



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

– المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie des Procédés et Energétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par

**RAOUNAK BEN AMARA
IMENE DENDENE**

VALORISATION ET OPTIMISATION DE L'INDUSTRIE PAPETIERE

Encadré par

Dr. Imen TOUHAMI
ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCA.	BELAMADI Riyadh	Président	ENSTI
MCA.	NEDJAH Nawel	Examineur	ENSTI

Année 2025

ملخص

تُقدّم هذه الدراسة بديلاً مستداماً لصناعة الورق عن طريق استبدال الألياف الحراجية بأربعة كتل حيوية محلية: البردي، المطاط، الزعرور، والصنوبر. أظهرت طريقة الطهو القلوي المعدلة المبتكرة فعاليتها، مع نتائج تقنية مُرضية (لزوجة، إنتاجية، متانة) منذ المرحلة الأولى من التجارب.

ومن بين الكتل الحيوية المختبرة، تميّز المطاط بأداءٍ أمثل، بينما أظهر البردي والزعرور والصنوبر نتائج مقبولة وإن كانت أقلّ جودة. تؤكد هذه الاستنتاجات جدوى سلسلة إنتاج ورقية دائرية، تجمع بين الابتكار الإجرائي والاستدامة البيئية.

سيسمح اعتماد هذا النموذج بتقليل الضغط على الغابات بنسبة 30 إلى 50% مع الحفاظ على الجدوى الاقتصادية، مما يمهد الطريق لإنتاج ورق أكثر احتراماً للنظم البيئية.

الكلمات المفتاحية:

ألياف بديلة؛ عملية كرافت؛ عجينة الورق؛ طبخ قلوي

Résumé :

Cette étude propose une alternative durable à l'industrie papetière en substituant les fibres forestières par quatre biomasses locales : papyrus, caoutchouc, néflier et pin. La méthode innovante de cuisson alcaline modifiée a démontré son efficacité, avec des résultats techniques satisfaisants (viscosité, rendement, résistance) dès la première phase d'expérimentation.

Parmi les biomasses testées, le caoutchouc s'est distingué par des performances optimales, tandis que le papyrus, le néflier et le pin ont présenté des résultats acceptables bien que moins probants. Ces conclusions valident la viabilité d'une filière papetière circulaire, combinant innovation procédurale et durabilité environnementale.

L'adoption de ce modèle permettrait de réduire de 30 à 50% la pression sur les forêts tout en maintenant une rentabilité économique, ouvrant ainsi la voie à une production papetière plus respectueuse des écosystèmes.

Mots-Clés :

Fibres alternatives ; Procédé kraft ; Pâte à papier ; Cuisson alcaline.

Abstract :

This study proposes a sustainable alternative for the pulp and paper industry by replacing forest fibers with four local biomass sources: papyrus, rubber, medlar, and pine. The innovative modified alkaline cooking method demonstrated its effectiveness, yielding satisfactory technical results (viscosity, yield, strength) from the first experimental phase.

Among the tested biomass sources, rubber stood out with optimal performance, while papyrus, medlar, and pine showed acceptable though less significant results. These findings validate the viability of a circular paper production chain, combining process innovation and environmental sustainability.

Adopting this model could reduce pressure on forests by 30 to 50% while maintaining economic viability, paving the way for more eco-friendly paper production.

Keywords :

Alternative fibers ; Kraft process ; Paper Pulp ; Alkaline cooking.

Remerciements

Nous remercions Allah pour Ses bienfaits, Sa miséricorde et le soutien qu'Il nous a accordé tout au long de ce travail. Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos parents pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inestimable, qui ont été essentiels à notre réussite. Du fond du cœur, merci.

Nous tenons à exprimer notre plus sincère reconnaissance à notre encadreuse,

Madame Imen TOUNAMI

Pour son précieux accompagnement tout au long de ce travail. C'est grâce à sa proposition initiale de ce sujet d'étude innovant que ce projet a pu voir le jour et se développer avec succès. Son esprit visionnaire et son approche créative ont constitué le point de départ essentiel de nos recherches.

Madame TOUNAMI a fait preuve d'un engagement remarquable en mettant à notre disposition son expertise scientifique et son temps précieux. Sa rigueur méthodologique, alliée à une grande bienveillance, a créé un environnement de travail à la fois exigeant et stimulant. Toujours disponible pour nous orienter et nous conseiller, elle a su guider nos pas avec patience et professionnalisme.

Nous adressons également nos remerciements les plus respectueux aux membres du jury, pour l'intérêt porté à notre travail et le temps consacré à son évaluation. Leur regard critique et leurs remarques constructives ont été d'une grande valeur.

Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs pour la qualité de leurs enseignements.

Nous remercions également l'équipe du laboratoire pour leur disponibilité, leur compétence et leur appui tout au long de notre travail.

Nos camarades et collègues ont aussi joué un rôle important par leur entraide, leur collaboration et les bons moments partagés.

Nous exprimons aussi notre sincère gratitude à notre famille élargie et à nos amis pour leur soutien moral constant.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, proches ou non, qui ont contribué de quelque manière à cette aventure.

Dédicace

- ♥ À mes parents Sihem, Abd el Krim,
- ♥ À mes grands-parents,
- ♥ À toute ma famille,
- ♥ À mon frère Islem et à ma sœur Rihab,
- ♥ À mon binôme Imene,
- ♥ À Serine, Imene et à tous mes amis,
- ♥ Et à toute personne qui lira ce travail,
- ♥ À MOI-RAOUNAK ...♥

RAOUNAK...

Dédicace

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude

À Mon père et ma mère... ♥

À Mon frère cher et précieux MOUHAMED... ♥

À Mes deux sœurs CHAIMA et RAOUNAK... ♥

À Mon grand-père adoré.

À Ma famille entière.

À mon binôme RAOUNAK... ♥

À Mes amies les plus chères et les plus proches de mon cœur : MOUNA,
FATTOM, AYA, IMENE, SERINE, et à tous mes amis... ♥

À Toute personne ayant lu ce travail.

Et une salutation spéciale pour moi.

Imene ...

