, réduites en une pâte homogène que l'on étend et sèche pour former une feuille mince. [6]

### **I.1.2. Historique**

La naissance du papier reste à l'heure actuelle un sujet à controverse. Certains affirment que le papier serait né durant le règne de l'empereur Wu entre 140 et 86 avant l'ère chrétienne, d'autres qu'il serait né en Chine vers la fin du IIIe siècle avant l'ère chrétienne, sous le règne de l'empereur Chiuangdi (dynastie des Qin). Quoiqu'il en soit, tous s'accordent pour dire que le papier est né en Chine il y a de ça plus de 2000 ans. [7][8][9]

C'est vers 105 après J.C. que Ts'ai Lun, ministre chinois de l'agriculture, a l'idée géniale d'utiliser des fibres de bambou, des écorces d'arbres, du lin en plus du chanvre pour la fabrication du papier.

En 751, après la bataille de Samarkand, les Arabes comprennent l'intérêt que pourrait avoir le papier pour propager l'Islam. En progressant vers l'Occident, les Arabes sèment des moulins à papier sur leur chemin : Bagdad (793), Damas (IX<sup>e</sup> siècle), Le Caire (900), Maroc, Espagne (1056), Sicile (1102), Italie (1276), France (1348).

En 1445, l'invention de l'imprimerie par Johannes Gutenberg (1400-1468) bouleverse l'histoire du papier. Les manuscrits étant beaucoup plus faciles à produire, la demande de papier explose. Des papeteries éclosent un peu partout en Europe, en particulier en Espagne, en Italie et en France qui se hisse très vite au premier rang mondial des nations papetières. A cette époque, les papetiers utilisent des chiffons et du lin pour fabriquer du papier.

En 1798, le français Nicolas Louis Robert invente une machine à papier capable de produire du papier en continu. Une version améliorée de cette machine est brevetée en 1807 par les frères Fourdinier.

En 1843, l'allemand Friedrich Gottfried Keller fabrique la première pâte à papier obtenue à partir de bois. En 1885, la pâte à papier mécanique est devenue la matière première principale pour la production du papier journal.

Dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, des procédés chimiques sont mis au point pour la fabrication du papier à partir du bois. S'en suivront des améliorations successives qui feront passer la fabrication du papier, du stade artisanal à l'industrie lourde telle que nous la connaissons aujourd'hui.

## **I.2. PROCÉDES DE FABRICATION DU PAPIER**

### **I.2.1. Les matières de base**

La pâte à papier est le matériau de base. Elle peut être produite à partir de différents composants incluant notamment : **le bois et d'autres matières ligno-cellulosiques** (bagasse de canne à sucre, paille) ; **le papier recyclé** (dans le cas du

recyclage) ; **les plantes fibreuses** comme le chanvre ou le lin ; **le tissu** (chiffons de coton) ; et **le crottin** (de cheval ou d'éléphant par exemple). [7][10]

La fibre végétale est l'élément essentiel le plus répandu à la fabrication de la pâte à papier. Il est donc important d'en comprendre la structure et la composition chimique avant d'étudier l'aspect procédé.

La matière végétale est très variée : bois feuillus ou résineux, plantes annuelles et résidus agricoles tels que les pailles de céréales. Cependant, ces végétaux ont une structure fibreuse commune. Les principaux constituants de la fibre végétale sont la cellulose, la lignine et les hémicelluloses et leur proportion varie selon le type de végétaux :

**Tableau 1 : Composants chimiques des sources de fibres pour la fabrication de pâte de papier (%)**

|                                        | Bois tendre | Bois durs | Paille | Bambou | Coton |
|----------------------------------------|-------------|-----------|--------|--------|-------|
| $\alpha$ -cellulose                    | 38-46       | 38-49     | 26-43  | 26-43  | 80-85 |
| Hémicelluloses                         | 23-31       | 20-40     | 15-26  | 15-26  | nd    |
| Lignine                                | 22-34       | 16-30     | 20-32  | 20-32  | nd    |
| Matières extractibles                  | 1-5         | 2-8       | 0,2-5  | 0,2-5  | nd    |
| Minéraux et autres matières organiques | 0,1-7       | 0,1-11    | 1-10   | 1-10   | 0,8-2 |

Nd=donnée non disponible  
(Source : [www.ilocis.org](http://www.ilocis.org))

De manière simplifiée, la matière végétale est constituée de cellules reliées entre elles par un squelette rigide formé d'une succession de parois. Ces parois sont caractérisées par l'orientation des fibres de cellulose ainsi que par la proportion de lignines et d'hémicelluloses, qui assure la cohésion de la fibre végétale.

A titre d'illustration, voici la structure d'une fibre de bois :

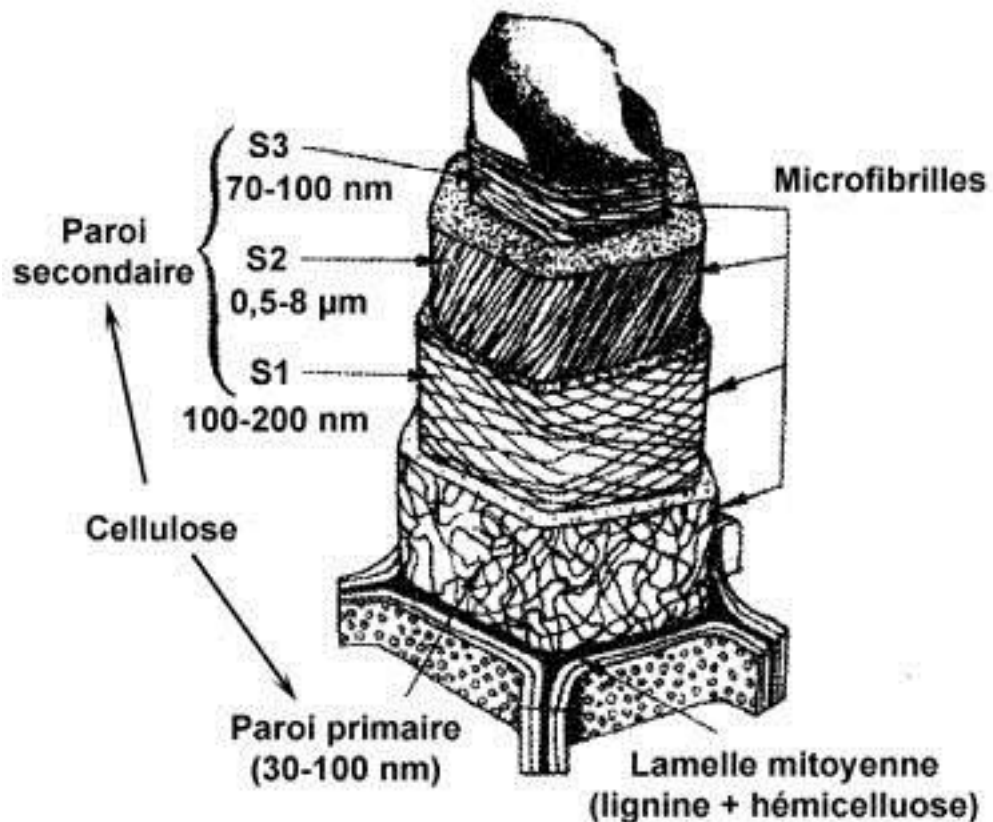


Figure 1 : Structure d'une fibre de bois

(Source : [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))

Décrivons brièvement les constituants de la matière végétale, en mettant l'accent sur la différence entre bois et paille.

#### ❖ La cellulose

La cellulose est l'un des polymères les plus abondants trouvés dans la nature. C'est de loin la molécule organique la plus abondamment produite par photosynthèse : sa formation annuelle est estimée à 180 milliards de tonnes.

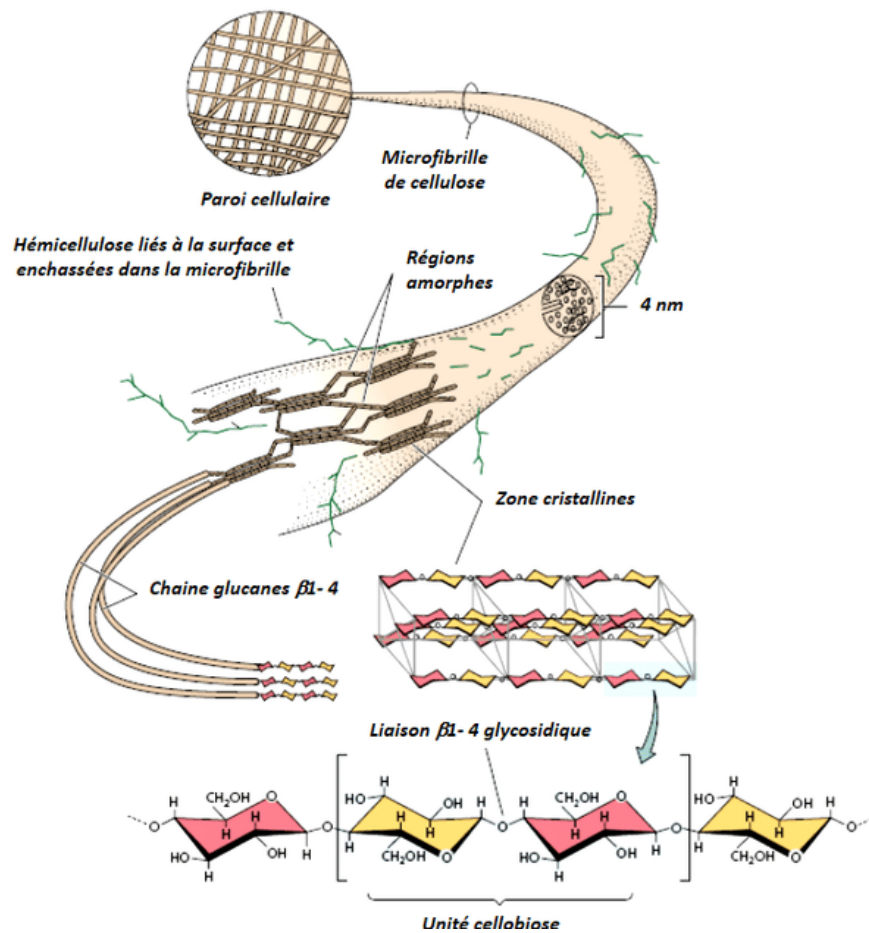


Figure 2 : La cellulose en image  
(Source : [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org))

La cellulose est faite d'unités de monomère glucose. Puisque la cellulose est construite à partir d'un monomère de sucre, on l'appelle polysaccharide.

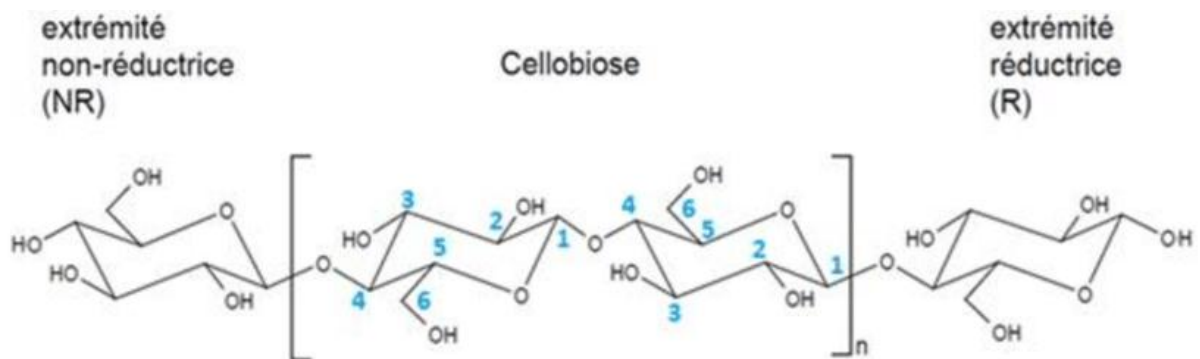


Figure 3 : structure de la cellulose  
(Source : [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))

### ❖ Les lignines

La lignine est, après la cellulose, la matière renouvelable la plus abondante à la surface de la terre. La lignine, ou plus exactement les lignines, sont des polymères complexes ayant des fragments aliphatiques et aromatiques. Leurs compositions sont différentes suivant les espèces végétales. Toutefois, toutes les lignines sont constituées d'unités phénylpropanes dérivées de trois alcools : synapylique, coniférylique et coumarylique.

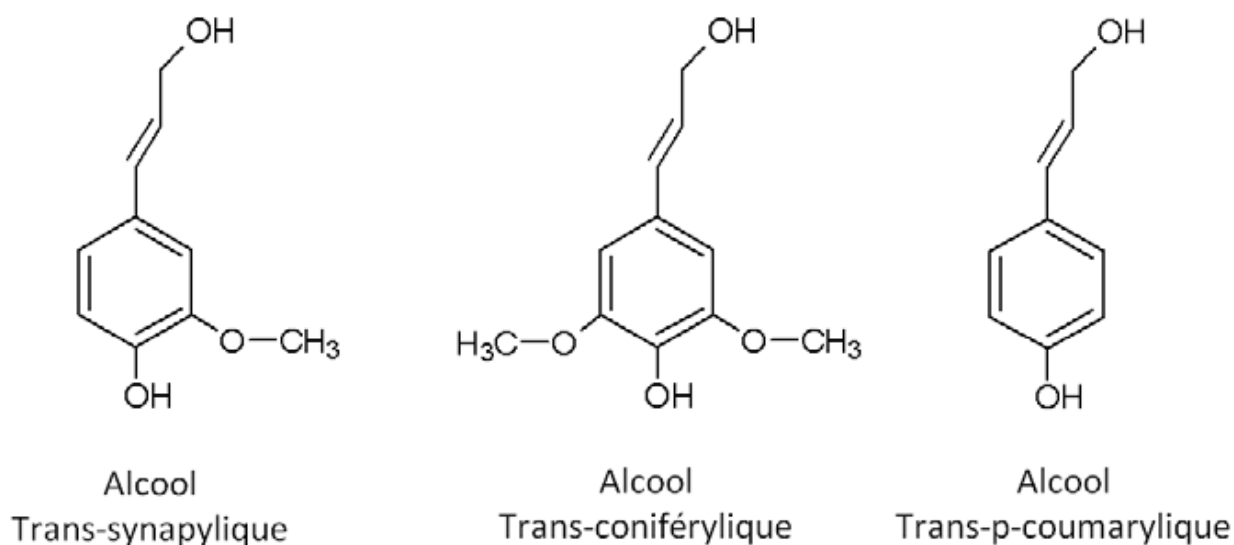


Figure 4 : Principaux constituants de la lignine  
(Source : hmf.enseeiht.fr)

La lignine de la paille de blé et des autres plantes graminées se distingue des lignines de bois résineux ou feuillus par leur haute teneur en liaisons esters.

### ❖ Les hémicelluloses

Les hémicelluloses, correspondent à des polysaccharides. Ce sont des hétéropolysaccharides, souvent ramifiés, avec un degré de polymérisation d'environ 150, soit dix fois moins que la cellulose native. Leur hydrolyse conduit aux monomères constitutifs tels que le xylose, le glucose et l'arabinose.

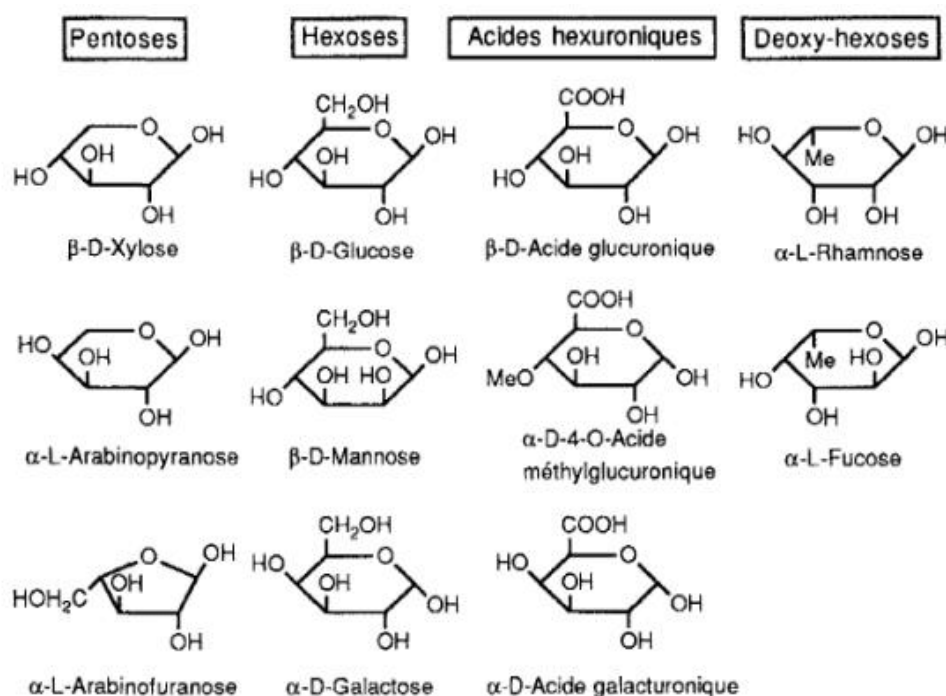


Figure 5 : Principaux sucres constitutifs des hémicelluloses

(Source : hmf.enseeiht.fr)

Les hémicelluloses de la paille de céréales sont constituées essentiellement d'unités de xylose; elles présentent un degré de polymérisation plus faible que celui des hémicelluloses des bois feuillus et des bois résineux.