Sommaire :

Chapitre I Description de l'entreprise du stage, motivation, problématique	3
Présentation des entreprises de stage	4
Chapitre II État De l'art et recherche Bibliographique.....	5
II.1 Étude Historique de la Pâte à Papier.....	6
II.1.1 les différents types de support de message à travers l'histoire	6
II.1.1.1 différents supports	6
II.2 Evolution du papier moderne.....	7
II.2.1 Matières premières utilisées	7
II.2.2 Impact écologique de la surexploitation des ressources forestières	7
II.3 Evolution des procédés.....	8
II.3.1 Procédé de kraft.....	8
II.3.2 Impacts et alternatives écologiques du procédé Kraft	8
Chapitre III Solutions proposées et/ou expérimentations menées.....	9
III.1 Matières premières	10
III.1.1 Prétraitement	12
III.1.2 Cuisson alcaline.....	13
III.1.3 Blanchiment :	14
III.2 Techniques d'analyse de la pâte finale	15
III.2.1 Indice de Kappa (IK).....	15
III.2.2 Degré de blanchiment.....	15
III.2.3 Rendement en Pâte Sèche.....	15
III.2.4. Évaluation de la résistance mécanique.....	16
III.2.5. Analyse de la pureté	16
III.2.6. Mesure du pH	17
III.2.7. Test d'absorption d'eau (Capacité de rétention).....	17
CHAPITRE IV <u>R</u> ÉSULTATS ET DISCUSSION.....	18
IV.1 Traitement de la poudre de feuilles post base : procédé Kraft.....	19
IV.1.1. Blanchiment de la pâte MKM.....	21
IV.2 Traitement optimisé de la poudre (modification des paramètres)	22
IV.2.1. Résultats de la cuisson alcaline et le blanchiment	23
IV.3. Choix du végétal optimal.....	26

IV.3.1 - Procédé optimisé pour le caoutchouc	26
IV.3.2. Analyse des résultats.....	26
IV.4. Inconvénients structurés par catégories	27
IV.5. Alignement avec les 17 Objectifs du développement durables(17ODD).....	27
<i>V Conclusion générale</i>	28
<i>V</i> Conclusion	29
<i>VI Références</i>	32
<i>Annexe</i>	35

Liste des figures :

Figure 1 : les feuille de caoutchouc	10
Figure 2 : les feuilles de Néflier	10
Figure 3 : les feuilles de Pin d'Alep	11
Figure 4 : la plante de Papyrus	11
Figure 5 : les tamis.....	12
Figure 6 : le spectre photomètre.	15
Figure 7 : Poudre des végétaux et liqueur de cette étude	19
Figure 8 : Comparaison des Indices de Kappa MKA et MKM par matière végétale.....	20
Figure 9 : structure de lignine	20
Figure 10 : la pâte MKM avant et après blanchiment	21
Figure 11 : les pâtes MKM finales et étalées.....	22
Figure 12 : la cuisson de les 04 végétaux.	23
Figure 13 : représente les courbes regroupés dans le tableau 6.	24
Figure 14 : les pâte MKM optimiser finale des 04 végétaux.	24
Figure 15 : le teste PH de 4 pâtes.	25
Figure 16 : liqueur après blanchiment.	25

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Méthode de Kraft adaptée (MKA).....	13
Tableau 2 : Méthode de Kraft modifiée (MKM)	14
Tableau 3 : Protocole de blanchiment	14
Tableau 4 : comparaison des résultats obtenus avec la méthode Kraft adaptée (MKA) et la méthode Kraft modifiée (MKM)	19
Tableau 5 : protocole d'optimisation de MKM.	22
Tableau 6 : Résultats de la cuisson alcaline et le blanchiment du MKM.	23
Tableau 7 : Les résultats de Procédé optimisé pour le caoutchouc.	26

Liste des abréviations :

MKA : Méthode de Kraft adaptée.

MKM : Méthode de Kraft modifiée.



Introduction générale

Introduction générale

L'industrie papetière occupe une position stratégique dans l'économie mondiale contemporaine, représentant un secteur clé pour le développement industriel et l'autonomie économique des nations. Dans le contexte algérien, cette industrie revêt une importance particulière car elle constitue un levier essentiel pour réduire la dépendance aux importations massives de papier et de produits dérivés. L'Algérie importe actuellement une quantité considérable de papier pour satisfaire ses besoins nationaux, générant un déficit commercial important dans ce secteur.

Le développement d'une industrie papetière nationale permettrait non seulement de réaliser des économies substantielles en devises, mais aussi de créer une chaîne de valeur locale complète, depuis la production de matières premières jusqu'à la transformation finale. Cette démarche s'inscrit parfaitement dans la stratégie nationale de diversification économique et de substitution aux importations, tout en contribuant à la création d'emplois durables et au transfert de technologies dans le secteur industriel.

Le choix stratégique des feuilles et résidus végétaux par rapport au bois traditionnel présente de multiples avantages dans le contexte spécifique de l'Algérie. Premièrement, les ressources ligneuses classiques sont limitées dans notre région semi-aride, où les forêts sont moins denses et nécessitent une protection environnementale accrue. L'exploitation du bois nécessite des arbres matures avec des cycles de croissance de plusieurs décennies, ce qui pose des défis de durabilité à long terme.

En revanche, les feuilles et résidus végétaux constituent une ressource renouvelable à cycle court, disponible annuellement sans compromettre la survie des plantes mères. Cette approche permet une exploitation plus respectueuse de l'environnement, réduisant la pression sur les écosystèmes forestiers fragiles. De plus, l'utilisation de résidus agricoles et de feuilles valorise des sous-produits généralement non exploités, créant ainsi une économie circulaire bénéfique pour les secteurs agricole et industriel.

L'adaptabilité de ces ressources aux conditions climatiques locales, leur disponibilité géographique étendue et leur coût d'acquisition relativement faible constituent autant d'arguments en faveur de cette orientation technologique innovante.

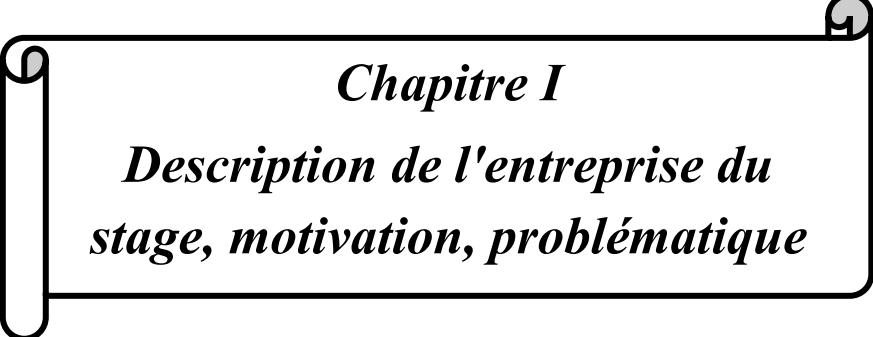
La présente étude est composée de 04 parties : une introduction générale où on parle du papier depuis la nuit des temps et son évolution à travers les ères ; puis un chapitre consacré à la matière première, son traitement ainsi que notre méthodologie. Nous avons mené une étude comparative exhaustive sur quatre types de matières végétales particulièrement prometteuses pour la production de pâte à papier : le papyrus (*Cyperus papyrus*), reconnu historiquement pour ses excellentes propriétés papetières ; les aiguilles de pin (*Pinus sp.*), abondantes dans les régions montagneuses algériennes ; les feuilles de néflier (*Eriobotrya japonica*), largement disponibles dans les zones méditerranéennes ; et enfin le caoutchouc (*Hévéa brasiliensis*), dont les propriétés fibres méritent une investigation approfondie.

Chacune de ces ressources présente des caractéristiques morphologiques, chimiques et structurelles spécifiques qui influencent directement leur aptitude à la transformation papetière.

Notre méthodologie rigoureuse a consisté en plusieurs étapes successives : d'abord un prétraitement mécanique et chimique des matières premières visant à éliminer les impuretés et à préparer les fibres, puis un traitement alcalin contrôlé pour dissoudre la lignine et libérer les fibres cellulosiques, suivi d'un processus de blanchiment optimisé utilisant le peroxyde d'hydrogène pour obtenir la blancheur désirée tout en préservant l'intégrité des fibres.

Un chapitre 03 où on analyse nos résultats pour voir où on en est et quelle matière possède un avenir prometteur dans la fabrication du papier en Algérie. L'analyse complète des résultats obtenus a porté sur plusieurs paramètres critiques : l'indice de Kappa (indicateur de la teneur résiduelle en lignine), le rendement de transformation, la résistance mécanique, le pH final, l'absorbance et les caractéristiques colorimétriques.

Cette évaluation multidimensionnelle nous a permis d'établir une comparaison objective des performances de chaque matériau selon des critères techniques précis et des standards industriels reconnus, nous conduisant finalement vers des conclusions pratiques pour le choix optimal d'une matière première adaptée au développement de l'industrie papetière locale. Et nous avons terminé par une conclusion.



Chapitre I
Description de l'entreprise du
stage, motivation, problématique

Présentation des entreprises de stage :

Le stage a été effectué au sein de l'entreprise Ets MANSOURI - Complexe Algérien de Papeterie (CAP), SARL, une unité industrielle spécialisée dans la transformation du papier et la fabrication de produits papetiers, principalement les cahiers scolaires et les rames de papier aux formats A4 et A3. Créée en 1985 et opérationnelle depuis le 1er janvier 1987, l'entreprise est située dans la zone industrielle de Sedrata, dans la wilaya de Souk Ahras. Elle s'étend sur une superficie totale de 84 hectares, avec une surface bâtie de 15 360 m², et emploie environ 46 personnes. L'unité dispose de plusieurs zones fonctionnelles : entrepôts de matières premières, ateliers de production (offset, transformation, vernissage, coupe), zones de stockage et d'élimination des déchets. L'ensemble du processus de production repose sur des matières premières importées, principalement des bobines de papier blanc, de l'ancre, des additifs, de l'alcool isopropylique, et des cartons pour la couverture. La production se fait en plusieurs étapes, notamment l'impression offset des couvertures, le vernissage, la coupe, puis l'assemblage des pages intérieures selon deux procédés (intégrale ou piqueuse) en fonction du type de cahier. La fabrication des rames de papier constitue également un volet important de l'activité. Les déchets solides (papier, carton, métal) issus du processus sont récupérés pour être recyclés. L'entreprise joue un rôle économique et social notable en créant des postes d'emploi et en favorisant la disponibilité locale de fournitures scolaires.

Motivation :

1. **Dépendance critique** : L'industrie papetière repose massivement sur les fibres forestières, accentuant la déforestation et la perte de biodiversité.
2. **Impact environnemental** : Les procédés conventionnels (cuisson chimique) génèrent des rejets polluants et une forte empreinte carbone.
3. **Innovation limitée** : Peu d'alternatives industrielles exploitent efficacement des fibres locales non forestières.
4. **Verrou technique** : L'adaptation de procédés durables (ex : cuisson alcaline) aux biomasses alternatives reste peu documentée.

Problématique :

Développer une filière circulaire économiquement viable, en substituant les ressources forestières par des fibres végétales locales (caoutchouc, papyrus, etc.) via un procédé optimisé, pour concilier performance industrielle et préservation des écosystèmes.



Chapitre II
État De l'art et recherche
Bibliographique

II.1 Étude Historique de la Pâte à Papier

Le massif du Hoggar (de notre pays l'ALGERIE), avec ses gravures rupestres, est l'un des plus anciens témoignages de la transmission humaine de l'information par l'image et les symboles [1]. Ces œuvres, bien que durables, révèlent les limites des supports lithiques : leur immobilité et leur vulnérabilité face à l'érosion ont poussé les civilisations à développer des alternatives plus pratiques.

L'évolution vers des matériaux légers et transportables, comme le parchemin, les tablettes d'argile, ou les écorces, marque un tournant dans l'histoire de l'écriture [2]. Néanmoins, ces supports conservaient des limitations économiques et pratiques que seul le papyrus puis le papier allaient résoudre.

Cependant, c'est l'invention du papyrus en Égypte, puis du papier en Chine, qui révolutionne la communication par leur triple avantage : facilité de production, coût accessible et résistance supérieure. Fabriqué à partir de fibres végétales (lin, chanvre, ou bois), le papier supplante peu à peu les supports coûteux et fragiles, favorisant ainsi la diffusion du savoir à travers les âges [3]. Cette innovation, perfectionnée par les Arabes au VIII^e siècle, a posé les bases de la production moderne de pâte à papier, transformant durablement les moyens de transmission du savoir humain.

II.1.1 les différents types de support de message à travers l'histoire [2].

Les civilisations ont développé divers supports pour transmettre des messages avant la naissance du papier moderne.

II.1.1.1 différents supports

a) Supports Rigides

- **Tablettes d'argile** : Utilisées par les Sumériens pour l'écriture cunéiforme.
- **Pierre et stèles gravées** : Employées pour les inscriptions monumentales.

b) Supports flexibles et transportables

- **Papyrus** : Fabriqué à partir de tiges de la plante *Cyperus papyrus*, il fut le premier support léger et portable.
- **Parchemin et cuir** : Issu de peaux animales traitées, il remplaça progressivement le papyrus en Europe pour sa résistance.
- **Bois et écorces** : Utilisés dans diverses cultures (comme les tablettes de bois romaines ou les écorces en Chine ancienne).

- **Soie** : Réservée aux textes importants en raison de son coût élevé.

c) Invention du papier [4].

- ✓ **Papier de chiffon** : Cai Lun perfectionna la technique à base de fibres de lin, de chanvre et de vieux textiles, en Chine.
- ✓ **Les moulins à papier** : qui représente une révolution offerte par la civilisation arabo-musulmane qui s'est développée en Espagne puis a rejoint l'Europe.
- ✓ **Papier à base de bois** : L'industrialisation s'installe et est diverse la production massive à partir de pâte de bois, rendant le papier plus accessible.

d) Papier moderne

Actuellement, le papier est principalement fabriqué à partir de cellulose de bois, mais des versions recyclées et écologiques (bambou, chanvre) séduisent plus les chercheurs.

II.2 Evolution du papier moderne

II.2.1 Matières premières utilisées

Les végétaux riches en fibres ligneuses dominent toujours la production papetière moderne. Parmi les principales essences utilisées figurent l'eucalyptus (notamment au Brésil et en Chine), le pin (États-Unis, Scandinavie) et l'érable (Canada, Russie).

Par ailleurs, le bambou (Chine, Inde) et le chanvre (Chine) gagnent en popularité grâce à leur durabilité accrue. En 2023, le Brésil représente 40 % de la production mondiale de pâte d'eucalyptus, tandis que la Chine domine la production de pâte de bambou avec environ 12 millions de tonnes par an [5].