## **I.2.2. Préparation de la pâte à papier**

### **I.2.2.1. Pour les pâtes vierges**

L'étape de fabrication de pâte à papier à base de matières végétales comme le bois est souvent la même.[10][11]

Le bois passe par la séparation des fibres de la lignine dans la matière végétale. Pour réaliser ce phénomène, plusieurs procédés existent. Voici les différents modèles d'obtention de pâte à papier :

#### **a) Les pâtes mécaniques ou thermomécaniques**

On regroupe sous cette appellation un certain nombre de pâtes dont le procédé de fabrication est majoritairement mécanique. Le procédé de base purement

mécanique permet d'obtenir la pâte de meule, les autres procédés ajoutent dans le process des actions thermiques ou chimiques.

*i. **Pâte de meule (SGW Stone Groundwood)***

Les rondins sont râpés sur une meule abrasive ou défibreur. La chaleur dégagée aide au ramollissement de la lignine. Cette meule est humidifiée, car l'eau refroidit la meule ce qui empêche également le bois de brûler, lave la surface de la meule et entraîne la pâte. Il faudra pour ce procédé essentiellement des fibres longues car elles sont plus résistantes (cellules à parois plus épaisses). La pâte obtenue présente donc des fragments de fibres, toujours liées par la lignine, des bûchettes, des fibres longues, des fibres courtes et des éléments fins qui serviront à améliorer la résistance à la traction ou l'opacité du papier.

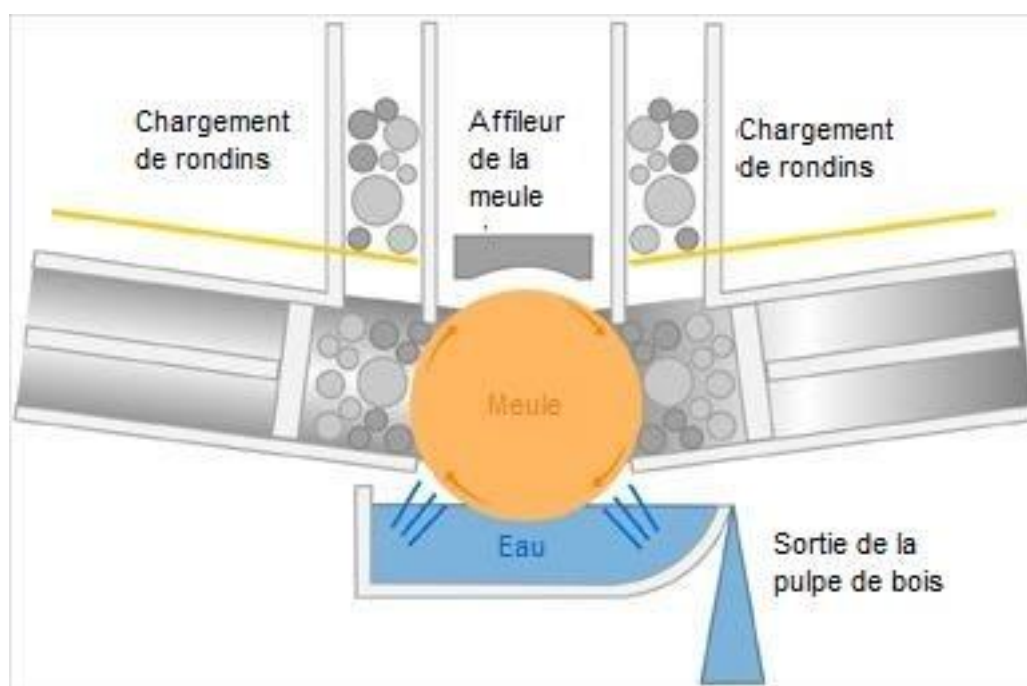


Figure 6 : Schéma représentatif d'un défibreur  
(Source : [www.fut-carton.com](http://www.fut-carton.com))

*ii. **Pâte de meule sous pression (PGW Pressurized Groundwood)***

Cette pâte est obtenue par amélioration du procédé précédent, par action de la température et de la pression, ce qui permet l'obtention d'une proportion plus importante de fibres longues.

iii. **Pâte de raffineur (RMP Refiner Mechanical Pulp)**

L'obtention de la pâte de raffineur fait intervenir un procédé dérivé du précédent, qui convient mieux aux feuillus. Il consiste à faire passer non plus des rondins mais des copeaux dans des disques. La pâte obtenue se trouve moins dégradée.

iv. **Pâte thermomécanique (TMP Thermomechanical Pulping)**

Pour obtenir cette pâte, le procédé utilisé associe un étuvage des copeaux à la vapeur à une température supérieure à 100°C, à un défilage sous pression puis un défilage en atmosphère ambiante. Les caractéristiques des pâtes ainsi préparées sont meilleures, et on augmente encore la proportion de fibres longues.

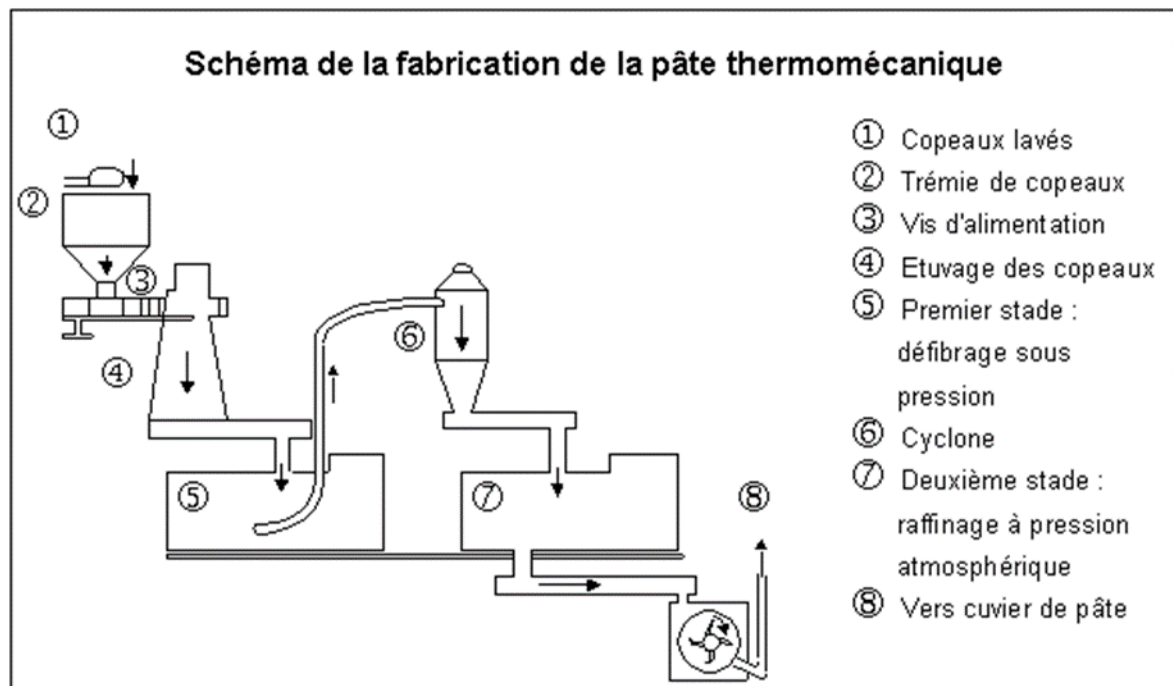


Figure 7 : Schéma de la fabrication de pâte thermomécanique  
(Source : CTP – ADEME. Energie et Environnement dans l'industrie Papetière. Mai 1996)

v. **Pâte chimiothermomécanique (CTMP Chemi Thermomechanical Pulping)**

Cette pâte s'obtient par un défilage sous pression suivi d'une imprégnation chimique en présence de soude et de bisulfite de soude à une température toujours supérieure à 100°C. Toutes ces pâtes sont appelées pâtes à haut rendement. Elles ont ensuite besoin d'être classées (tri des fibres), épurées (élimination des impuretés) et

généralement blanchies suivant leur utilisation, mais devront de préférence être utilisées sur site car le séchage détruit une bonne partie de leurs caractéristiques mécaniques.

Pour la commercialisation, elles sont séchées sous forme de flocons et vendues en balles de 200 à 300 kg. Elles entrent dans la composition du papier journal, du papier pour magazines, et à moindre échelle dans celle des papiers à usage graphique (édition, bureau, écriture, enveloppe, affiche, imprimante), du carton, des papiers sanitaires et domestiques. Globalement ces pâtes à haut rendement ont les caractéristiques suivantes : caractéristiques mécaniques plus faibles que les pâtes chimiques, prix de revient faible puisque le rendement est élevé, bonne opacité, bonne aptitude au calandrage, bonne imprimabilité, mauvais vieillissement, peluchage.

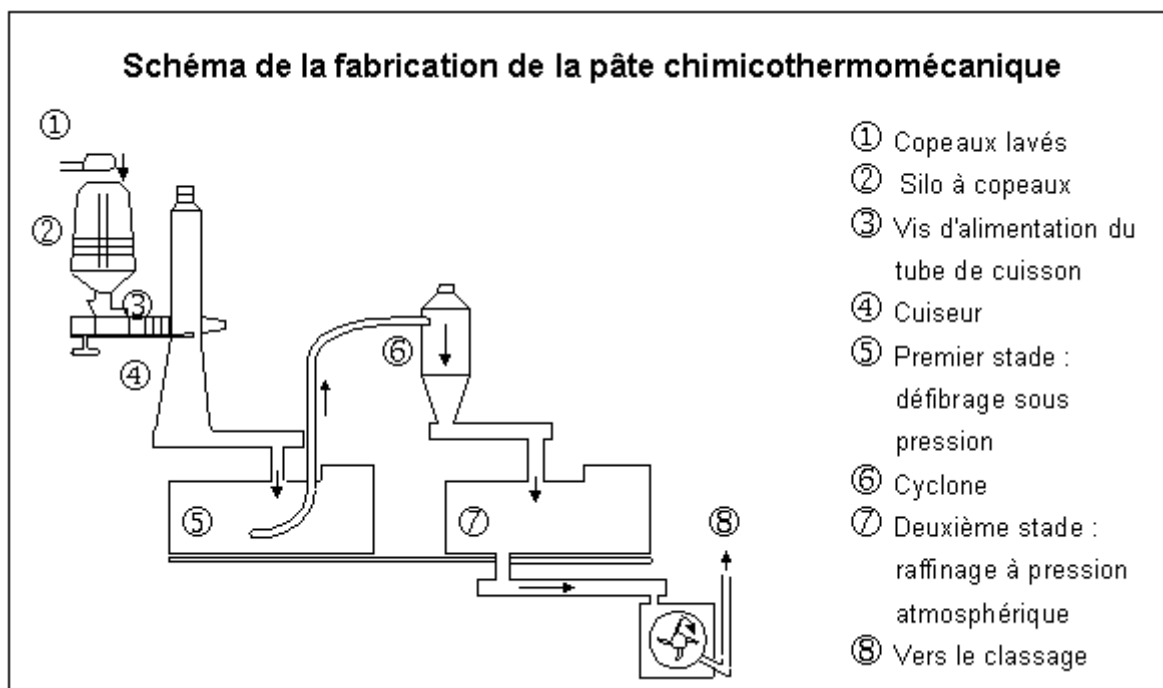


Figure 8 : Schéma de la fabrication de la pâte chimithermomécanique  
 (Source : CTP – ADEME. Energie et Environnement dans l'industrie Papetière. Mai 1996)

## b) Les pâtes chimiques

Deux grands types de pâtes existent selon le produit chimique utilisé [11][12]:

- Le procédé acide au bisulfite
- Le procédé alcalin ou procédé kraft

Ces procédés s'adaptent aux feuillus et aux résineux. Le principe consiste à cuire les copeaux dans un réacteur chimique appelé lessiveur, avec une « liqueur blanche », liquide constitué des agents chimiques. Cette cuisson se fait à chaud, de 130 à 180°C, sous pression pendant 2 à 5 heures suivant l'essence du bois. Après ce traitement, les copeaux obtenus en suspension dans la « liqueur noire », liquide contenant les produits chimiques et la lignine dissoute.

Par un mécanisme de défibrage, les fibres sortent individualisées et souples. Il reste à procéder aux étapes de lavage, classage, épuration et éventuellement blanchiment. Cette pâte peut être séchée ou utilisée sur site. Dans le premier cas, elle se présente sous la forme de feuilles épaisses.

*i.*            **Procédé alcalin**

Les caractéristiques de la pâte obtenue par un procédé alcalin (cuisson courte de 2 h) sont une bonne résistance mécanique, un bon indice d'éclatement et de déchirure et une bonne longueur de rupture. Par contre, cette pâte sera plus difficile à blanchir qu'une pâte issue d'un procédé acide. Cette pâte sera utilisée dans l'emballage, pour les papiers impression-écriture lorsqu'elle est blanchie, ou encore en mélange.

*ii.*           **Procédé acide**

Le procédé acide (cuisson longue de 5 heures) confère au papier des caractéristiques mécaniques plus faibles surtout en déchirure, mais la pâte est plus claire, se raffine plus vite et se blanchit plus facilement sans chlore. Cependant, pour des raisons environnementales, elles ne sont presque plus utilisées, sauf pour les papiers très raffinés comme les ingraissables, ou encore pour les ouates de cellulose car elle apporte souplesse, douceur et possède des qualités d'absorption.

**c)        Les pâtes chimico-mécaniques**

Bien sûr il existe des traitements mixtes qui combinent une action chimique et une action mécanique. Ces pâtes sont assez peu utilisées en réalité, on les retrouve essentiellement en cannelure, car les fibres sont individualisées et ont gardé un peu de lignine ce qui les rigidifie et leur donne une qualité de résistance à la compression.

### **I.2.2.2. Pour les pâtes à papier recyclé**

Le papier recyclé est l'une des ressources essentielles pour la protection de l'environnement. En effet, la réutilisation de ce matériau précieux réduit la nécessité de couper de nouveaux arbres. Cela constitue un avantage non négligeable, dans une période historique où le problème de la déforestation est très actuel.

L'idée est de transformer les vieux papiers en pâte, puis d'affiner, nettoyer et dépolluer éventuellement cette pâte, qui servira de base pour la fabrication d'un nouveau papier. Trois étapes sont nécessaires [13] :

- Le pulpage et défibrage
- L'épuration
- Le désencrage

#### **a) Le pulpage et défibrage**

Les produits papier-cartons usagés sont d'abord placés dans un pulpeur. C'est une cuve cylindrique remplie d'eau et d'adjuvants divers et munie d'un agitateur puissant. Le papier en suspension dans l'eau va alors se décomposer en rompant les liaisons entre les fibres de cellulose. Les produits résiduels qu'il pourrait contenir sont alors isolés.

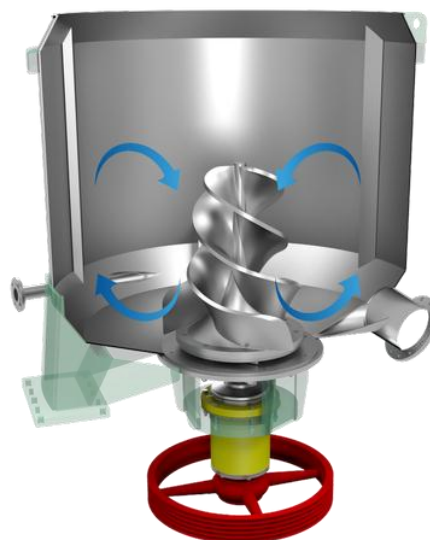


Figure 9 : Schéma d'un pulpeur  
(Source : m.indiamart.com)

## **b) L'épuration**

On va nettoyer afin de dépolluer le papier. L'épuration sépare les fibres des éléments qui leur sont associés : colles, vernis, peintures, agrafes. Pour éliminer les impuretés on va filtrer et cycloner. Le filtrage est classique puisqu'on va récupérer les impuretés en fonction de leur taille pour ensuite les séparer en fonction de leur densité. Le cyclonage va donc être comme son nom l'indique une rotation très rapide du papier, comme dans une centrifugeuse. Les éléments les plus denses se concentrent à la périphérie et les moins denses au centre.

## **c) Le désencrage et pressage à chaud**

Ils sont nécessaires uniquement pour la fabrication de pâte blanche. Ce procédé est essentiellement utilisé dans le cas du recyclage des papiers graphiques, types magazines. Il faut, en effet, supprimer encres et teintures utilisées. On va alors ajouter un savon à la pâte, et des bulles d'air créées vont transiter à la surface du papier. Les particules d'encre vont venir se coller aux bulles qui parcourent le papier ; puis, elles vont remonter à la surface. On crée ainsi une « boue de désencrage », qui est en fait une sorte de mousse qu'on aspire et qu'on rejette.

Les fibres rejoignent ensuite le procédé habituel de fabrication du papier-carton. Elles sont déposées sur une toile en mouvement où elles s'égouttent pour former une feuille qui sera pressée et séchée sur des cylindres chauffés à la vapeur. Une nouvelle feuille de papier ou de carton est ainsi fabriquée. Éventuellement, on prendra soin de la blanchir en la diluant avec une pâte de meilleure qualité (pâte vierge ou papiers recyclés de haute qualité), ou en injectant du peroxyde d'hydrogène pour que vos ramettes de papier recyclé n'aient plus cette couleur grisâtre ou jaunâtre.

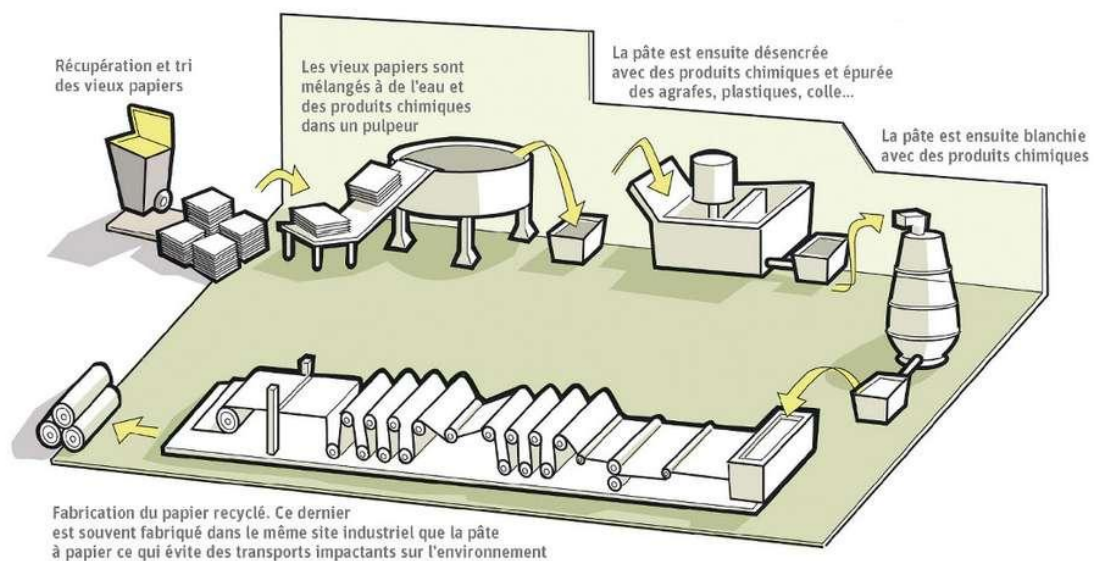


Figure 10 : Les étapes de fabrication de pâte de papier à base de papier recyclé  
(Source : [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com))

### **I.2.3. Traitement de la pâte**

#### **I.2.3.1. Principe du blanchiment**

La couleur des pâtes fabriquées d'après les procédés évoqués précédemment est plus ou moins claire et nécessite un éclaircissement sauf pour certaines applications dans l'emballage. Lorsqu'il n'y a pas de blanchiment, la pâte est dite écrue. On peut distinguer le blanchiment des pâtes chimiques et l'éclaircissement des pâtes mécaniques [11][14] [15]:

- ❖ **Dans le cas des pâtes mécaniques**, l'objectif est de conserver le rendement élevé. La couleur brune de la pâte est due à la présence de composés dérivés de la lignine, les quinones, qui possèdent des groupements carbonyles  $C=O$ . Les traitements actuels de ces pâtes sont réalisés à l'aide de réactifs non chlorés, les peroxydes ou l'hydrosulfite de sodium. Le principe consiste à modifier les groupements chromophores de la lignine permettant l'éclaircissement de la pâte. Mais ce procédé est réversible sous l'action de la lumière, ce qui cause le jaunissement des papiers, par exemple celui des journaux.
- ❖ **En ce qui concerne le blanchiment des pâtes chimiques**, le problème est plus complexe car il faut dissoudre la lignine résiduelle. Le blanchiment consiste

à mélanger la pâte dans un "mixeur" avec le réactif choisi puis à le faire réagir dans une tour de blanchiment. Après réaction, on extrait les jus de blanchiment et la pâte est lavée puis filtrée. Les réactifs utilisés sont de nos jours le chlore gazeux, l'hypochlorite de soude (l'eau de javel), le dioxyde de chlore, le peroxyde d'hydrogène (l'eau oxygénée), l'oxygène et l'ozone.

Chaque étape est définie par l'agent employé, le pH (acidité), la température et la durée. Après chacune des étapes du blanchiment, on peut laver la pâte avec de la soude caustique pour retirer les produits chimiques résiduels et la lignine dissoute. A l'issue de la dernière étape, on fait passer la pâte à travers une série de cribles et de filtres pour la débarrasser de contaminants tels que poussières ou plastiques. Elle est ensuite concentrée puis stockée. [16]

Le tableau suivant illustre les différents agents de blanchiment et leur condition d'utilisations :

**Tableau 2 : Agent de blanchiment et condition d'utilisation**

| Réactifs utilisés                                            | Concentration de réactif(%) | pH    | Consistance (%)* | Température (°C) | Durée (h)  |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------|------------------|------------|
| Gaz chlore ( $\text{Cl}_2$ )                                 | 2,5-8                       | 2     | 3                | 20-60            | 0,5-1,5    |
| Hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ )                        | 1,5-4,2                     | 11    | 10-12            | $\leq 80$        | 1-2        |
| Gaz dioxyde de chlore ( $\text{ClO}_2$ )                     | $\geq 1$                    | 0-6   | 10-12            | 60-75            | 2-5        |
| Hypochlorite de sodium ( $\text{NaOCl}$ )                    | 1-2                         | 9-11  | 10-12            | 30-50            | 0,5-3      |
| GazOxygène ( $\text{O}_2$ )                                  | 1,2-1,9                     | 7-8   | 25-33            | 90-130           | 0,3-1      |
| Péroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )              | 0,25                        | 10    | 12               | 35-80            | 4          |
| GazOzone ( $\text{O}_3$ )                                    | 0,5-,3,5                    | 2-3   | 35-55            | 20-0             | $\leq 0,1$ |
| Gaz dioxyde de soufre( $\text{SO}_2$ )                       | 4-6                         | 1,8-5 | 1,5              | 30-50            | 0,25       |
| Hydrosulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) | 1-2                         | 5,5-8 | 4-8              | 60-65            | 1-2        |

\* concentration de fibre dans la solution aqueuse

(Source : [www.ilocis.org](http://www.ilocis.org))

### **I.2.3.2. Exemple : principe de blanchiment au peroxyde d'hydrogène**

Le peroxyde d'hydrogène, soluble en milieu alcalin, se présente sous la forme d'un liquide incolore. Il se décompose rapidement en milieu alcalin en présence de contaminants tels que les métaux ainsi qu'à forte température. Sa décomposition provoque une perte en peroxyde ainsi que la formation de radicaux libres qui attaquent

les fibres (perte de résistance mécanique). Le peroxyde d'hydrogène est connu plutôt comme un agent blanchissant à des températures d'environ 60°C. [12] [17]

En effet, en milieu alcalin :



L'anion perhydroxyl  $\text{--OOH}$  est un excellent agent de blanchiment car il attaque les carbonyles :



L'application principale du peroxyde d'hydrogène est le blanchiment des pâtes mécaniques. En revanche il a peu d'effet sur la destruction des colorants contenant des liaisons  $\text{C=C}$  ou des noyaux aromatiques fortement conjugués.

#### ❖ Effet du pH, de la température et du temps de réaction

- Plus le pH est élevé, plus il y a formation d'anion perhydroxyl donc plus le blanchiment est efficace. Néanmoins, il a été démontré que pour des pH atteignant 10 ou 11, les pâtes avec bois présentent un caractère jaunissant. Dans le traitement des papiers récupérés, il convient donc de ne pas travailler au-delà de 11 unités de pH.
- Plus la température est élevée, plus la réaction de blanchiment est rapide. Si cette température est trop importante, elle va également accélérer la décomposition du peroxyde et entraîner un jaunissement des pâtes avec bois. Toutefois, des études (Grundstrom, 1996) ont montré que de hautes températures – de l'ordre de 100°C – améliorent sensiblement l'efficacité du blanchiment peroxyde d'un mélange de papiers de bureau récupérés car le peroxyde devient délignifiant à cette température.
- La blancheur augmente avec le temps de réaction. Toutefois, des temps de réaction trop longs induisent une réversion de blancheur. Afin d'éviter ce phénomène, il est nécessaire de conserver, en fin de blanchiment, 15 à 20% de peroxyde résiduel.

- Enfin, il est à noter qu'un accroissement de la quantité de peroxyde n'apporte aucun gain de blancheur supplémentaire à partir de 2% d'agent de blanchiment

## **I.2.4. Transformation de la pâte en papier**

### **I.2.4.1. Les différentes étapes de la transformation de la pâte en papier**

Les produits finis qui sortent des usines de pâtes et de papiers dépendent du processus de fabrication de la pâte et peuvent comprendre de la pâte commerciale ainsi que différents types de papier ou de carton.[18] [19]

Ainsi, la pâte mécanique, relativement fragile, est transformée en produits à usage unique comme le papier journal et le papier de soie. La pâte kraft est transformée en produits à usages multiples: papier fin pour l'écriture, livres, sacs d'épicerie, etc.

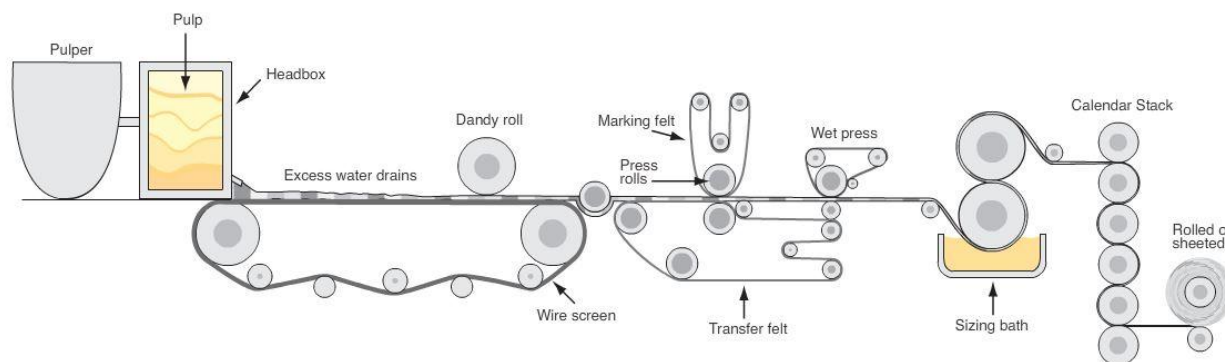
La pâte au bisulfite, essentiellement à base de cellulose, peut servir à fabriquer différents produits commerciaux: papiers spéciaux, rayonne, pellicule photographique, TNT, plastiques, adhésifs et même mélanges pour gâteaux et crèmes glacées.

Les pâtes chimico-mécaniques possèdent une rigidité idéale pour la fabrication de carton ondulé. Les fibres des pâtes fabriquées à partir de papier recyclé sont habituellement plus courtes, moins souples et moins perméables à l'eau, ce qui les rend impropres à la production de papiers de grande qualité. Elles servent donc principalement à produire des articles en papier mince comme le papier de soie, le papier hygiénique, l'essuie-tout et les serviettes en papier.

Pour obtenir de la pâte commerciale, on tamise en principe la pâte aqueuse encore une fois et on en augmente la consistance (de 4 à 10%) avant de la faire passer à la machine à papier. La pâte est ensuite étendue sur une toile mobile de mailles métalliques ou en plastique à l'extrémité «humide» de la machine, où l'opérateur surveille la vitesse de la toile et la teneur en eau de la pâte.

L'eau et le filtrat s'écoulent au travers de la toile, ne laissant plus qu'un réseau de fibres. La pâte passe entre différents rouleaux presseurs qui expriment l'eau et l'air jusqu'à ce que la densité de fibres atteigne entre 40 et 45%. Puis la feuille subit

plusieurs étapes de séchage à chaud, pour obtenir une consistance de 90 à 95%. Enfin, elle est découpée et mise en balles. Une fois comprimées, ces balles sont enveloppées en vue de leur entreposage et de leur transport.



**Figure 11 : Les étapes de fabrication du papier**  
(Source : [www.strathmoreartist.com](http://www.strathmoreartist.com))

Bien que comparable en principe à la fabrication de feuilles de pâte, la fabrication de papier est beaucoup plus complexe. Pour maximiser la qualité du papier, certaines usines mélangent plusieurs pâtes (pâtes de bois dur, de bois tendre, kraft, pâtes au bisulfite, mécaniques ou recyclées). Selon le type de pâte employé, un nombre variable d'étapes est nécessaire pour produire une feuille de papier. En général, on réhydrate les pâtes commerciales séchées, alors que l'on dilue les pâtes entreposées qui présentent une densité élevée. Il arrive que l'on batte les fibres pour en augmenter le liant et améliorer ainsi la solidité des feuilles de papier. A l'extrémité «humide», la pâte est mélangée à des additifs et passe, pour finir, à travers une série de cribles et de dispositifs de nettoyage. Elle est alors prête pour le traitement à la machine à papier.

Le régulateur de débit et la caisse d'arrivée distribuent une fine suspension (teneur de 1 à 3%) de pâte raffinée sur une toile animée d'un mouvement (semblable à celle d'une machine à pâte, mais se déplaçant beaucoup plus rapidement, parfois à plus de 55 km/h), qui transforme les fibres en une mince feuille feutrée. Celle-ci avance au travers de rouleaux presseurs jusqu'à la zone de séchage, où des rouleaux chauffés à la vapeur placés les uns à la suite des autres éliminent le plus gros de l'eau restante. A ce stade, les liaisons hydrogène entre les fibres sont établies. Pour finir, on procède au calandrage et au bobinage du papier. Le calandrage consiste à lustrer le papier et à l'amincir. Une fois séchée et calandree, la feuille de papier est enroulée sur une bobine,

étiquetée et acheminée jusqu'à l'entrepôt. Des additifs «à sec» peuvent être ajoutés avant le calandrage sur la machine à papier ou hors machine par les entreprises de transformation au moment de l'enduisage.

On se sert de divers produits chimiques pour travailler la surface du papier et pour conférer aux feuilles certaines propriétés. Les additifs les plus courants sont en général utilisés à une faible dose, mais quelques-uns dont l'argile et le talc peuvent représenter jusqu'à 40% du poids sec de certains papiers.

La fabrication de carton est semblable à celle du papier ou de la pâte. Un mélange de pâte et d'eau est étendue sur une toile mobile, l'eau en est éliminée, puis la feuille est séchée et stockée en rouleaux. Le processus diffère par la façon dont on donne de l'épaisseur à la feuille, par la superposition de couches et par la méthode de séchage. Le carton peut être fait d'une ou de plusieurs feuilles, ajoutées ou non à une âme centrale. Les feuilles sont habituellement fabriquées avec de la pâte kraft de bonne qualité (ou un mélange de pâte kraft et de pâte chimico-thermomécanique (PCTM)), tandis que l'âme est faite soit d'un mélange de pâte chimico-mécanique et de pâte recyclée bon marché, soit de pâte entièrement recyclée mélangée à d'autres déchets. Des revêtements, des pare-vapeurs et de multiples couches sont ajoutés selon la destination du produit afin que le contenu de l'emballage ne soit ni mouillé ni endommagé.

#### **I.2.4.2. Traitement du papier**

Une feuille en sortie de machine contient environ 50 % d'air en volume et présente des macropores de surfaces de tailles variant globalement entre 30 et 100  $\mu\text{m}$ . Cet état de surface et cette structure interne n'est pas toujours compatible avec les modes d'impression utilisés ultérieurement. Aussi, une fois la feuille formée, elle va subir différents traitements sur machine ou hors-machine pour améliorer son caractéristique ou son aspect. [20][21] [22]

## **a) Traitements physico-chimiques**

Ces différents traitements sont destinés à améliorer l'état de surface d'un papier afin d'obtenir une bonne imprimabilité et un bon rendu des couleurs. Il s'agit de déposer en surface et éventuellement à l'intérieur du papier ou du carton un enduit destiné :

- à boucher la surface du papier qui est en sortie de machine très rugueuse et macroporeuse
- à améliorer sa blancheur et son aspect (mat ou brillant).

Ces traitements apportant à nouveau de l'eau à la surface du papier, il faudra rajouter une étape de séchage.

### ***i. La sulfuration***

On trempe le papier ainsi formé dans de l'acide sulfurique qui solubilise la surface des fibres de cellulose, se soudant entre elle. On lave ensuite le papier à l'eau pure.