Les fibres non-ligneuses issues des résidus agricoles, comme les pailles et la bagasse, constituent environ 15 % des matières premières utilisées dans l'industrie papetière [6-5].

L'industrie évolue aujourd'hui vers des mélanges innovants, notamment des combinaisons eucalyptus-chanvre, afin d'améliorer à la fois la qualité du papier et sa durabilité.

II.2.2 Impact écologique de la surexploitation des ressources forestières

Sur le plan environnemental, l'exploitation du bois forestier pour la production de pâte à papier génère des impacts écologiques majeurs qui requièrent une attention immédiate. D'après une étude récente de la **FAO (2023) [6]**, près de 40 % de l'exploitation forestière industrielle mondiale est consacrée à l'industrie papetière, entraînant chaque année la déforestation de 10

millions d'hectares. Ce phénomène provoque une perte alarmante de biodiversité, avec 27 % des espèces forestières menacées d'extinction selon le rapport de l'IPBES (2022) [7]. Face à ces constats préoccupants, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (2023) préconise une transition rapide vers des fibres alternatives.

II.3 Evolution des procédés

Historiquement, deux procédés majeurs ont dominé : le procédé au sulfite, apparu en 1866, et le procédé Kraft, introduit en 1879 [8] ; Le procédé Kraft, qui utilise une cuisson alcaline à base de sodium et sulfure, est aujourd'hui encore le plus largement utilisé, représentant environ 80 % de la production mondiale de pâte à papier [9].

Les innovations les plus récentes, entre (2020 et 2024), quant à elles se concentrent sur des approches biotechnologiques et circulaires [10-14].


Malgré ces avancées technologiques, le procédé Kraft reste dominant en raison de son efficacité industrielle, de sa rentabilité et de son intégration dans les chaînes de production mondiales.

II.3.1 Procédé de kraft

Le NaOH et le Na₂S agissent de manière complémentaire pour dissoudre sélectivement la lignine à une température de 170°C. Les ions OH⁻ attaquent les liaisons esters de la lignine et provoquent un gonflement des fibres du bois. Simultanément, le Na₂S (sulfure de sodium) libère des ions HS⁻ qui fragmentent la structure macromoléculaire de la lignine en rompant ses liaisons éthers C-O-C et en réduisant ses groupes phénoliques. Et de là on a la lignine transformée en fragments solubles, tandis que la cellulose - naturellement résistante aux bases fortes - reste intacte [15-16].

II.3.2 Impacts et alternatives écologiques du procédé Kraft

Le procédé Kraft, bien qu'efficace, présente des impacts négatifs majeurs sur l'environnement (émissions polluantes), l'économie (dépendance aux ressources) et la santé publique (exposition aux produits chimiques). Des solutions innovantes comme les enzymes ou les liquides ioniques offrent des alternatives prometteuses, mais nécessitent encore des recherches pour une application industrielle viable. Une transition vers des méthodes plus propres s'avère essentielle pour concilier rentabilité et développement durable [17-18].



Chapitre III
Solutions proposées et/ou
Expérimentations menées

III.1 Matières premières

Afin de proposer une alternative à l'exploitation forestière, nous avons choisi d'utiliser des matières premières abondantes en Algérie pour produire une pâte à papier innovante. Cette pâte est issue de quatre déchets feuillus algériens : le néflier, le caoutchouc, le pin d'Alep et le papyrus.

a) Hévée

Un arbre Hévée (Caoutchouc) adulte (10 ans) perd en moyenne 30 feuilles par jour, pouvant atteindre 60 en cas de stress hydrique, ce qui représente environ 5,5 kg de matière sèche par an. Ces déchets, riches en cellulose (40%), constituent une ressource renouvelable pour la fabrication de pâte à papier : 100 arbres fournissent ainsi 220 kg de cellulose par an [19-20].



Figure 1 : les feuilles de caoutchouc.

b) Eriobotrya japonica

Un Eriobotrya japonica (Néflier) adulte de 8 ans perd en moyenne 7 feuilles par jour, soit environ 3,65 kg de matière sèche par an sous climat méditerranéen algérien. Ces feuilles, contenant environ 35 % de cellulose, représentent une ressource durable pour la production de pâte à papier : 100 néfliers fournissent ainsi 128 kg de cellulose par année [21-22].



Figure 2 : les feuilles de Néflier .

c) *Pinus halepensis* (Pin d'Alep)

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) adulte libère quotidiennement environ 35 aiguilles, générant annuellement 10,2 kg de matière sèche. Cette biomasse présente une composition d'une teneur en cellulose d'environ 38% et une présence notable de lignine. La transformation de ces déchets naturels en pâte à papier offre des perspectives prometteuses : cent pins peuvent produire 388 kg de cellulose par année [23-24].



Figure 3 : les feuilles de Pin d'Alep

d) *Cyperus papyrus* (Papyrus)

Ancêtre millénaire du papier, le papyrus (*Cyperus papyrus*) révèle un potentiel agronomique remarquable. Cette plante démontre une productivité exceptionnelle avec une biomasse sèche pouvant atteindre jusqu'à 24 kg/m²/an, grâce à son cycle de croissance ultra-rapide de cinq semaines. Sa productivité aérienne peut atteindre 21 grammes par mètre carré par jour, générant une cellulose longue de haute qualité ($\approx 45\%$) particulièrement adaptée à l'industrie papetière moderne [25].



Figure 4 : la plante de Papyrus

III.1.1 Prétraitement

Afin de préparer les matières végétales pour les expériences, un prétraitement a été réalisé en trois étapes principales.

a) Cueillette :

Les feuilles de quatre espèces végétales ont été collectées dans différentes zones de la wilaya d'Annaba, en Algérie. Il s'agit du pin, du papyrus, du néflier et du caoutchouc. La cueillette a été effectuée manuellement, en sélectionnant des feuilles saines et mûres directement sur les arbres identifiés dans leur habitat naturel.

b) Lavage :

Après la récolte, les feuilles ont été soigneusement lavées à l'eau claire afin d'éliminer les impuretés, la poussière et toute contamination extérieure. Ce lavage vise à garantir la propreté des échantillons avant leur utilisation. Une fois lavées, les feuilles ont été étalées à l'air libre dans un endroit propre et sec pour un séchage naturel à température ambiante, en vue de réduire leur taux d'humidité.

c) Broyage fin :

Une fois les feuilles complètement sèches, elles ont été soumises à un broyage en deux étapes successives à l'aide de deux mixeurs. Le premier broyage permet une réduction initiale de la taille des particules, tandis que le second, plus performant, permet d'obtenir une poudre plus fine. Enfin, la poudre obtenue a été tamisée à l'aide d'un tamis de maille 125 micromètres afin de standardiser la granulométrie et d'assurer une homogénéité des échantillons pour les essais expérimentaux.



Figure 5 : les tamis.