### ***ii. Le surfacage***

La majorité des papiers Impression-Ecriture destinés à l'impression offset ainsi que quelques papiers d'emballage dont on voudrait améliorer les caractéristiques de solidité et de rigidité sont enduites en film-press (en surface uniquement) ou en size-press (en surface ou en interne) d'une sauce d'amidon. Celle-ci, déposée à environ 0,5 à 3 g/m<sup>2</sup>, améliore la cohésion de surface indispensable lors de l'impression offset qui utilise des encres à fort tirant. La main et la perméabilité du papier diminuent avec ce surfacage.

### ***iii. La pigmentation***

Le traitement est le même que le précédent, mais les sauces sont d'une part plus concentrées et peuvent contenir en plus de l'amidon des pigments ou des liants. La film-press permet de déposer une couche plus épaisse, de l'ordre de 3 à 8 g/m<sup>2</sup> et par face.

**iv. Le couchage**

On dépose une couche composée de pigments, liants et adjuvants, supérieur à 7-8 g/m<sup>2</sup> et par face du papier. Il peut être nécessaire de faire un pré-couchage en film-press, et le couchage se fera avec divers systèmes d'enduction.

**b) Traitements physiques/mécaniques**

**i. Le frictionnage**

Lorsqu'on cherche à avoir un aspect brillant sur une seule face, le papier passe, environ aux 2/3 de la sécherie, entre un cylindre métallique de gros diamètre (cylindre frictionneur) et un petit cylindre en caoutchouc revêtu d'un feutre, qui fait adhérer la feuille au cylindre frictionneur. L'aspect brillant ou glacé est obtenu en remouillant si nécessaire la surface à glacer. Cette méthode est utilisée par exemple pour les cartons de boîtes pliantes ou pour les extérieurs d'emballage.

Ce cylindre permet de lisser le papier sans diminuer l'épaisseur (sans l'écraser).

**ii. L'apprêtage**

Ce traitement consiste à faire passer la feuille dans une lisse constituée de rouleaux durs et disposée en fin de machine. Elle améliore l'état du papier en l'écrasant, mais on ne l'utilise que pour les papiers bas de gamme (journaux, couverture, PPO).

**iii. Le calandrage**

Le papier passe dans une calandre ou supercalandre ou encore « Gloss calandre ». Ces traitements, effectués hors machine, consistent à faire passer la feuille de papier entre plusieurs cylindres dont on fait varier les duretés et les températures.

La calandre sera constituée au moins d'un cylindre dur et d'un rouleau déformable. L'action est une association de pression et de frottement sur la feuille puisque les cylindres ont des vitesses de rotation différentes, et le lissage se fait du côté du cylindre dur. La calandre améliore le lissé.

La supercalandre est constituée d'une alternance de rouleaux durs et déformables (jusqu'à 20). Le lissage est plus important et on augmente le brillant, mais on perd également de la main.

La « Gloss calandre » possède un rouleau chromé chauffé à la vapeur à 200 °C sur lequel le papier est appliqué par l'intermédiaire de rouleaux durs. Cela permet de ne pas perdre trop de main tout en augmentant le lissé et le brillant.

*iv.*            **Le crépage**

Le papier obtenu grâce au crépage, décollement de la feuille du cylindre sécheur par un racle puis enroulement à une vitesse légèrement inférieure, a des propriétés de douceur et d'absorbance.

**c)        La finition**

*i.*            **Le bobinage**

En fin de machine, le papier est enroulé sur des bobines mères, qui peuvent peser suivant la laize de la machine jusqu'à 40 tonnes et à un rythme pouvant atteindre une bobine par demi-heure.

Ces bobines doivent être ensuite recoupées au bon format pour le client.

*ii.*            **La mise au format**

❖            **Bobines**

Les bobines mères sont déroulées et refendues en bobines filles, avec les caractéristiques demandées par le client (longueur, diamètre, tension régulière, tranche sans poussière, mandrin conforme, traçabilité, collures visibles). Les bobines peuvent être expédiées telles quelles chez l'imprimeur (rotatives) ou chez le transformateur.

❖            **Feuilles**

Les bobines filles sont transformées en feuilles ou format avec une largeur et une longueur, déterminées et précises. Les feuilles sont empilées, équerrées, comptées en

rames (grand format pour les imprimeurs) ou ramettes (petits formats pour la bureautique) comprenant 500 feuilles.

### **I.3. PROPRIETES ET DIFFERENTS TYPES DE PAPIER**

Les caractéristiques du papier sont d'ordre physique, mécanique ou optique. Nombreux sont les termes dont on se sert en papeterie pour évoquer les caractéristiques physiques ou mécaniques et les propriétés d'un papier. [23] [24] [25]

#### **I.3.1. Les propriétés mécaniques**

- **L'épaisseur** (en micromètres, par exemple le papier à lettres a une épaisseur de 110 micromètres)
- **Le grammage** : masse par unité de surface d'un papier ou d'un carton, exprimée en grammes par mètre carré. On parle de papiers ultralégers, légers, de papiers à faible, moyen ou fort grammage. Par exemple : le papier à cigarette pèse 20 g/m<sup>2</sup> en moyenne et le papier à lettres 80 g/m<sup>2</sup>.
- **L'humidité** : % par rapport au grammage ou en poids d'eau
- **La main** : rapport entre l'épaisseur de la feuille et son grammage. Un papier a de la main quand son épaisseur est élevée compte tenu de son grammage. Il a une véritable épaisseur au toucher
- **Le bouffant** : impression tactile que donne un papier relativement épais. Le papier bouffant est le papier brut, sorti tel quel de machine, non collé et possédant beaucoup de main (le papier pour BD est très bouffant, alors que le papier bible a un bouffant très faible). C'est le rapport entre la mesure de 5 feuilles (mesurées ensemble) par le grammage.
- **Le lissé** : temps d'écoulement d'un volume d'air en surface du papier. C'est une propriété très importante pour la typographie et l'héliogravure, mais a peu d'effet sur l'offset. Les surfaces lisses présentent des irrégularités de l'ordre de 0,0005 à 0,010 d'intervalle. Ils ne peuvent pas être vus à l'œil nu, mais peuvent être détectés à l'aide d'une loupe et d'un éclairage à faible angle.
- **La rugosité** (en µm) : c'est l'opposé du lissé et caractérise le degré de rugosité de la texture superficielle du papier.
- **La porosité Bekk**, ou perméabilité à l'air : flux d'air à travers un papier

- **La rigidité** : la mesure du module de Young en continu sur la machine à papier permet de régler les paramètres de fabrication au fil de la production (cette opération peut être automatisée).
- **Le coefficient de friction du papier par rapport à un autre matériau** (papier, métal, caoutchouc...)
- **La cohésion d'un papier** : propriété constitutive du papier traduisant l'homogénéité de sa tenue interne (cohésion des fibres et des liaisons hydrogène)
- **Le sens de fabrication (ou sens machine)** : orientation prise par les fibres sur la table de fabrication. Elle est variable selon le degré d'agitation. On distingue le sens «marche», le plus rigide et favorable au pliage, et le sens «travers », perpendiculaire à celui-ci, moins rigide et favorable au rainage
- **La résistance à l'arrachage** : un paramètre important. L'arrachage est le décollement de zones superficielles d'un papier ou d'un carton se produisant lorsque les contraintes exercées perpendiculairement à ce papier ou à ce carton sont supérieures à celles que peut admettre la force de cohésion de leur couche de surface respective

### **I.3.2. Les propriétés visuelles et optiques**

- **La blancheur** (réflectance mesurée à 457 nm) : une caractéristique très importante souvent intuitivement associée à la notion de qualité et d'esthétique. Elle affecte le contraste recherché dans l'impression. On définit le « degré de blancheur », ou facteur de luminance, du papier en pourcentage ISO, comme pour les pâtes. Ainsi un papier de luxe a habituellement un degré de 88 à 92 % ISO, alors qu'un papier de presse quotidienne a un degré de 60 à 66% ISO.
- **La brillance** : mesurée généralement à 20, 60, 75 et 85° et dû à la présence de certains additifs et au calandrage, se manifeste parfois par une sorte de chatoiement.
- **L'opacité** (en % par rapport à la lumière réfléchiée) : mesure de l'imperméabilité à la lumière du papier. Un papier est dit transparent lorsqu'il laisse passer beaucoup de lumière et opaque lorsqu'il en fait passer peu.
- **L'épaisseur** : aspect du papier observé par transparence devant une source de lumière. Il peut être uni ou « fondu » (fibres homogènes) ou nuageux (fibres non

homogènes). L'épaisseur est une précieuse indication sur la formation, ou texture, de la feuille de papier ou de carton.

- **La teinte ou couleur** : sensation née de l'impression produite sur l'œil par un flux lumineux reçu sur le papier. Elle peut être modifiée par l'ajout dans la pâte de colorants synthétiques. Les colorants sont soit fixés sur les fibres, soit retenus par un mordant.

### **I.3.3. Les différents types de papier**

Il existe une multitude de papiers, classés en grandes familles ou sortes en fonction de leur usage. Ces papiers sont en général définis par les principales caractéristiques d'usages cités ci-dessus. [5]

- Les papiers pour impression, écriture et communication comprennent les papiers pour journal, magazine, édition (couché, non couché, opaque mince, bible, bouffant), bureautique (xérographie, laser, jet d'encre) et écriture.
- Les papiers pour emballage regroupent les papiers pour ondulé (cannelure et couverture pour caisse en carton ondulé), ceux pour emballages souples et sacs (kraft, couchés une face...), les étiquettes, et les cartons plats et compacts.
- Les papiers pour usage sanitaire et domestique les plus connus sont le papier toilette, le mouchoir, l'essuie-tout, le papier médical pour pochettes de stérilisation, et les lingettes.
- Les papiers tels : cigarette, condensateur, décor, calque, cristal, sulfurisé, fiduciaire, monnaie, etc., appartiennent à la catégorie des papiers industriels et spéciaux.

### **I.4. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SUR LA SANTE PUBLIQUE DE L'INDUSTRIE PAPETIERE**

Grande consommatrice de ressources naturelles (bois, eau et énergie), l'industrie des pâtes et papiers contribue fortement à la pollution de l'eau, de l'air et du sol et est étroitement surveillée depuis quelques années.

Ces inquiétudes apparaissent justifiées, vu la quantité de polluants rejetée dans l'eau par tonne de pâte (par exemple, 55 kg de DBO, 70 kg de solides en suspension et

jusqu'à 8 kg de composés organochlorés) et la quantité de pâte produite dans le monde chaque année (environ 180 millions de tonnes en 1994). En outre, les vieux papiers, qui ne sont recyclés qu'à concurrence de 35% environ, représentent une part importante des déchets solides rejetés dans le monde (quelque 150 millions sur les 500 millions de tonnes annuelles).

Autrefois, les concepteurs des usines de pâtes et de papiers ne se préoccupaient pas de limiter la pollution. De nombreux procédés employés dans l'industrie avaient été mis au point sans que l'on se soucie véritablement de réduire le volume d'effluents et la concentration de polluants. Depuis les années soixante-dix, la lutte contre la pollution fait partie intégrante des éléments qui interviennent dans la conception des usines en Europe, en Amérique du Nord et dans d'autres régions du monde.[16] [26] [27]

#### **I.4.1. La pollution atmosphérique**

Les composés de soufre oxydé rejetés dans l'atmosphère par les usines de pâtes et de papiers endommagent la végétation, et les émanations de composés de soufre réduit suscitent des plaintes à cause de leur odeur «d'œuf pourri». Les études effectuées parmi les riverains d'usines, notamment auprès d'enfants, ont fait apparaître des problèmes respiratoires en rapport avec les émissions de particules, outre une irritation des muqueuses et des maux de tête qui seraient attribuables aux composés de soufre réduit. Des différents procédés de fabrication de la pâte, les plus polluants pour l'atmosphère sont les procédés chimiques, en particulier lorsqu'il s'agit de pâte kraft.

Ce sont les opérations au bisulfite qui rejettent le plus d'oxydes de soufre, surtout celles qui font intervenir des bases au calcium ou au magnésium. Les principales sources comprennent les souffleuses des lessiveurs, les évaporateurs et les installations de préparation de la liqueur, tandis que les opérations de lavage, de criblage et de récupération sont les moins polluantes. Les chaudières de récupération de pâte kraft dégagent aussi du dioxyde de soufre, de même que celles qui fonctionnent au mazout et avec du charbon très sulfuré.

Les composés de soufre réduit, dont le sulfure d'hydrogène, le méthylmercaptan, le sulfure de diméthyle et le disulfure de diméthyle, se retrouvent presque exclusivement dans la fabrication de pâte kraft, et donnent aux usines une odeur

caractéristique. Parmi les principales sources de ce type de composés, il faut citer les chaudières de récupération, les souffleuses et les soupapes des lessiveurs ainsi que les cheminées des piles laveuses, auxquelles peuvent s'ajouter les évaporateurs, les cuves de salin, les extincteurs de chaux, les fours à chaux et les eaux usées. Certaines fabriques utilisant le procédé au bisulfite procèdent à une réduction dans leurs chaudières de récupération, ce qui peut diminuer les problèmes d'odeur de soufre.

Dans certaines conditions d'exploitation, des oxydes d'azote sont produits. Ils résultent d'une combustion à température élevée et ce, que l'on ait affaire à une chaudière de récupération, à une chaudière électrique ou à un four à chaux. On peut limiter la quantité de ces oxydes en réglant la température, le ratio air-combustible et la durée du séjour dans la chambre de combustion. D'autres composés gazeux polluent l'atmosphère dans une moindre mesure (par exemple, le monoxyde de carbone produit par une combustion incomplète, le chloroforme par le blanchiment, et les composés organiques volatils par les soupapes des lessiveurs et l'évaporation de liqueur).

Les particules proviennent essentiellement des opérations de combustion et, dans une moindre mesure, des cuves de salin. Les fabriques de pâte produisent pour plus de la moitié des particules très fines (d'un diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ ). Elles contiennent du sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et du carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) provenant des chaudières de récupération, des fours à chaux et des cuves de salin, ainsi que du chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) issu des sous-produits du bois entreposé dans de l'eau salée. Les émissions des fours à chaux renferment une quantité importante de grosses particules à cause de sels de calcium qui ont été entraînés et de la sublimation de composés de sodium. Ces grosses particules peuvent aussi contenir des cendres volantes et des produits de combustion organiques, venant notamment des chaudières électriques.

#### **I.4.2. La pollution de l'eau**

Les eaux usées contaminées qui sortent des usines de pâtes et de papiers peuvent détruire les organismes aquatiques, favoriser une bioaccumulation de composés toxiques chez le poisson et altérer le goût de l'eau potable en aval. Ces effluents possèdent des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques

particulières dont les plus importantes sont la teneur en solides, la demande en oxygène et la toxicité.

La teneur des eaux usées en solides se calcule habituellement sur la base de la fraction en suspension (et non dissoute), de la fraction de solides en suspension qui est décantable, et de la fraction globale qui est volatile. La fraction décantable est la plus problématique, car elle peut former une épaisse couche de boue près du point d'évacuation, ce qui provoque un épuisement rapide de l'oxygène dissous dans l'eau réceptrice et favorise la prolifération de bactéries anaérobies qui produisent du méthane et des gaz de soufre réduit. Bien qu'ils se diluent en général dans l'eau réceptrice et qu'ils soient donc moins inquiétants, les solides non décantables peuvent amener des composés organiques toxiques au contact d'organismes aquatiques. Les usines de pâtes et de papiers rejettent, entre autres solides en suspension, des particules d'écorce, de la fibre de bois, du sable, des impuretés produites par les broyeurs de pâte mécanique, des additifs servant à la fabrication du papier, de la lie de liqueur, des sous-produits du traitement de l'eau et des cellules microbiennes issues de traitements secondaires.

Les dérivés du bois dissous dans les liqueurs (oligosaccharides, sucres simples, dérivés de la lignine ayant un faible poids moléculaire, acide acétique et fibres de cellulose solubilisée) contribuent le plus à augmenter la DBO et la DCO. Les composés toxiques pour les organismes aquatiques sont notamment les suivants: substances organochlorées (AOX produites par le blanchiment, surtout de pâte kraft); acides résiniques; acides gras non saturés; alcools diterpéniques (issus surtout de l'écorçage et de la fabrication de pâte mécanique); juvabionones (résultant essentiellement de la fabrication de pâte au bisulfite et mécanique); produits de la dégradation de la lignine (provenant principalement de la fabrication de pâte au bisulfite); matières organiques synthétiques telles que myxobactéricides, huiles et graisses; produits chimiques de traitement, additifs servant à la fabrication du papier et métaux oxydés. Les composés organochlorés posent un problème particulier, car ils sont extrêmement toxiques pour les organismes marins et ont une tendance à la bioaccumulation. Les dangers que présente ce groupe de composés, où l'on trouve les dibenzo- $\pi$ -dioxines polychlorées, expliquent principalement les mesures prises pour limiter l'emploi de chlore dans le blanchiment de la pâte.

La quantité et la source des solides en suspension ainsi que la demande en oxygène et les rejets toxiques dépendent des opérations effectuées. Du fait de la solubilisation des matières extractibles du bois sans récupération, ou presque, des produits chimiques et des acides résiniques, la fabrication de pâte au bisulfite et de PCTM produit des effluents extrêmement toxiques présentant une forte DBO. Les fabriques de pâte kraft ont toujours utilisé davantage de chlore pour le blanchiment, produisant en conséquence des effluents plus toxiques; toutefois, lorsqu'elles éliminent le  $\text{Cl}_2$  du blanchiment et qu'elles procèdent à un traitement secondaire, leurs effluents présentent généralement une toxicité aiguë réduite, voire nulle, et leur toxicité subaiguë apparaît fortement diminuée.

**Tableau 3 : Total des solides en suspension et DBO enregistrés dans les effluents non traités (bruts) de diverses opérations**

| <b>Opération</b>                | <b>Total des solides en suspension (kg/tonne)</b> | <b>DBO (kg/tonne)</b> |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| Pâte mécanique                  | 50 – 70                                           | 10 - 20               |
| PTM                             | 45 – 50                                           | 25 - 50               |
| PCTM                            | 50 – 55                                           | 40 - 95               |
| Kraft, non blanche              | 20 – 25                                           | 15 - 30               |
| Kraft blanche                   | 70 – 85                                           | 20 - 50               |
| Bisulfite, faible rendement     | 30 – 90                                           | 40 - 125              |
| Bisulfite, rendement élevé      | 90 – 95                                           | 140 - 250             |
| Désencrage, hors papier de soie | 175 – 180                                         | 10 - 80               |
| Déchets de papier               | 110 – 115                                         | 5 – 15                |

(Source : Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, Volume 3 par Jeanne Mager Stellmann)

Les solides en suspension posent aujourd'hui moins de problèmes parce que la plupart des usines effectuent une clarification primaire (décantation par gravité ou flottation à l'air dissous) qui élimine entre 80 et 95% des solides décantables. Pour réduire la DBO, la DCO et la quantité de composés organochlorés dans les effluents, on fait subir aux eaux usées des traitements secondaires: bassins d'oxygénation, activation des boues, filtration biologique, etc.

Des modifications sont apportées aux processus internes pour limiter les solides décantables, la DBO et la toxicité: écorçage et transport des billes à sec, amélioration du criblage des copeaux pour obtenir une cuisson uniforme, allongement de la délignification pendant la fabrication de la pâte, modification des procédés de récupération des produits chimiques utilisés pour le lessivage, emploi de nouvelles techniques de blanchiment, lavage à haute efficacité de la pâte, récupération des fibres de liqueur blanche et meilleure prévention des fuites. Cependant, il arrive toujours que des problèmes de fonctionnement (notamment s'ils résultent du déversement intentionnel de liqueurs dans les égouts) et des changements opérationnels (comme l'utilisation de bois non séché contenant une forte proportion de substances extractibles) fassent périodiquement augmenter la toxicité des effluents.

## **II.LE TEXTILE**

### **II.1. TOUT SUR LE TEXTILE**

#### **II.1.1. Définitions**

- Eh bien, textile est une technique par laquelle un tissu est fabriqué en utilisant la chaîne et la trame fil. Les textiles ne sont pas seulement produits par tissage, mais aussi par tricotage ou feutrage des fibres et des fils. Textile est essentiellement un mot latin qui vient de «Texere» et signifie «To Weave». **[28]**
- Susceptible d'être tissé, d'être divisé en fils que l'on peut tisser. **[29]**
- Matière peu épaisse, surface souple et résistante constituée par un assemblage régulier de fils textiles entrelacés, tissés ou maillés. **[30]**
- Un textile est un matériau susceptible d'être tissé ou tricoté. Initialement, il désigne donc un matériau qui peut se diviser en fibres ou en fils textiles, tels que le coton, le chanvre, le lin, la laine (textiles organiques) ou la pierre d'amiante (textile minéral), puis avec la découverte de nouvelles techniques, les fibres synthétiques. **[31]**

#### **II.1.2. Un peu d'histoire**

- ❖ Une analyse paléogénétique du pou des vêtements a établi que les premiers vêtements ont été portés 650 000 années auparavant, et étaient probablement en peaux et fourrures d'animaux rêches et grossières. Ils protégeaient ainsi le chasseur-cueilleur préhistorique des glaciations du Pléistocène. Ils se sont servis de la peau des animaux dont ils ont raclé la viande comme costume drapé ou enfilé et ont utilisé de fines lanières de cuir pour attacher les fourrures. **[32]**
- ❖ Des preuves de nombreuses études universitaires suggèrent que les humains ont peut-être commencé à porter des vêtements il y a 100 000 à 500 000 ans. **[33] [34]**
- ❖ Les aiguilles à coudre datent d'au moins 50 000 ans et sont uniquement associées à une espèce humaine autre que les humains modernes. L'exemple le plus ancien possible est il y a 60000 ans, une pointe d'aiguille (tige et œil manquants) trouvée dans la grotte de Sibudu, en Afrique du Sud. D'autres

exemples précoces d'aiguilles datant de 41 000 à 15 000 ans se trouvent dans plusieurs endroits, par exemple en Slovénie, en Russie, en Chine, en Espagne et en France. **[35]**

- ❖ 34 000 ans, des chercheurs ont découvert les premières fibres teintées de lin naturel et de laine de chèvre portant des marques de torsion dans des couches d'argile de la grotte de Dzudzuana en Géorgie. **[36]**
- ❖ Vers -8000, l'homme préhistorique apprend progressivement à macérer les fibres végétales pour les rendre flexibles (technique du rouissage) ainsi qu'à détacher les poils des cuirs grâce à des silex taillés, fabriquant d'abord des feutres. Le premier feutre est évoqué sur des motifs de peinture murales du site néolithique de Çatal Höyük, de lin, laine, poils, fourrure, voire en écorce d'arbre, mais le feutre reste une étoffe moins résistante que le tissu. **[37]**
- ❖ Dès -6000, apparition du nalebinding, la première forme de tricot. **[38]**
- ❖ VI<sup>e</sup> millénaire av. J.-C., apparition du filage au fuseau et à la quenouille, constitués de différents matériaux, pour le lin et la laine est attesté (découverte dans le village néolithique de Sesklo de fusaïole) jusqu'à l'apparition du rouet au début du XIV<sup>e</sup> siècle au Moyen-Orient. C'est au XVII<sup>e</sup> siècle qu'on ajoute une pédale au rouet pour libérer la main droite du fileur et améliorer la technique. **[39]**
- ❖ En 1746, création de la première manufacture d'indiennes mulhousienne par Koechlin, Schmaltzer et Jean-Henri Dollfus. Dans les années 1760 apparaît, au Royaume-Uni, le premier métier à filer mécanique (Spinning jenny). **[40]**
- ❖ En 1771, Richard Arkwright crée la première filature industrielle. Crompton invente quant à lui la spinning mule permettant à un seul ouvrier de commander jusqu'à 1 000 fuseaux.
- ❖ En 1812, tous les métiers à filer du Royaume-Uni produisent autant que quatre millions de rouets. **[41]**

### **II.1.3. Procédé de fabrication**

#### **II.1.3.1. Les matières de base**

##### **a) Les fibres textiles et leur classification**

Les fibres textiles peuvent être organisées en fonction de leur « origine » : nature des matières premières employées et processus de transformation. On distingue 2 groupes principaux [42] :

- Les fibres naturelles (qui existent en tant que telles dans la nature)
- Les fibres chimiques (fibres manufacturées)

Chaque groupe est divisé en sous-catégories. N'importe quelle fibre textile est censée trouver sa place dans un sous-groupe de cette arborescence. Cependant, les techniques de conception et de production évoluent très rapidement. De nouveaux types de fibres artificielles ou synthétiques apparaissent, boostés par l'essor de la biotechnologie appliquée au textile : c'est le cas des biomatériaux, aussi novateurs que difficiles à classer...

##### **b) Classification des fibres textiles : les principes de base**

Comme mentionné précédemment, les fibres textiles se répartissent en deux grandes catégories : **les fibres naturelles** et **les fibres chimiques**.

Les fibres naturelles sont obtenues par transformations physiques et mécaniques d'une matière naturelle, sans modifier sa composition.

Elles peuvent être d'origine :

##### **❖ végétale**

- provenant des tiges (lin, jute, chanvre, genêt, kénaf, ramie)
- provenant des feuilles (ananas, sisal, gucca, manille, raphia)
- provenant des graines (coton, kapok)
- provenant des fruits (noix de coco)

## ❖ animale

- provenant des poils de mouton (laine), chèvre (cachemire, mohair), chameau, alpaga, lapin (angora), vigogne, ...
- provenant des sécrétions d'insecte (soie, soie d'araignée, ...)

## ❖ minérale / inorganique / silicatée (amiante, métaux, ...)

Les fibres textiles chimiques quant à elles se divisent en deux familles : **les fibres artificielles** et **les fibres synthétiques**. Les premières proviennent d'une transformation chimique de substances naturelles, généralement de la cellulose, les secondes sont fabriquées à partir de polymères organiques et inorganiques.

## ❖ les fibres artificielles

### i. cellulose régénérée

- viscose (provenant de cellulose de bois : écorce de pin, bouleau / d'algues / de plantes oléagineuses : maïs, soja, appelée « rayonne » lorsqu'elle est sous forme de monofilament, fil continu et « fibranne » lorsqu'elle est sous forme de fibres courtes)
- modal
- Cupro
- lyocell
- viscose de bambou

### ii. esters cellulosique

- acétate de cellulose
- tri-acétate

### iii. non cellulosique

- caoutchouc
- latex

## ❖ Les fibres synthétiques

- **Polymères organiques** : polyamide (nylon), polyester, polyacrylique, modacrylique, polyuréthane, polypropylène, chlorofibres, elasthane (lycra), fluorofibre, aramides (kevlar, vectran, kermel...)
- **polymères inorganiques** : verre, carbone, céramique, métaux divers

### c) Quelques exemples des fibres les plus utilisées dans l'industrie textile

Il existe des types de fibres qui sont plus utilisés que d'autres dans l'industrie textile. Ils sont décrits plus en détail ci-dessus.[42] [43]. Mais dans le cadre de notre étude, nous nous limitons aux fibres naturelles d'origine végétale.

#### i. Coton et lin

Le coton est une fibre naturelle végétale qui entoure les graines d'un arbuste communément appelé cotonnier. Il est constitué de cellulose pure. Le coton est la plus importante des fibres naturelles produites dans le monde (près de la moitié de la consommation mondiale de fibres textiles). On l'apprécie pour sa longueur, sa finesse, son toucher très doux. Il est solide et souple en même temps. En revanche, il a tendance à se froisser facilement.

La fibre de coton est principalement constituée de cellulose et de quelques autres composants présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Autres composants de la fibre de coton

| Substance                    | Teneur      |
|------------------------------|-------------|
| Cellulose                    | 88 à 96 %   |
| Substances pectiques         | 0,7 à 1,2 % |
| Cire                         | 0,4 à 1,0 % |
| Protéines                    | 1,1 à 1,9 % |
| Cendres                      | 0,7 à ,6 %  |
| Autres composants organiques | 0,5 à 1,0 % |

Source : 186, Ullmann's, 2000

Le lin est une fibre végétale extraite de la tige du linume. Elle a la particularité d'être une fibre longue (plusieurs dizaines de centimètres), solide et brillante, donnant des tissus frais et absorbants, ce qui la rend idéale pour l'été. Par contre le lin a tendance à se froisser facilement.

## *ii.            Laine*

La laine est un poil animal provenant du mouton. La tonte s'effectue normalement une ou parfois deux fois par an. La qualité et la quantité de la laine varient fortement en fonction de la race du mouton et de son environnement. La laine fait partie d'un groupe de protéines connues sous la désignation de kératine, que l'on trouve également dans les cornes, les ongles, etc.

La teneur en fibres propres de la laine brute est habituellement de l'ordre de 60 à 80 %, mais peut varier de 40 à 90 %.

La graisse de laine est insoluble dans l'eau, mais soluble dans des solvants apolaires, tels que le dichlorométhane ou l'hexane. La graisse de laine raffinée constitue un sous-produit de valeur.

Le suint est une matière soluble dans l'eau provenant de la sécrétion des glandes sudoripares de la peau. Le suint est soluble dans des solvants polaires, tels que l'eau et l'alcool.

La salissure peut comprendre une variété de matières, à savoir des impuretés minérales, du sable, de l'argile, de la poussière et des matières organiques.

## *iii.            Soie*

La soie ne représente que 0,2 % de la production totale de fibres. Pourtant, cette fibre est très importante pour les articles de « niche », tels que les chemisiers, les vestes et écharpes pour dames.

La soie provient du ver à soie, qui file un cocon autour de lui-même. Il s'agit d'une fibre protéinique comme la laine et constitue le seul filament naturel utilisé avec succès dans l'industrie textile (la longueur du fil varie de 700 à 1 500 m).

La fibre de soie est constituée par des filaments de fibroïne enrobés de sérécine (gomme de soie), qui doit être enlevée pendant le pré-traitement.

### **II.1.3.2. Processus de fabrication des fibres naturelles**

#### **a) Préparation des fibres naturelles**

Au moment de la récolte, toutes les fibres d'origine naturelle contiennent des corps étrangers et des impuretés. Elles doivent donc, dans un premier temps, subir différents procédés de préparation, parfois très longs, pour être rendues "filables". La plus grande partie des fibres naturelles est produite en dehors des pays industrialisés, dans les pays tropicaux et subtropicaux. La phase primaire d'obtention de la fibre est réalisée sur place, par exemple [44]:

- l'égrenage des capsules de coton,
- le rouissage du sisal, du chanvre et du lin,
- le dévidage des cocons et le décreusage de la soie et
- le lavage de la laine.

De nos jours, les fibres naturelles sont cultivées dans des « usines agricoles » pratiquant une monoculture intensive. Les problèmes inévitables (défrichement de nouvelles parcelles de culture, désertification, surpâturage rendant toute régénération des forêts impossible, problèmes sociaux) doivent être pris en compte dans le choix des sites et la planification de la production.

#### **b) Filature et fabrication des fils et filés**

Selon la matière première et l'usage souhaité, la fabrication des fils et filés a lieu dans des filatures spéciales: filatures à coton ou à 3 cylindres (les plus courantes), filature de laine peignée, de laine cardée, de chanvre, lin ou jute, etc. A côté de la filature à anneaux curseurs, on trouve depuis une vingtaine d'années la technique de la filature à fibres libérées ou OE (OE = open end spinning), devenue depuis un procédé conventionnel de production à moindre coût des filés plus grossiers notamment.

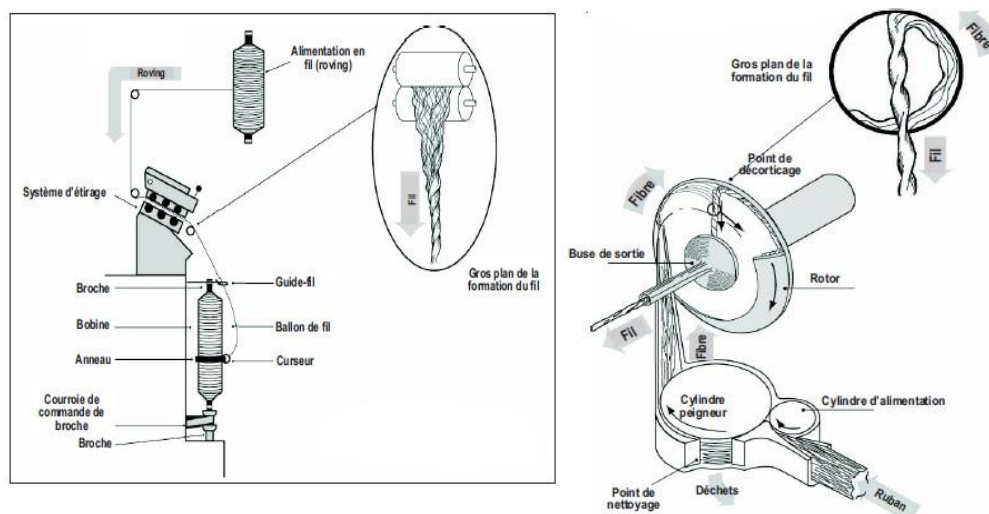


Figure 12 : Schéma d'une opération de filature (à anneaux à gauche et open end à droite)  
(Source : [www.guidecoton.org](http://www.guidecoton.org))

Toutes les filatures travaillent sensiblement selon le même procédé. La fibre est, le cas échéant, nettoyée, parallélisée, ensuite le ruban fibreux est transformé en un fil calibré sur la machine à filtre où il est soumis à un étirage et à une torsion. Une partie des filés obtenus subit ensuite un retordage, c'est-à-dire que deux ou plusieurs fils sont tordus ensemble pour obtenir un « retors ».

En général, les filateurs livrent les filés conditionnés sous forme de cônes de fils d'un poids de 0,8 à 3,5 kg aux industries textiles transformatrices.

### c) Tissage, bonneterie et tricotage (maille)

De ces trois techniques d'élaboration de surfaces textiles, le tissage est de loin la plus répandue. Au cours du tissage, des fils de trame sont entrelacés avec la nappe de fils, la « chaîne », pour former le tissu. Depuis 20 ans, les machines à tisser ont connu des progrès techniques considérables, qui ont conduit à une forte augmentation des cadences de production.