III.1.2 Cuisson alcaline

A-But de la cuisson :

L'étape de la cuisson kraft a pour objectif principal de réduire significativement la teneur en lignine contenue dans les feuilles végétales sélectionnées. La lignine est un polymère naturel présent dans les parois cellulaires des plantes, contribuant à la rigidité et à la cohésion des fibres. Toutefois, sa présence excessive est indésirable dans la fabrication de la pâte à papier, car elle altère la blancheur, la pureté ainsi que la stabilité du papier au fil du temps. Le procédé de cuisson kraft consiste à traiter les matières végétales dans une solution alcaline, généralement composée d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de sulfure de sodium (Na₂S). Ce traitement permet la dissolution et l'extraction de la lignine tout en préservant la structure des fibres de cellulose, éléments essentiels pour la production de papier. La réduction de la lignine améliore sensiblement la qualité de la pâte finale, en facilitant les étapes de blanchiment, en augmentant la résistance mécanique du papier et en limitant sa dégradation.

Ainsi, la cuisson kraft constitue une étape essentielle dans le procédé de fabrication de la pâte à papier, car elle permet d'optimiser la qualité du produit tout en maintenant l'intégrité des fibres cellulosiques [26-27].

B- Protocole de la cuisson (Kraft) :

Les tableaux suivants présentent les paramètres opératoires des cuissons alcalines appliquées aux différents végétaux, visant à éliminer sélectivement la lignine tout en préservant l'intégrité de la cellulose.

Tableau 1 : Méthode de Kraft adaptée (MKA)

<i>Protocol de KRAFT classique [28] adapté : Méthode de KRAFT adaptée (MKA)</i>						
Matière végétale	Temps de cuisson	Température	NaOH%	Na₂S%	Masse	Fraction massique
Papyrus	1H	110°C	7	6	15g	6/1
Pin	2H15	90°C	8	3	15g	8/1
Néflier	1H30	120°C	13	1	15g	7/1
Caoutchouc	2H	150°C	12	2	15g	7/1

Tableau 2 : Méthode de Kraft modifiée (MKM)

<i>Protocole de cuisson alcaline de cette étude : Méthode de Kraft modifiée (MKM)</i>					
Matières végétales	Temps de cuisson	Température	NaOH%	Masse	Fraction massique
Papyrus	45min	110°C	7	15g	6/1
Pin	2H	90°C	8	15g	8/1
Néflier	1H15	120°C	13	15g	7/1
Caoutchouc	1H45	150°C	12	15g	7/1

III.1.3 Blanchiment : Le tableau ci-dessous présente la concentration en peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) utilisée lors de l'étape de blanchiment. Cette opération, appelée blanchiment alcalin, permet d'éliminer l'alignine résiduelle qui affecte négativement les propriétés optiques et mécaniques du papier.

Tableau 3 : Protocole de blanchiment

Matière première	H₂O₂ (25%)	Temps de blanchiment
Néflier	10/1	11 jours
Pin	12/1	14 jours
Caoutchouc	13/1	15 jours
Papyrus	06/1	07 jours

III.2 Techniques d'analyse de la pâte finale

III.2.1 Indice de Kappa (IK) : Le calcul de l'indice de Kappa pour la quantification de la lignine résiduelle est crucial lors de la préparation de la pâte à papier. Cet indice est calculé selon le protocole suivant [29] :

1. On a pesé 1 g de pâte sèche (P_{sec}) dans un bécher (**Réacteur 1 (R1)**)
2. Après on a effectué l'ajout de 25 ml de $KMnO_4$ à 0,1M ; 25 ml d' H_2SO_4 à 4M et de 0,5 ml de KI à 0,5 M dans le **R1**.
3. Une agitation de 10 min a été effectuée à une température d'environ 25°C sous agitation.
4. Le contenu du **R1** est ensuite titrer avec du thiosulfate de sodium ($Na_2S_2O_3$) à 0,1M.

$$\text{Indice Kappa} = \frac{(V_{\text{témoin}} - V_{\text{échantillon}}) \times 0.1}{P_{sec}} \times 16,6$$

- ❖ Si **IK** est compris entre 1-5 : Présence de très faible quantité de lignine.
- ❖ Si **IK** est nettement supérieur à 8, ceci indique que la cuisson alcaline est insuffisante.

III.2.2 Degré de blanchiment : Le blanchiment chimique vise à dépolymériser et éliminer la lignine résiduelle avec des agents comme le dioxyde de chlore ou le peroxyde d'hydrogène. La méthode de vérification se fait à l'aide d'un spectre photomètre ou la longueur d'onde devrait être aux alentours de 457 nm [30].



Figure 6 : le spectre photomètre.

III.2.3 Rendement en Pâte Sèche : Cette analyse nous donne une idée sur la rentabilité de la valorisation de la fibre choisie. Donc en réalité ce rendement nous donne une idée sur l'efficacité de la transformation (pertes ou de matière ou plus exactement transfert de matière). Cette technique d'évaluation a été calculée selon la formule ci-dessus [31] :

$$\text{Rendement (\%)} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \times 10$$

Où :

- P_1 est le poids de 10 grammes de poudre de feuilles brutes.

- Et P_2 est le poids des fibres résiduelles séchées à 105°C à l'étuve après cuisson et blanchiment.

Alors si le rendement est :

- ❖ Si le **Rendement** est de 40-60% : Le procédé est considéré d'acceptable.
- ❖ Si le **Rendement** <30% : Procédé trop destructeur (taux de lignine/cellulose défavorable).

III.2.4. Évaluation de la résistance mécanique : Le principe consiste à évaluer la solidité de la pâte afin de fabriquer un papier résistant. La procédure nécessite un dynamomètre où on placera 10 bandes de (10 mm × 10 mm). Ensuite une mesure de force en newton (N) est enregistrée ou moment de la déchirure par traction en tirant délicatement sur les bords. Cette solidité est calculée par [32] :

$$\text{Résistance (kN/m)} = \frac{\text{Force moyenne (N)}}{\text{Largeur (m)}}$$

- ❖ **Résistance** >3.0 kN/m : Fibres longues implique bonne qualité de la pâte.
- ❖ **Résistance** <1.5 kN/m : Fibres dégradées implique trop de cuisson ou aussi broyage ultra fin.

III.2.5. Analyse de la pureté : Cette analyse a pour but de quantifier les minéraux. La poudre végétale de masse $M_1 = 2$ grs, est placée dans le four à moufle de température de $\pm 475^\circ\text{C}$. Une fois la poudre refroidie, une pesée est effectuée, classée de M_2 . Le taux de cendres est calculé selon la formule suivante [33] :

$$\text{Taux de cendres (\%)} = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \times 100$$

- ❖ Si le taux est inférieur à <0.5%, ceci implique que la pâte préparée est idéale pour fabriquer le papier et que le taux de pureté est élevé.

III.2.6. Mesure du pH : Cette mesure qui s'effectue même par pH-mètre Contrôle l'acidité/alcalinité résiduelle (critique pour la stabilité du papier).