Figure 13 : Schéma d'une machine à tisser traditionnelle  
(Source : [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com))

L'encollage est une particularité du procédé de fabrication des articles tissés. Pour certains articles, un des deux systèmes de filage, la chaîne, doit être protégée par une substance agglutinante ou colle. Pour cela, la nappe de fils est immergée dans un bain, par exemple à base d'amidon modifié ou de polymères synthétiques.

Contrairement aux étoffes tissées, un seul fil entre dans la fabrication des articles de bonneterie et de tricotage: les fils formés en mailles créent des colonnes et des rangées. Les surfaces sont réalisées sur des machines à fonture circulaire ou rectiligne, ou des machines à mailles jetées.

### **II.1.3.3. Traitement du textile fini**

#### **a) Ennoblement textile**

L'ennoblissement, encore appelé finition, concerne l'ensemble des traitements appliqués lors des différentes étapes de transformation (fibres, filés, tissus, maille, prêt-à-porter): blanchiment, teinture, impression et apprêt des produits textiles. Dans tous les cas, l'ennoblissement vise à améliorer les propriétés des textiles et à les adapter aux exigences, sans cesse changeantes, de la mode et de la fonctionnalité. [44] [45]

Pour les procédés d'ennoblissement, on distingue les procédés purement mécaniques et les procédés humides. Dans ce dernier cas, la phase liquide est principalement de l'eau, et dans une moindre mesure des détergents et du gaz d'ammoniac liquéfié. La vapeur d'eau est un autre agent important. Pour obtenir les effets voulus, on utilise un nombre important de produits chimiques, colorants et additifs chimiques.

### *i. La teinture*

Le plus connu des procédés de finition, selon l'étoffe requise est la teinture qui permet de colorer les étoffes. Il est très complexe, et une multitude de facteurs doivent être considérés pour une application adéquate des teintures. Notamment, celui du choix du colorant qui répondra en fonction des caractéristiques de la fibre utilisée. Les fibres ont une chimie qui varie d'une à l'autre et qui demande de sélectionner des colorants compatibles. Par exemple, le polyester sera teint avec des colorants de type «dispersés» alors que la laine le sera à l'aide des colorants « acides».

Soulignons que la coloration peut se faire de plusieurs autres façons. On peut notamment employer des fils qui auront été teints sur bobine ou en écheveaux, par exemple, pour les machines Jacquard qui permettent des motifs complexes dans l'étoffe. Les fibres elles-mêmes peuvent avoir été colorées avant la filature. L'impression peut aussi être utilisée pour colorer un tissu.

Parmi les procédés de teinture, mentionnons le « conventionnel à rouleaux», mais aussi le procédé de sublimation, qui est plus récent. Celui-ci consiste à appliquer des colorants sur un papier lequel transfère les couleurs sur les étoffes par un procédé thermique. Mis à part la teinture, plusieurs autres produits peuvent être appliqués ou imprégnés aux étoffes. Par exemple, des produits ignifugeants qui protègent les étoffes contre la flamme ; des produits hydrofuges (aussi désignés « wr » pour « water repellent »), pour empêcher l'eau de pénétrer les tissus et les mouiller; des produits antibactériens pour la confection des vêtements de sport et de travail; des apprêts chimiques pour rendre les tissus antistatiques, antitaches, adoucissants, etc.

### *ii. La thermofixation*

Un autre procédé de finition très important est celui de la thermofixation. Il permet notamment d'améliorer la stabilité dimensionnelle des étoffes.

### *iii. Le brossage ou duvetage*

Il existe également le procédé de brossage ou duvetage qui produit des étoffes douces comme la flanelle ou bien le « polar ». Le calandrage permet d'obtenir des étoffes glacées et peut être aussi utilisé pour imprimer des textures de surface. Il est même bien utile pour assouplir la « main » d'une étoffe trop raide.

## **II.2. ETUDE DE VALORISATION DES TEXTILES USES EN PAPIER**

### **II.2.1. Introduction [46]**

De tous temps, les chiffons ont servi à la fabrication du papier et l'on aurait tort de penser que le Moyen-Age occidental en est l'inventeur. Ainsi les premiers papiers chinois datant d'environ 200 ans av J-C contiennent notamment des traces de chiffons. Il en ira de même quelques siècles plus tard pour les papiers arabes.

Ce sont toutefois les innovations technologiques des papetiers italiens qui permettront l'utilisation systématique et exclusive des chiffons pour la préparation du papier, du XIIIe à la fin du XIXe siècle. Seront alors utilisées les chiffes de lin et de chanvre.

Le papier-chiffon laissera sa place au bois dans la seconde moitié du XIXème siècle, en raison d'une demande accrue de papier causant de graves pénuries de chiffons

### **II.2.2. Les matières éligibles pour être transformées en papier artisanal**

Les types de tissus « chiffons » pouvant être transformés en papier artisanal sont uniquement ceux en fibres naturelles comme le chanvre, le coton et le lin.[47]

### **II.2.3. La préparation des vieux tissus ou chiffons**

La fabrication du papier, qui a varié selon le temps et le lieu, a longtemps connu les mêmes étapes.[48] [49]

Pendant longtemps, la matière première de la fabrication de papier était constituée de chiffons. La première étape consistait donc dans le ramassage de chiffons. Mais, avant de devenir du papier, les chiffons devaient subir de nombreux traitements.

#### **II.2.3.1. Le triage**

Les chiffons sont triés par fibres, par qualité (usés, fins, gros, neufs, résistance ...), par couleurs. Ce tri permettra au papetier de pouvoir les utiliser différemment suivant les productions souhaitées.

#### **II.2.3.2. Le lissage**

Cette opération permet de supprimer tout corps étrangers tels que les boutons et les épingles trop dangereux pour les opérations suivantes, les coutures et ourlets trop épais qui iront constituer une catégorie particulière de matière première.

#### **II.2.3.3. Le découpage**

Les tissus vont être tranchés inlassablement en petits morceaux plus ou moins réguliers de quelques centimètres. On les appelle ici « les pétassous ». Ce sont eux qui seront plus tard broyés par la machine afin d'obtenir la pâte à papier.

Ces deux dernières étapes déterminent le passage des tissus au « dérompoir ».

### **II.2.4. La préparation de la pâte à papier**

Autrefois, ces tissus subissaient un pourrissage durant quelques semaines, afin d'amollir les fibres. Cette opération n'est plus pratiquée aujourd'hui. [47][48][50] [51] [52]

Après être passés au dérompoir, les tissus finement découpés subissait un vigoureux traitement mécanique dans des cuves de forme ovoïde appelées « piles

». Ces derniers sont remplis d'eau où battent des maillets tranchants. Les chiffons sont déchiquetés au bout de 24 à 36 heures et on obtient une pâte assez grossière.

Pour l'affiner, on la passe dans un autre type de pile dite « pile hollandaise ». Ce système, inventé au XVIII<sup>e</sup> siècle en Hollande, offre l'avantage de supprimer le pourrissage. La pile hollandaise est une cuve en fonte ovale dans laquelle tourne un cylindre muni de lames qui déchiquettent pendant 1h30 la chiffe tout en assurant une circulation d'eau. Cette invention est un progrès car non seulement elle évite l'étape du pourrissage, mais elle permet d'obtenir un papier plus fin et plus lisse.

A titre indicatif, 4 piles à maillets peuvent battre 700 coups à la minute alors que dans la pile hollandaise on peut compter entre 50 et 100 000 coups de lame par minute !

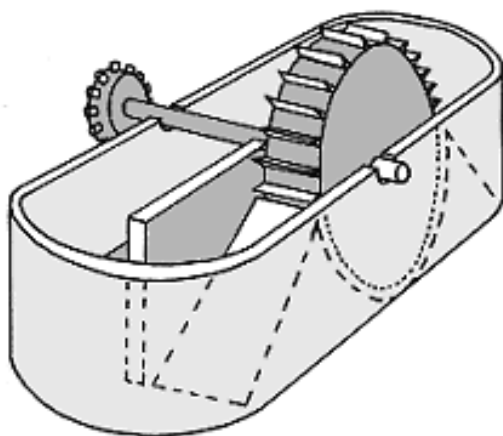


Figure 14 : Schéma d'une pile hollandaise  
([www.palaeographia.org](http://www.palaeographia.org))

#### **II.2.4.1. Le principe de la pile hollandaise**

Dans un premier temps on remplit la pile hollandaise d'eau au pH neutre pour une meilleure qualité et conservation du papier. On peut ensuite charger la pile hollandaise, on verse progressivement les pétassous dans la cuve en prenant soin que tout cela soit régulier. Il faut prendre garde à ce que tous les « pétassous » passent régulièrement sous les lames du cylindre afin que la première étape « le défilage » soit correctement effectué. Cette opération, a une durée très variable en fonction de la qualité du tissu.

Viennent ensuite le défibrage et le raffinage de la pâte à papier, le cylindre continue à être régulièrement abaissé afin de travailler le mélange convenablement jusqu'à obtenir la pâte à papier désirée. En quelques heures, la pâte à papier est prête !

Les compositions de pâte à papier ainsi que les durées nécessaires pour l'obtenir varient d'une fabrication à l'autre.

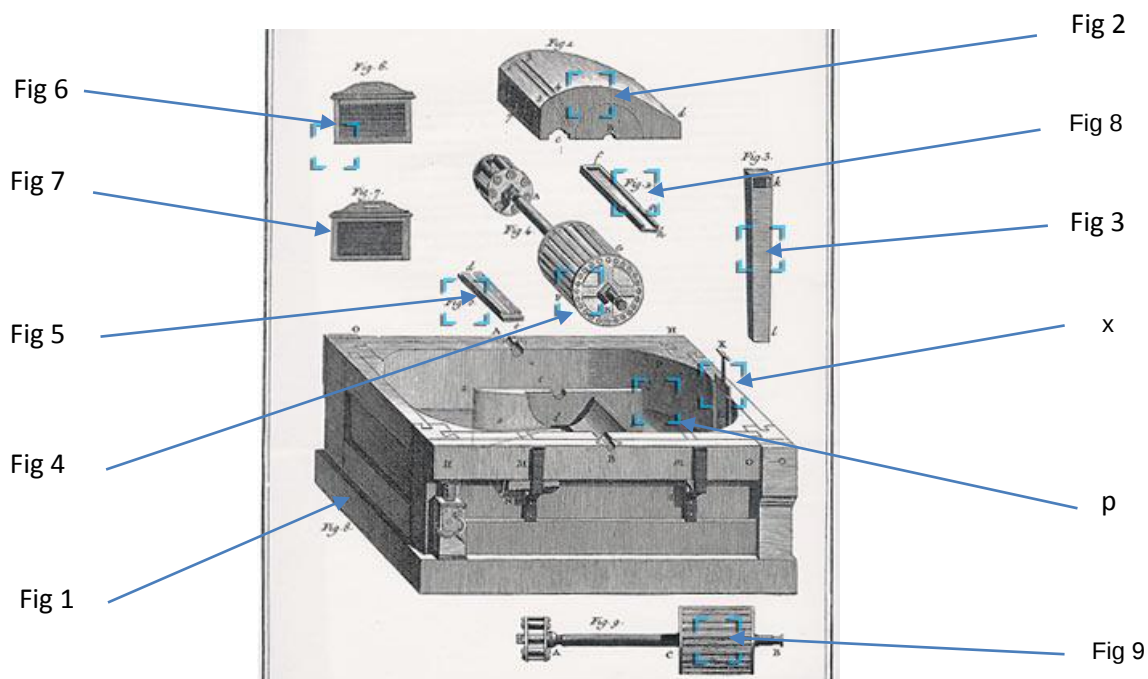


Figure 15 : Détail d'une pile hollandaise ancienne  
(Source :Extrait d'une planche de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (Archives départementales de Maine-et-Loire)[www.piaf-archives.org](http://www.piaf-archives.org))

### ➤ Légendes

- **Fig 1**: cuve
- **Fig 2**: chapiteau couvrant le cylindre
- **Fig 3**: entonnoir du dalot
- **Fig 4**: cylindre garni de lames ou couteaux
- **Fig 5**: platine
- **Fig 6 et 7**: Les figures 6 et 7 représentent les châssis qui se glissent dans les fentes du chapiteau. Ces châssis servent de filtres empêchant les petites parties de chiffons de se perdre avec l'eau qui s'écoule du dalot.
- **Fig 8**: canal ou dalot dans lequel l'eau s'écoule de la cuve.
- **Fig 9**: cylindre
- **x**: partie amovible permettant de vider la cuve

- **p**: tout l'intérieur de chaque cuve à cylindre, le renfort de la cloison, celui de la face extérieure de la cuve, les plans inclinés sont revêtus de lames de laiton soudées les unes aux autres, clouées sur le bois de la cuve. Tout au fond se trouve une platine cannelée. L'effilochage et l'affinage se fait entre les dents de cette platine et les couteaux du cylindre. La cuve est séparée en son centre par une cloison.

#### **II.2.4.2. La mise en forme**

La pâte est puisée dans une forme qui laisse son empreinte sur la feuille. Une forme à papier est un cadre rectangulaire en bois traversé parallèlement au petit côté par des lames de bois de section triangulaire, appelées pontuseaux. Sur ces lames, sont fixés parallèlement au grand côté au moyen de chaînettes (fils très fins en laiton) des fils de laiton ou de bronze très proches les uns des autres : ce sont les vergeures. Ces fils forment une sorte de tamis qui retient la pâte à papier en laissant passer l'eau.

La forme ainsi constituée est complétée par un cadre mobile en bois, appelé couverte, qui vient s'ajuster sur elle et dont la hauteur détermine la quantité de pâte à papier prélevée, donc l'épaisseur de la feuille obtenue. La forme est ensuite trempée dans la cuve et elle ressort, chargée de pâte qu'on répartit sur toute la surface, secoué horizontalement dans un mouvement de va-et-vient comme pour tamiser. L'eau s'écoule à travers la forme et les fibrilles de la cellulose contenue dans les fibres textiles commencent à s'enchevêtrer.

On renverse la forme pour déposer la feuille sur un feutre destiné à la séparer de la feuille précédente, et ainsi de suite. La pile de feuilles et de feutres est ensuite placée sous une presse à vis pour éliminer l'excédent d'eau. Cela va permettre aux fibrilles de s'associer pour former la feuille. Après cet essorage, les feuilles sont séparées des feutres, puis, encore humides, elles sont pressées avant d'être mises à sécher sur des cordes dans les étendoirs.

#### **II.2.4.3. Le séchage de la feuille**

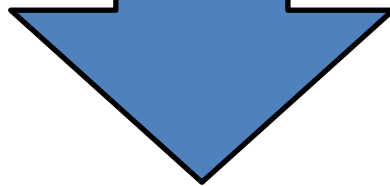
Les feuilles sont ensuite conduites dans un local spécial, « l'étendoir » pour séchage. Maintenues par des pinces, elles sont suspendues à l'air libre et, suivant la

saison, la durée du séchage varie de deux à sept jours et peut être favorisée par des volets qui permettent d'orienter le courant d'air et d'en favoriser les effets.

#### **II.2.4.4. L'encollage**

Un apprêt final est nécessaire, car la surface de la feuille est encore trop rugueuse. Le papier est alors soumis à un nouveau traitement, « l'encollage ». La colle unit en effet les fibres et donne à la feuille plus de solidité en même temps qu'une surface plus lisse. Le polissage ou lissage enfin, à l'aide de la pierre ponce, fait disparaître les dernières rugosités ou aspérités de la surface de la feuille. A nouveau mouillées et mises sous presse (pour répartir uniformément la colle) les feuilles encollées et essorées retournent à l'étendoir pour un second séchage.

## PARTIE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE



### **III. VALORISATION DE PAPIER RECYCLÉ EN NOUVELLES PÂTES À PAPIER**

#### **III.1. OBJECTIF DE L'ETUDE**

Le papier est l'une des matières les plus simples à recycler et cela permet de lui donner une nouvelle vie. Jeter les vieux papiers dans la poubelle (ordinaire) implique qu'ils seront incinérés ou mis en décharge. En d'autres termes, il faudra payer pour éliminer une matière première recyclable.

Le recyclage du papier, comme le recyclage du bois et recyclage du carton, préserve nos forêts et nos ressources d'une manière générale. En effet, il est plus écologique de fabriquer du papier recyclé que du papier issu à 100 % de bois. De plus, le recyclage du papier entraîne peu de pertes, car 100 g de déchets de papier donne 90 g de papier neuf.

Dans cette étude, nous ferons des essais de production d'une nouvelle pâte à papier à base de feuille de papier recyclé, avec laquelle nous ferons des essais de fabrication de feuilles. Pour cela, nous aurons recours à une technique artisanale soucieuse de l'environnement. C'est-à-dire que nous n'utiliserons aucun produit chimique, depuis le processus de formation de la pâte à l'obtention de la feuille de papier.

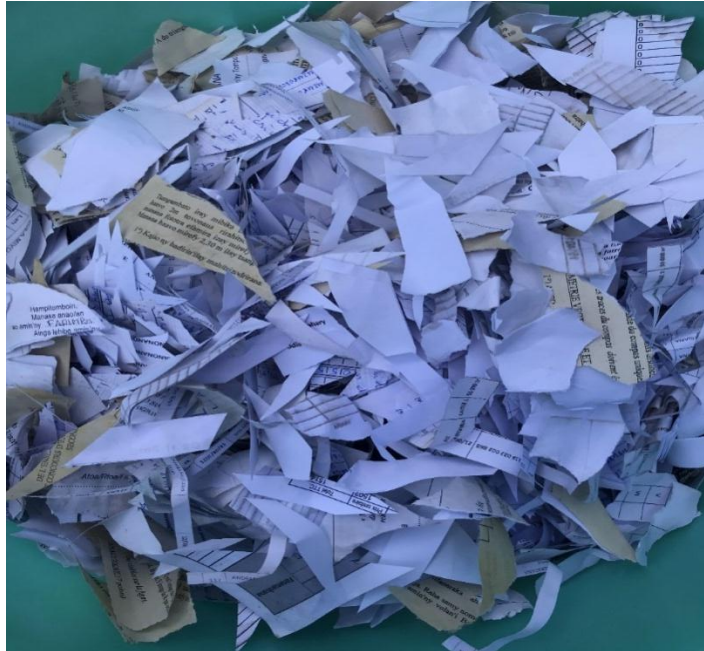
#### **III.2. PREPARATION DE LA PATE**

##### **III.2.1. Collecte et tri de la matière première**

Pour la matière première, notre choix s'est porté sur les papiers de sorte blanches (documents, feuilles de cahiers, etc.), pour la seule et unique raison que ce type de papiers est le plus abondant dans les déchets ménagers. Presque tous les papiers se recyclent sauf les mouchoirs en papier, les lingettes, les emballages alimentaires souillés.

### III.2.2. Préparation de la pâte

La préparation de la pâte commence par le déchiquetage en petits morceaux du papier. Cela facilitera le défibrage.

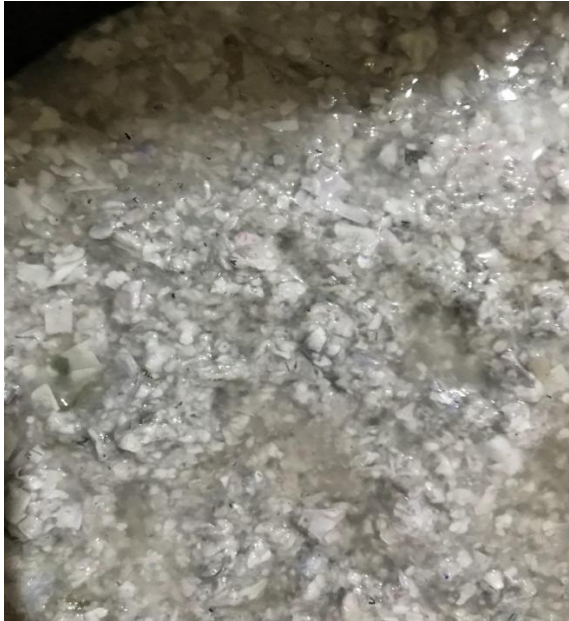


**Photo 1 : Papier en morceau**  
(Source : Auteur)

Nous entamons la préparation de notre pâte par la cuisson du papier.

Les morceaux de papiers sont cuits avec 5 fois son volume d'eau pour une durée de 3 heures. Ce temps est suffisant pour permettre aux morceaux de papier à absorber toute l'eau et que la lignine, une colle naturelle reliant les fibres soit suffisamment ramollie. A force de trituration, les morceaux de papier se transforment en une pâte pleine de grumeaux.

Nous avons utilisé 5 litres d'eau pour la cuisson d'1 kg de papier déchiqueté.



**Photo 2 : Bouillie de papier**  
(Source : Auteur)

Ensuite, il faut bien mélanger le tout et le broyer en une pâte homogène. C'est le défibrage en question. L'opération se fait avec un mixeur, avec suffisamment de puissance.



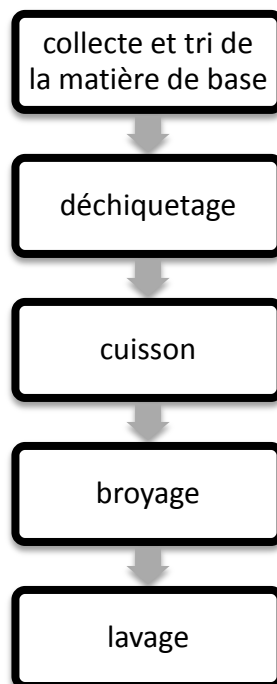
**Photo 3 : Broyage de la pâte**  
(Source : Auteur)

Une fois battu, le mélange donnera une pâte grisâtre, que nous passerons à l'eau pour être lavée et débarrassée de toutes impuretés possibles.



**Photo 4 : Pâte broyée**  
(Source : Auteur)

Toutes ces étapes finies, la transformation de la nouvelle pâte en papier peut commencer. Puisque notre pâte n'a pas subi de blanchiment, elle est dite écrue.



**Figure 16 : Les étapes de préparation de la pâte à papier**  
(Source : Auteur)

### **III.3. TRANSFORMATION DE LA NOUVELLE PATE EN PAPIER** **RECYCLE EN PAPIER**

Pour la fabrication de notre papier recyclé, nous avons procédé à une technique artisanale qui se déroule en plusieurs étapes :

Pour commencer, nous avons besoin d'un bac en plastique dans lequel nous verserons de l'eau. Ensuite, nous aurons besoin d'un tamis pour la mise en forme de la feuille. Le bac doit être assez grand pour pouvoir contenir le tamis.

Il existe deux méthodes pour répartir la pâte dans le tamis. La première est de verser toute la pulpe dans l'eau, puis d'y tremper le tamis pour en retirer le matériau. La seconde est de plonger le tamis en premier et d'y verser de la pulpe ensuite.

Pour nos premiers essais, nous employons la première méthode. Nous versons donc de la pulpe dans le bac et nous remuons. C'est très important pour bien répartir la pulpe et pour qu'elle soit bien homogène.



**Photo 5 : Pulpe dans l'eau**  
(Source : Auteur)

Ensuite, nous plongeons le tamis dans le bac pour le remplir de la préparation. Une fois que la pulpe est bien en place, il reste important de la remuer un peu pour s'assurer qu'elle est répartie uniformément et que les fibres se tricotent. Finalement, on soulève le tamis et on le dépose pour égoutter.



**Photo 6 : Tamisage de la pulpe**  
(Source : Auteur)

Pour retirer la future feuille de papier du tamis, nous nous servons de linge propre et sec avec les mêmes dimensions que l'intérieur du tamis. On dépose ce dernier dans le tamis et on retourne rapidement le tout. On frotte ensuite le dos du tamis avec une éponge pour absorber l'excédent d'eau et on retire le tamis. Le matériau reste collé sur le linge et on constate que la feuille a pris forme.

Cette étape se termine par le séchage de la feuille qui se fait au soleil.



Photo 7 : Papier en pâte recyclée  
(Source : Auteur)

### **III.4. DISCUSSION SUR LES PRODUITS OBTENUS**

Grâce à notre expérimentation, nous avons pu constater que le papier recyclé est une très bonne alternative pour la fabrication de nouvelle pâte à papier. Avec 1 kg de papier, nous avons pu avoir 894,45 g de pâtes exactement. Par contre, notre pâte n'a pas été défibrée comme elle aurait dû l'être. En effet, il est resté des grumeaux. Cela a été dû au temps de broyage qui n'était pas assez suffisant.

Lors de la transformation de la pâte en papier, nous avons subi quelques pertes au niveau de la pâte à cause des matériaux, que l'on pourrait qualifier de sédimentaires, et de mauvaises manipulations. Nous avons donc pu avoir 25 feuilles de 40 × 25 cm, mais avec des bords plutôt échancrés. Ceci est dû à la mauvaise répartition de la pulpe pendant le tamisage.

Les feuilles obtenues grâce à la pâte de papier recyclé avec une technique artisanale sont assez épaisses, cela signifie donc que le grammage est supérieur à la norme, qui est de 22g/m<sup>2</sup>. Nous avons également testé le passage de la lumière du jour

sur les feuilles et nous avons constaté que certaines parties laissent passer beaucoup de lumière tandis que d'autres n'en laissent passer que peu. Il y donc des parties opaques et d'autres transparentes. Ce qui confirme le fait que la pulpe a été répartie inégalement sur le tamis.

## **IV. ESSAI DE VALORISATION DE TEXTILE USÉS EN PAPIER**

### **IV.1. But de l'étude**

Avant l'avènement des papeteries mécanisées et des pâtes au sulfite de bois, les gens fabriquaient du papier à partir de vieux vêtements. Historiquement, les chiffons utilisés pour la fabrication du papier étaient en lin, mais les tissus en coton et en chanvre font également du papier de haute qualité.

Dans la partie bibliographique, nous avons pu voir que la transformation de chiffons en pâte à papier nécessite une machine que l'on appelle « pile hollandaise ». Le but de ce travail est donc d'essayer de produire de la pâte à papier avec du textiles usés (chiffons) et d'en faire des feuilles de papier, mais en ayant recours à la même méthode artisanale que pour celle du papier recyclé puisque ce sont deux matériaux fabriqués à partir de la même matière, la fibre végétale.

Par contre, puisqu'il s'agit cette fois-ci de fibres prétraitées, quelques autres mesures seront nécessaires pour arriver à des résultats.

### **IV.2. PREPARATION DE LA PATE A PAPIER**

#### **IV.2.1. Tri et collecte des matières de bases**

Pour notre essai expérimental, nous avons choisi du vieux linge de maisons, car ce sont les types de tissus les plus abondants dans les foyers.



**Photo 8 : Matière première**  
(Source : Auteur)

Cependant, il est très important de préciser que ces tissus doivent être en fibres naturels tels que le chanvre, le lin ou le coton, car ce sont les seuls matériaux pouvant être transformés en pâte à papier.

#### **IV.2.2. Préparation de la pulpe**

La première étape de la préparation de la pulpe est de découper finement le matériau en petit morceau pour faciliter le ramollissement des fibres qui le composent.



**Photo 9 : Tissus en morceau**  
(Source : Auteur)

Ensuite, on laisse les morceaux de tissus tremper pendant au moins 24 heures dans assez d'eau pour les couvrir. Saturer les fibres avec de l'eau les fera se décomposer plus rapidement pendant le processus de fabrication de la pâte.



**Photo 10 : Trempage des morceaux de tissus dans l'eau**  
(Source : Auteur)

La cuisson se fait à feu doux avec de l'eau et du carbonate de sodium. Le carbonate de sodium est utilisé pour aider à décomposer les fibres et à nettoyer la lignine, les sucres, les amidons et les cires du matériau. Ceci est évidemment très important lorsqu'on travaille avec des matières premières telles que le lin ou d'autres herbes, mais également utile lorsqu'on fabrique du papier à partir de fibres prétraitées comme des tissus.



**Photo 11 : Cuisson des morceaux de tissu**  
(Source : Auteur)

L'opération de préparation de la pulpe se fait avec un mixeur-mélangeur. Il est nécessaire de remplir l'appareil d'eau au tiers, d'ajouter deux ou trois poignées de bouillie de chiffon et de mélanger par incréments de 30 secondes jusqu'à ce que la pulpe ait la consistance de nuages doux et duveteux.



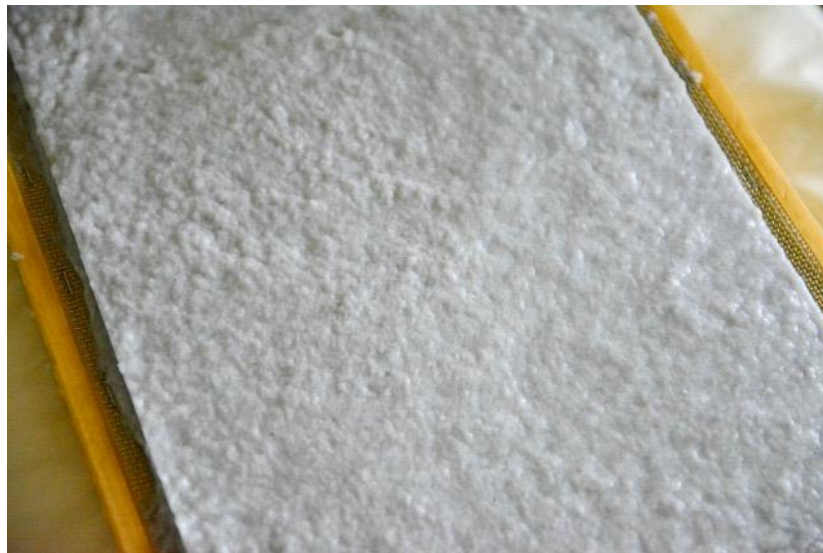
**Photo 12 : Pulpe de chiffon**  
(Source : Auteur)

### **IV.3. TRANSFORMATION DE LA PÂTE EN FEUILLE DE PAPIER**

La transformation de la pâte en feuille suit le même procédé artisanal que celui des pâtes de papier recyclé.

Pour cette fois, nous avons choisi de recourir à la seconde méthode de tamisage de la pulpe qui, en guise de rappel, consiste à plonger le tamis dans le bac en premier et d'y verser de la pulpe ensuite. La manipulation de la pâte est plus facile en utilisant cette technique. On remue bien la pulpe dans le tamis pour une bonne répartition.

On soulève ensuite le tamis et on le fait égoutter.



**Photo 13 : Feuille mise en forme**  
(Source : Auteur)

Le séchage des feuilles se fait de la même manière que pour les papiers recyclés. On retire d'abord les feuilles du tamis après les avoir bien laisser égoutter. On les dispose ensuite sur des tissus propres avec lesquels on les étendra au soleil pour qu'elles puissent bien sécher. Une fois bien sèches, les feuilles se décolleront facilement des tissus.



Photo 14 : Feuilles de papier en chiffon obtenues  
(Source : Auteur)

#### **IV.4. DISCUSSIONS SUR LES PRODUITS OBTENUS**

Cette expérience nous a permis de confirmer qu'il est tout à fait possible de produire de la pâte à papier avec du textiles usés sans avoir de pile hollandaise. Par contre, il a fallu un temps de cuisson assez long pour que le matériau soit assez ramolli. En effet, nous avons dû faire cuire notre matière à trois reprises pour qu'elle soit prête pour le broyage.

Finalement, 1 kg de chiffons nous a permis d'avoir 574,5 g de pâte. Comparé à notre essai sur les papiers recyclés, notre méthode n'a pas été très rentable avec les chiffons. Pendant notre essai de transformation de la pâte en papier, nous avons constaté que la pulpe n'a pas été totalement broyée, il est resté des grumeaux, que nous avons dû retirer. Nous n'avons donc pas pu transformer la totalité de la pâte en feuille.

Les feuilles obtenues restent toujours aussi opaques, mais nous avons constaté qu'elles ont diminué d'épaisseur. Elles sont plus homogènes, comparées aux feuilles en

pâte à papier recyclé. Ceci est dû au fait que la pulpe a bien été répartie lors de son tamisage.

La méthode d'obtention de pâte que nous avons utilisée permet donc d'avoir de la pâte, mais en petite quantité, c'est-à-dire qu'elle ne conviendrait pas à une production à grande échelle.

A titre de conclusion, nous résumons le processus de notre méthode artisanal par la figure suivante qui est une illustration récapitulative des essais de valorisation des déchets de papier et de vieux linges de tissus usés.



Figure 17 : Schéma récapitulatif de la fabrication artisanale du papier  
(Source : [www.paperslurry.com](http://www.paperslurry.com))

## **CONCLUSION**

Il est bien connu que la production de papier (comme les autres marques de l'industrie) a des effets énormes sur l'environnement. L'utilisation et la transformation des matières premières ont divers effets négatifs sur l'environnement.

Il existe plusieurs techniques qui peuvent atténuer les impacts négatifs sur l'environnement et elles ont également un effet économique positif. L'une de ces techniques est le recyclage, qui n'est pas seulement la valorisation des déchets. Le recyclage présente deux principaux avantages, la conservation des ressources naturelles, du côté des entrées du processus de fabrication et la diminution des composants nocifs fuyants dans l'environnement, du côté des sorties.

La production de papier à partir de fibres recyclées consomme moins d'énergie, préserve les ressources naturelles à savoir le bois et diminue la pollution de l'environnement.

Nos expérimentations, nous ont permis de constater que les pâtes à partir de fibre de récupération permettent d'obtenir d'excellents produits, malgré le fait que nous n'ayons pas obtenus les résultats escomptés.

En ce qui concerne particulièrement la valorisation des textiles usés ou vieux tissus en papier, c'est tout à fait faisable, mais c'est assez difficile et demande beaucoup de temps en ayant recours à la même méthode de fabrication de pâte que pour les papiers recyclés. Néanmoins, cette méthode est plus respectueuse de l'environnement puisqu'elle ne demande pas une grande quantité d'eau qu'avec une pile hollandaise. Pour de meilleurs résultats, quelques recherches supplémentaires seraient essentielles.