- ❖ Si le pH est entre 6-8, dans la marge du neutre, donc il est considéré de neutre (**idéal**) ;
- ❖ Si le pH est < 6 ; ceci implique qu'il y a un risque de dégradation du papier car une acidité élevée fragilise la fibre et engendre un papier fragile ;
- ❖ Si le pH est > 9 ; Ceci est expliqué par l'existence des résidus de blanchiment. Ce pH crée un risque de décoloration du papier dans le temps [34].

III.2.7. Test d'absorption d'eau (Capacité de rétention) : Le but principal de cette mesure est de connaître la capacité de la pâte à retenir l'eau. La technique de ce test [35] est la suivante :

1. Une pesée de 10g de pâte sèche M_1
2. Ensuite cette pesée est immergée dans 200ml d'eau pendant 30 minutes
3. On égoutte sur tamis fin pendant 10 minutes
4. Et enfin on pèse cette pâte humide M_2 et on calcule le taux d'adsorption selon la formule suivante :

$$\text{Absorption (\%)} = \left(\frac{M_2}{M_1} - 1 \right) \times 100$$

L'interprétation de la valeur calculée d'absorption est la suivante :

- ❖ Si l'absorption est comprise entre 300-500%, implique donc une bonne rétention et de la fibre est considérée comme intacte (bien gonflées),
- ❖ Si l'absorption est comprise entre 200-300%, implique une rétention moyenne. Donc la qualité du papier est standard.
- ❖ Si l'absorption est comprise < 200%, veut dire que les fibres sont dégradées, ce qui engendrera une rigidité et une faible élasticité du papier. Alors ce type de papier est classé de faible qualité.



CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Traitement de la poudre de feuilles post base : procédé Kraft

Comme il a été avancé dans la section III.1.2, sur les deux types de Kraft (MKA et MKM) que nous avons appliqué sur nos 4 types de fibres afin de comparer les deux méthodes et partir dans l'aventure de l'optimisation. **Figure 7**, représente nos fibres en poudre ainsi que les liqueurs après cuisson selon le procédé **MKM**. Les indices d'évaluation sont dressés dans le **tableau 04**.

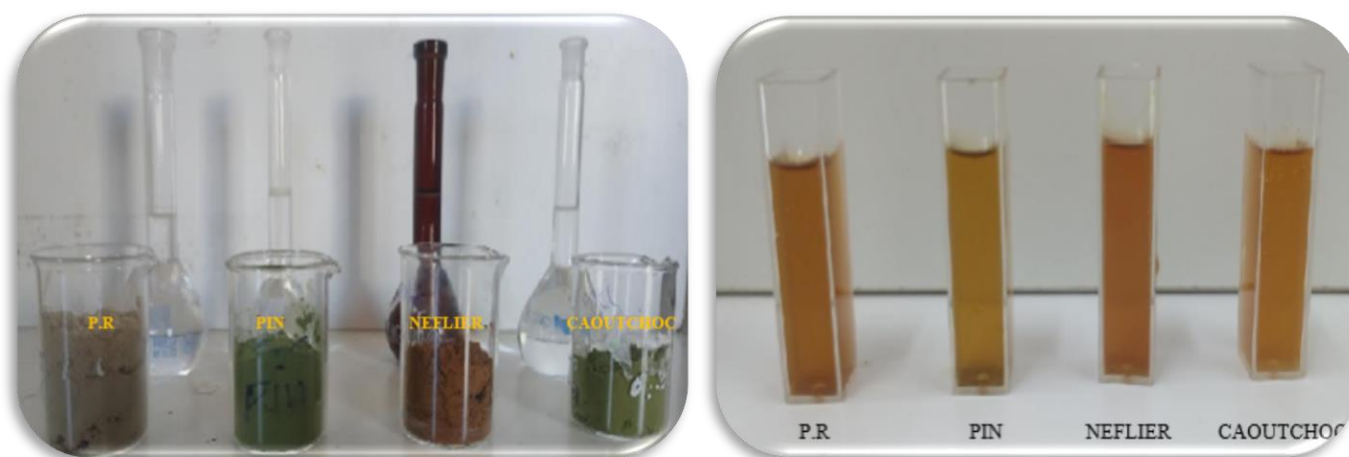


Figure 7 : Poudre des végétaux et liqueur de cette étude

Tableau 4 : comparaison des résultats obtenus avec la méthode Kraft adaptée (MKA) et la méthode Kraft modifiée (MKM)

Matières végétales	Couleur Liqueur / MKA	Couleur liqueur/ MKM	Indice de Kappa MKA	Indice de Kappa MKM
Papyrus	Vert olive	Doré	3	2
Pin	Brun-noir	Ambre	11	6.8
Néflier	Jaune-vert	Jaune pâle	4.9	5
Caoutchouc	Brun foncé	Brun roux	9	4.1

Une illustration graphique des indices de Kappa est présentée dans la **figure 8**.

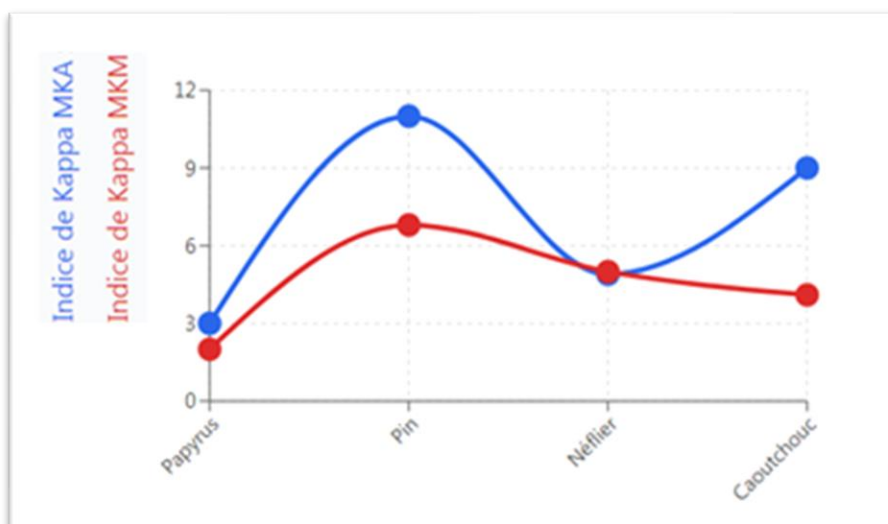


Figure 8 : Comparaison des Indices de Kappa MKA et MKM par matière végétale. L'ajout de Na_2S , procédé Kraft complet (MKA) présente une délignification non significative par rapport au procédé MKM. Aussi la couleur foncée des liqueurs le prouve.

La liqueur passe d'une teinte **foncée MKA** à une couleur **plus claire MKM**, confirmant une meilleure extraction des composés phénoliques.

Le **Caoutchouc** et le **pin** montrent une meilleure réponse au **MKM** par rapport aux deux autres qui n'ont pas vraiment bougés de leur classe.

La mesure de la longueur d'onde des quatre liqueurs était entre [600nm-650 nm], ceci est expliqué par la présence de lignine dissoute.

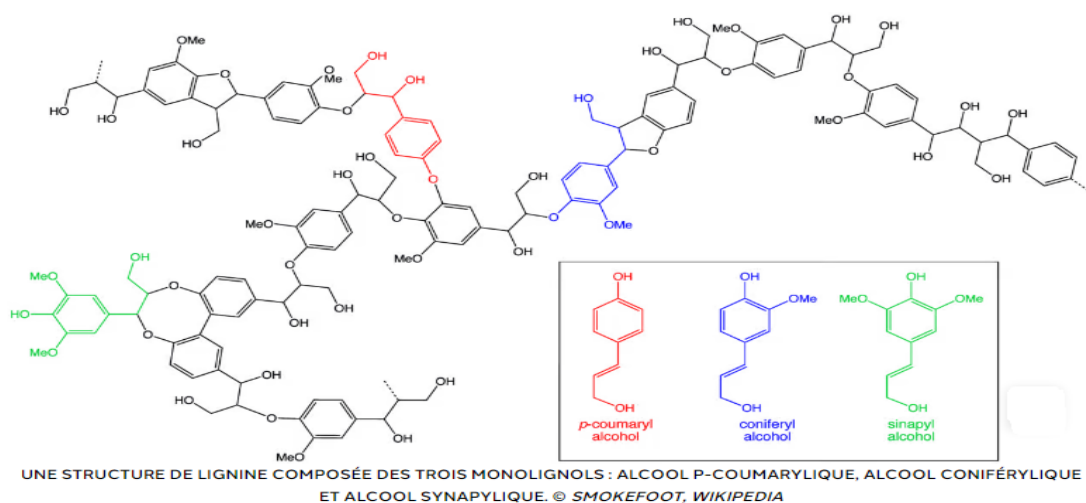


Figure 9 : structure de lignine

IV.1.1. Blanchiment de la pâte MKM : Afin de valoriser notre première optimisation, l'étape de blanchiment a été réalisée, dont le résultat de la pâte finie est représenté dans les figures ci-dessous :



Figure 10 : la pâte MKM avant et après blanchiment



Figure 11 : les pâtes MKM finales et étalées



Figure 11 : les pâtes MKM finales et étalées

IV.2 Traitement optimisé de la poudre (modification des paramètres)

Dans le but d'optimiser encore plus le procédé annoncé dans la séquence III.1.2. Cette optimisation souhaitée par notre état qui rentre dans le développement durable. L'optimisation poussée adonné des résultats acceptables. L'optimisation est résumée dans le tableau 5 suivant :

Tableau 5 : protocole d'optimisation de MKM.

Traitement post base : MKM					
Matières végétales	Temps de cuisson	Température	NaOH%	Masse	Fraction massique
Papyrus	30 min	80°C	4	25 g	10/1
Pin	30 min	80°C	4	25 g	10/1
Néflier	30 min	80°C	4	25 g	10/1
Caoutchouc	30 min	80°C	4	25 g	10/1

Cette cuisson a donné au départ une pâte assez foncée **figure 11** pour les 04 végétaux ; preuve de libération de tanin, qui explique la dégradation de la molécule lignine.

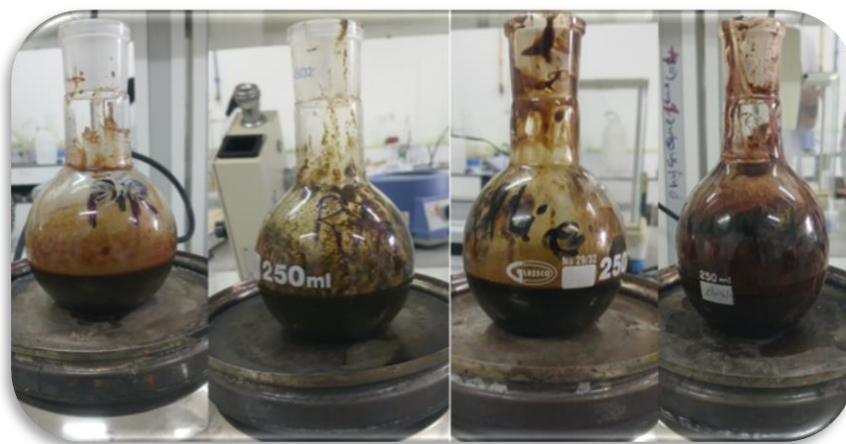


Figure 12 : la cuisson des 04 végétaux.

IV.2.1. Résultats de la cuisson alcaline et le blanchiment : Le procédé de traitement alcalin utilisant la méthode post-base MKM, suivi d'une étape de blanchiment, a été évalué. Les résultats concernant les indices de qualité de la pâte (Figure 14) sont présentés dans le tableau 06.

Le tableau 6 : Résultats de la cuisson alcaline et le blanchiment du MKM.

Matières végétales	Couleur Pâte	Indice de Kappa	Rendement %	Résistance	PH	Taux d'absorbance	Longueur d'onde (nm)
Papyrus	Blanc gris	3	85	4	7	280	490
Pin	Vert bouteille	4	76	2,1	7	270	557
Néflier	Vert jaune	4	95	1.3	7	260	580
Caoutchouc	Blanc beige	2	80	2.85	7	250	495

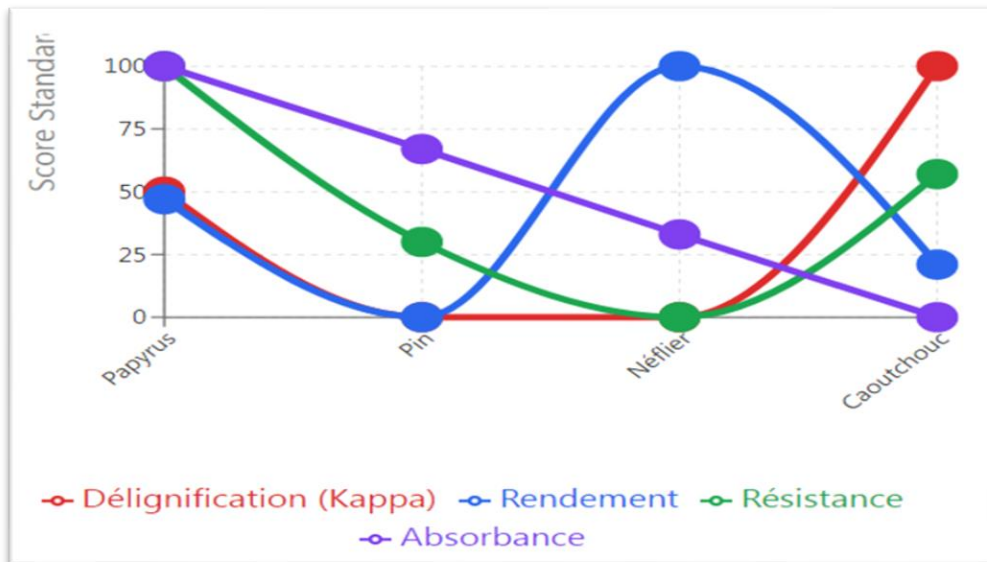


Figure 13 : représente les courbes regroupés dans le tableau 6.