L'utilisation de la technique artisanale sur ces deux sources de fibres de récupération permet donc d'obtenir du papier, mais pas de très bonne qualité du fait du mauvais état des matériels utilisés. Ceci dit, la qualité des feuilles pourrait très bien être améliorée en utilisant du matériel adéquat.

## **RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE ET WEBOGRAPHIQUE**

- [1] Le Robert Junior illustré, Paris, 1993.
- [2] Dictionnaire Mini Larousse, Paris: Larousse, 2020.
- [3] «fr.wikipedia.org,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier>. [Accès le 05 Août 2021].
- [4] «Larousse.fr,» [En ligne]. Available: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/papier/57761>. [Accès le 25 août 2021].
- [5] G. COSTE, «Encyclopædia Universalis,» [En ligne]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/papier/>. [Accès le 01 octobre 2021].
- [6] «CNRTL,» [En ligne]. Available: <https://www.cnrtl.fr/definition/papier>. [Accès le 15 Août 2021].
- [7] «hmf.enseeiht.fr,» [En ligne]. Available: [http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0506/bei/bei\\_ere/2/html/Binome1/projet/general.htm](http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0506/bei/bei_ere/2/html/Binome1/projet/general.htm). [Accès le 03 Septembre 2021].
- [8] M. Bellis, «History of papermaking,» 26 Août 2020. [En ligne]. Available: [thoughtco.com/history-of-papermaking-1992316](http://thoughtco.com/history-of-papermaking-1992316). [Accès le 28 août 2021].
- [9] «Cerig,» [En ligne]. Available: <http://cerig.efpg.inpg.fr/dossier/papier-materiau/page01.htm>. [Accès le 28 Août 2021].
- [10] H. Q. Lam., Séparation sélective de la cellulose, des hémicelluloses et des lignines par le système catalyseur/solvant : acide formique/acide acétique, de matières végétales à teneur variable en silicium., Toulouse, 2000.
- [11] «cerig.efpg.inpg.fr,» avril 1999. [En ligne]. Available: <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/icg/dossiers/papier/chap2-fab.html>. [Accès le 15 septembre 2021].
- [12] X. Bonnevie, Etude d'un procédé alcalin de fabrication de pâte à papier à partir de plantes annuelles et du blanchiment de ces pâtes sans chlore ni composés chlorés - utilisation de l'ozone et des peroxydes., Toulouse, 1994.
- [13] S. Nassour, «Comptazine,» 30 Mai 2014. [En ligne]. Available: <https://www.comptazine.fr/post/le-recyclage-du-papier>. [Accès le 23 Octobre 2021].
- [14] L. Briois, Optimisation du traitement de la pâte à papier Kraft par un stade d'oxygénation en vue de son intégration dans une séquence de blanchiment., Toulouse, 1997.
- [15] N. Chouaib, Pâtes à haut rendement et fibres secondaires : mise en oeuvre de l'ozone et du peroxyde d'hydrogène., Toulouse, 1997.

- [16] K. Teschke, «ilocis.org,» [En ligne]. Available: <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo072.htm>. [Accès le 24 Octobre 2021].
- [17] D. G. e. É. OXANDABOURE, «CERIG MEMOIRE,» 03 novembre 2005. [En ligne]. Available: <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2005/blanchiment-pate-desencree.htm>. [Accès le 16 Octobre 2021].
- [18] G. A. e. J. Anderson, «ilocis.org,» [En ligne]. Available: <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo072.htm>. [Accès le 10 Septembre 2021].
- [19] Les fabriques de pâtes et papiers au Québec, Québec, 2012.
- [20] «cerig.pagora.grenoble-inp.fr,» 02 février 2004. [En ligne]. Available: <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/icg/dossiers/Papier/chap2-suite.html>. [Accès le 10 octobre 2021].
- [21] Les industries de fabrication et de transformation du papier et du carton ainsi que les industries graphiques, Namur: Institut de conseil et d'études en développement durable.
- [22] C. Mayo, «Fabriquer des livres, quels impacts sur l'environnement ?,» chez *L'analyse de cycle de vie (ACV) d'un livre de terre vivante*, MENS, Terre vivante.
- [23] «fr.wikipedia.org,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier#Traitements\\_compl%C3%A9mentaires](https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier#Traitements_compl%C3%A9mentaires). [Accès le 17 Novembre 2021].
- [24] L. d. f. d. p. : L. c. d. p. : c. d. papier, «Savoir.fr,» 5 Mai 2012. [En ligne]. Available: <https://environnement.savoir.fr/lhistoire-dune-feuille-de-papier-les-caracteristiques-du-papier/>. [Accès le 13 Octobre 2021].
- [25] C. MENARD, La fabrication du papier Du bois jusqu'au papier couché.
- [26] S. A. M, Industrial Environmental Control Pulp and Paper Industry, New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [27] W. P, B. A, M. J.J et L. A, Une étude de mortalité dans l'industrie française du papier et de la pâte à papier, *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 1998.
- [28] 25 Février 2017. [En ligne]. Available: <https://www.testextextile.com/fr/histoire-du-textile-description-%C3%A9tape-par-%C3%A9tape-de-l%27histoire-du-textile/>. [Accès le 09 Novembre 2021].
- [29] «Le Robert Dico en ligne,» [En ligne]. Available: <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/textile>. [Accès le 09 Novembre 2021].
- [30] «Le Parisien,» [En ligne]. Available: <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/TEXTILE/fr-fr/>. [Accès le 09 Novembre 2021].

- [31] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Textile>. [Accès le 09 Novembre 2021].
- [32] D. L. Reed, Pair of lice lost or parasites regained : the evolutionary history of anthropoid primate lice, 2007.
- [33] E. Wayland, Textiles préhistoriques: Le développement du tissu dans les âges néolithique et bronze avec une référence spéciale à l'Egée, Princeton University Press, 1992.
- [34] M. Bellis, L'histoire de l'habillement - Comment certains articles d'habillement se sont-ils développés?, Le groupe About, 2016.
- [35] «stringfixer.com,» [En ligne]. Available: [https://stringfixer.com/fr/Cloth\\_production](https://stringfixer.com/fr/Cloth_production). [Accès le 19 novembre 2021].
- [36] *Les archéologues découvrent les plus anciens matériaux de fibre connus utilisés par les premiers humains*, 2018.
- [37] M. E. Burkett, An Early Date for the Origin of Felt, Ankara: Journal of the British Institute of Archaeology, 1977.
- [38] L. B. Jørgensen, Stone-Age Textiles in North Europe, London Archetype Publications, 1990.
- [39] C. Julien, Histoire de l'humanité : De la Préhistoire aux débuts de la civilisation, UNESCO, 2000.
- [40] «fr.wikipedia.org,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Textile>. [Accès le 03 Novembre 2021].
- [41] G. R. Taylor et J. Payen, Les inventions qui ont changé le monde, Londres: Sélection du reader's digest, 1982.
- [42] E. laurent, «textileaddict.me,» [En ligne]. Available: <https://textileaddict.me/les-fibres-textiles-et-leur-classification/>. [Accès le 28 Novembre 2021].
- [43] «lechemindesoliviers.ca,» [En ligne]. Available: <https://lechemindesoliviers.ca/matieres-premieres-en-textile/>. [Accès le 03 décembre 2021].
- [44] Manuel sur l'Environnement Volume II : Agriculture, Secteur Minier et Energie, Industrie et Artisanat, 1996.
- [45] E. Szczerbinski, «CSMO\_fascicule\_proc\_fabrication\_web,» [En ligne]. Available: [https://www.csmotextile.qc.ca/wp-content/uploads/2018/11/fascicule\\_procedes\\_fabrication\\_web.pdf](https://www.csmotextile.qc.ca/wp-content/uploads/2018/11/fascicule_procedes_fabrication_web.pdf). [Accès le 15 octobre 2021].
- [46] [En ligne]. Available: <https://www.papier-artisanal.com/papier-chiffon/>. [Accès le 22

Novembre 2021].

- [47] «Valis Clausa Moulin à papier,» [En ligne]. Available: <https://www.moulin-vallisclausa.com/fr/content/8-fabrication>. [Accès le 15 Décembre 2021].
- [48] «Le Moulin à papier de la Rouzique,» [En ligne]. Available: <http://moulin-rouzique.com/la-fabrication-du-papier/#>. [Accès le 23 décembre 2021].
- [49] S. Breton-Gravereau, «La fabrication manuelle du papier en Occident,» chez *Matières et Formes*.
- [50] S. Breton-Gravereau, « La fabrication manuelle du papier en Occident».
- [51] B. Bakhouch, B. Beys, D. Delattre, C. Guérin et T. Tran, «Préparation du papier,» chez *Le livre de l'Antiquité à la Renaissance*.
- [52] A.-M. BRULEAUX et A. GIOVANNINI, «Module 8 - Section 2 : Connaître les supports et les matériaux des documents,» 2011.
- [53] «la-federation.com,» [En ligne]. Available: [https://www.la-federation.com/data/club-maille\\_58014/fiche/108/leaflet\\_fibres\\_synthetique\\_fr\\_080d5.pdf](https://www.la-federation.com/data/club-maille_58014/fiche/108/leaflet_fibres_synthetique_fr_080d5.pdf). [Accès le 05 Novembre 2021].

# **TABLE DES MATIÈRES**

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| REMERCIEMENTS                                                             | i   |
| SOMMAIRE                                                                  | ii  |
| GLOSSAIRE                                                                 | iii |
| ACRONYME                                                                  | iv  |
| LISTE DES ILLUSTRATIONS                                                   | v   |
| LISTE DES TABLEAUX                                                        | v   |
| LISTE DES PHOTOS                                                          | v   |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE                                                     | 1   |
| PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE                                          |     |
| I. LE PAPIER                                                              | 4   |
| I.1. GENERALITES SUR LE PAPIER.....                                       | 4   |
| I.1.1. Définition                                                         | 4   |
| I.1.2. Historique                                                         | 4   |
| I.2. PROCEDES DE FABRICATION DU PAPIER .....                              | 5   |
| I.2.1. Les matières de base                                               | 5   |
| I.2.2. Préparation de la pâte à papier                                    | 10  |
| I.2.2.1. Pour les pâtes vierges                                           | 10  |
| a) Les pâtes mécaniques ou thermomécaniques                               | 10  |
| b) Les pâtes chimiques                                                    | 13  |
| c) Les pâtes chimico-mécaniques                                           | 14  |
| I.2.2.2. Pour les pâtes à papier recyclé                                  | 15  |
| a) Le pulpage et défibrage                                                | 15  |
| b) L'épuration                                                            | 16  |
| c) Le désencrage et pressage à chaud                                      | 16  |
| I.2.3. Traitement de la pâte                                              | 17  |
| I.2.3.1. Principe du blanchiment                                          | 17  |
| I.2.3.2. Exemple : principe de blanchiment au peroxyde d'hydrogène        | 18  |
| I.2.4. Transformation de la pâte en papier                                | 20  |
| I.2.4.1. Les différentes étapes de la transformation de la pâte en papier | 20  |
| I.2.4.2. Traitement du papier                                             | 22  |
| a) Traitements physico-chimiques                                          | 23  |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| b) Traitements physiques/mécaniques                                                         | 24 |
| c) La finition                                                                              | 25 |
| I.3. PROPRIETES ET DIFFERENTS TYPES DE PAPIER .....                                         | 26 |
| I.3.1. Les propriétés mécaniques                                                            | 26 |
| I.3.2. Les propriétés visuelles et optiques                                                 | 27 |
| I.3.3. Les différents types de papier                                                       | 28 |
| I.4. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SUR LA SANTE PUBLIQUE DE<br>L'INDUSTRIE PAPETIERE..... | 28 |
| I.4.1. La pollution atmosphérique                                                           | 29 |
| I.4.2. La pollution de l'eau                                                                | 30 |
| II. LE TEXTILE                                                                              | 34 |
| II.1. TOUT SUR LE TEXTILE .....                                                             | 34 |
| II.1.1. Définitions                                                                         | 34 |
| II.1.2. Un peu d'histoire                                                                   | 34 |
| II.1.3. Procédé de fabrication                                                              | 36 |
| II.1.3.1. Les matières de base                                                              | 36 |
| a) Les fibres textiles et leur classification                                               | 36 |
| b) Classification des fibres textiles : les principes de base                               | 36 |
| c) Quelques exemples des fibres les plus utilisées dans l'industrie textile                 | 38 |
| II.1.3.2. Processus de fabrication des fibres naturelles                                    | 40 |
| a) Préparation des fibres naturelles                                                        | 40 |
| b) Filature et fabrication des fils et filés                                                | 40 |
| c) Tissage, bonneterie et tricotage (maille)                                                | 41 |
| II.1.3.3. Traitement du textile fini                                                        | 42 |
| a) Ennoblement textile                                                                      | 42 |
| II.2. ETUDE DE VALORISATION DES TEXTILES USES EN PAPIER .....                               | 44 |
| II.2.1. Introduction [46]                                                                   | 44 |
| II.2.2. Les matières éligibles pour être transformées en papier artisanal                   | 44 |
| II.2.3. La préparation des vieux tissus ou chiffons                                         | 45 |
| II.2.3.1. Le triage                                                                         | 45 |
| II.2.3.2. Le lissage                                                                        | 45 |
| II.2.3.3. Le découpage                                                                      | 45 |
| II.2.4. La préparation de la pâte à papier                                                  | 45 |
| II.2.4.1. Le principe de la pile hollandaise                                                | 46 |

|                                                   |                                                                     |           |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.2.4.2.                                         | La mise en forme                                                    | 48        |
| II.2.4.3.                                         | Le séchage de la feuille                                            | 48        |
| II.2.4.4.                                         | L'encollage                                                         | 49        |
| <b>PARTIE II : PARTIE EXPERIMENTALE</b>           |                                                                     |           |
| <b>III.</b>                                       | <b>VALORISATION DE PAPIER RECYCLÉ EN NOUVELLES PÂTES À PAPIER</b>   | <b>51</b> |
| III.1.                                            | OBJECTIF DE L'ETUDE .....                                           | 51        |
| III.2.                                            | PREPARATION DE LA PATE .....                                        | 51        |
| III.2.1.                                          | Collecte et tri de la matière première                              | 51        |
| III.2.2.                                          | Préparation de la pâte                                              | 52        |
| III.3.                                            | TRANSFORMATION DE LA NOUVELLE PATE EN PAPIER RECYCLE EN PAPIER .... | 55        |
| III.4.                                            | DISCUSSION SUR LES PRODUITS OBTENUS.....                            | 57        |
| <b>IV.</b>                                        | <b>ESSAI DE VALORISATION DE TEXTILE USÉS EN PAPIER</b>              | <b>58</b> |
| IV.2.                                             | PREPARATION DE LA PATE A PAPIER.....                                | 58        |
| IV.2.1.                                           | Tri et collecte des matières de bases                               | 58        |
| IV.2.2.                                           | Préparation de la pulpe                                             | 59        |
| IV.3.                                             | TRANSFORMATION DE LA PATE EN FEUILLE DE PAPIER.....                 | 62        |
| IV.4.                                             | DISCUSSIONS SUR LES PRODUITS OBTENUS .....                          | 63        |
| <b>CONCLUSION</b>                                 |                                                                     | <b>65</b> |
| <b>RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE ET WEBOGRAPHIQUE</b> |                                                                     | <b>66</b> |
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b>                         |                                                                     | <b>70</b> |

AUTEUR : **HERIMANANTSOA Miora**

TITRE: « **Etude de la valorisation du papier recyclé en nouvelles pâtes à papiers et essai de valorisation de textiles usés en papier** »

Nombre des pages : 65

Nombre des tableaux : 4

Nombre des figures : 17

Nombre de photos : 14



#### **RESUME:**

Le présent mémoire est une étude de la valorisation du papier recyclé en nouvelles pâtes à papier et essai de valorisation de textiles usés en papier.

Les objectifs de cette étude sont d'essayer de valoriser des matières premières alternatives dans la fabrication de papier à la main. Dans cette étude, les vieux papiers, c'est-à-dire du papier recyclé et du vieux tissus (chiffons) ont été utilisés comme matières première. Les feuilles de papiers ont été produites en utilisant une méthode très simple et respectueuse de l'environnement qui est la « méthode artisanale ».

MOTS CLES: fabrication du papier, pulpe, industrie papetière, matières premières, recyclage, déchets de papiers, papier de chiffon

TITLE: “**Study of the valuation of recycled paper into new paper pulps and trial of valuation of used textiles into paper**”

#### **ABSTRACT:**

This thesis is a study of the valuation of recycled paper into new paper pulps and trial of valuation of used textiles into paper.

The objectives of this study are to try to valorize alternative raw materials in the manufacture of hand paper. In this study, waste paper, i.e. recycled paper and old fabrics (rags) were used as raw materials. The sheets of papers were produced using a very simple and environmentally friendly method which is the “artisan method”.

KEYS WORDS: Papermaking, pulp, paper industry, raw materials, recycling, paper waste, rag paper

Rapporteur: Monsieur **RAKOTOARIVONIZAKA Ignace**, Maître de conférences, enseignant chercheur à l'ESPA

Adresse de l'auteur: Lot 0712 P 300 Antanivao

Contact : 0328984565 / mioraherimanantsoa01@gmail.com