Après avoir standardisé les résultats afin de les introduire sur le même graphe, nous avons remarqué ;

1. **Papyrus** semble avoir la meilleure performance globale
2. **Caoutchouc** excelle en délignification
3. **Néflier** a le meilleur rendement
4. **Pin** a les performances les plus variables

Le résultat de la pâte obtenue représenté par l'image ci-dessous pour chaque type de fibre.



Figure 14 : les pâte MKM optimiser finale des 04 végétaux.



Figure 14 : les pâte MKM optimiser finale des 04 végétaux.

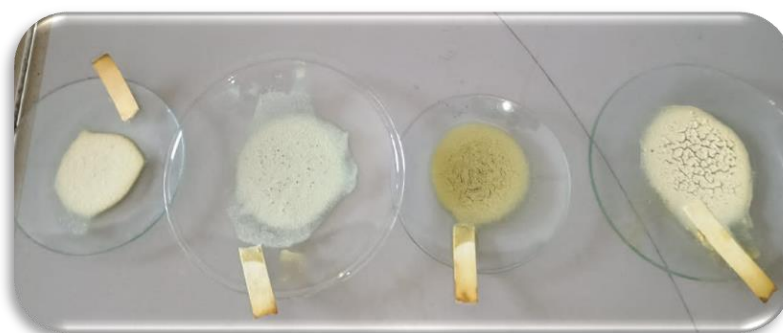


Figure 15 : le teste PH de 4 pâtes.

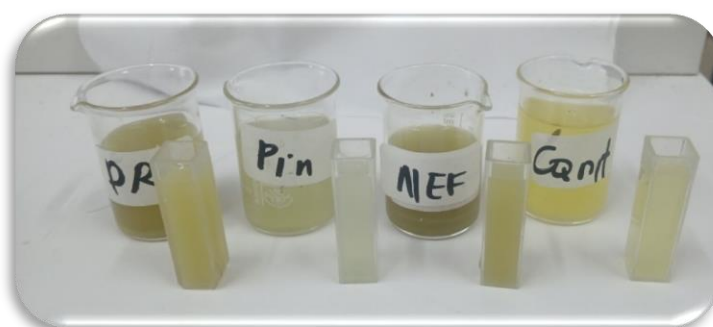


Figure 16 : liqueur après blanchiment.

Chaque optimisation du procédé a donné des résultats satisfaisants, particulièrement en termes de rendement. Notre étude ne visait pas spécifiquement la production de papier haut degamme, mais plutôt d'explorer la faisabilité d'obtenir un papier aux propriétés mécaniques et chimiques satisfaisantes. Les essais ont démontré quetous les végétaux testés présentaient des caractéristiques intéressantes.

Afin de pousser plus loin l'optimisation et d'évaluer la reproductibilité du procédé, nous avons sélectionné le meilleur candidat parmi les matières premières testées. Cette sélection nous permet d'affiner les paramètres de production pour obtenir des performances optimales.

IV.3. Choix du végétal optimal

La pâte à papier préparée à partir des **4 végétaux**. Le meilleur, selon les critères de sélection de base, est le **papyrus** (déjà éprouvé historiquement). Son inconvénient majeur pour une grande industrie surtout en Algérie est sa **non-rentabilité** due à une **demande élevée en eau**.

Les **aiguilles de pin** et **feuilles de néflier** (très abondants dans notre région) nécessitent encore une amélioration de leur traitement. Les résultats peuvent être améliorés.

Le **caoutchouc** se distingue des autres fibres choisies, par ces résultats acceptables. Le traitement modifié apporté a amélioré les critères par rapport aux autres procédés, etc'est sur celui-ci que nous nous sommes le plus **approfondis**.

IV.3.1 - Procédé optimisé pour le caoutchouc

Nous avons développé un autre processus pour le caoutchouc, éliminant le chauffage. La matière est maintenue en solution alcaline pendant **48h à 25°C** (température ambiante), avec un **blanchiment minimal** (dose de peroxyde d'hydrogène réduite de moitié, ratio 5:1). Les résultats obtenus sont :

Le tableau 7 : Les résultats de Procédé optimisé pour le caoutchouc.

Critères	Couleur Pâte	Indice de Kappa	Rendement %	Résistance	PH	Taux d'absorbance	Longueur d'onde (nm)
Valeurs	Blanc verdâtre	2.5	83	3.2	7	280	530

IV.3.2. Analyse des résultats : L'analyse des résultats révèle que :

L'indice de Kappa est moins bon car la lignine résiduelle n'a pas été complètement éliminée (due à la demi-dose de H₂O₂).

La résistance et l'absorbance ont augmenté car la cellulose est mieux conservée grâce à la réduction du traitement de blanchiment.

IV.4. Inconvénients structurés par catégories

La valorisation des végétaux locaux pour la pâte à papier en Algérie présente plusieurs défis structurants. Sur le plan technique, l'analyse fine des matières premières (notamment par CPG avancée) reste coûteuse et nécessite un équipement spécialisé, limitant l'optimisation des procédés. La gestion industrielle des feuilles pose des problèmes logistiques majeurs : collecte saisonnière, stockage volumineux, et prétraitements énergivores pour une homogénéisation à grande échelle. L'inter-sectorialité constitue un autre écueil, car la filière requiert une coordination complexe entre acteurs agricoles (approvisionnement), chimiques (traitements) et manufacturiers (transformation), souvent peu habitués à collaborer. Enfin, les spécificités des plantes algériennes exacerbent ces contraintes : disponibilité irrégulière (sécheresse chronique), concurrence d'usages (ex : palmier nain pour l'artisanat), et variabilité des propriétés fibres selon les régions, compromettant la standardisation indispensable à l'industrie.

IV.5. Alignement avec les 17 Objectifs du développement durables(17ODD)

Le choix de la problématique de cette étude s'aligne stratégiquement avec 7 ODD clés, centré sur une perspective d'industrie papetière durable en Algérie. Il contribue directement à l'ODD 9 (innovation via les procédés sans chauffage pour le caoutchouc) et l'ODD 12 (économie circulaire par la valorisation de déchets végétaux locaux comme les aiguilles de pin ou le néflier). L'ODD 15 est renforcé par l'exploitation non-destructive de plantes abondantes, préservant les écosystèmes. Sur le plan socio-économique, il soutient l'ODD 8 en créant des filières d'emplois locaux et l'ODD 17 par la nécessaire collaboration intersectorielle. Les optimisations techniques (réduction d'eau et d'énergie) répondent partiellement à l'ODD 6 (critique du papyrus gourmand en eau) et l'ODD 7 (économie d'énergie via l'élimination du chauffage). Toutefois, des défis persistent pour un alignement complet, notamment sur la consommation hydrique (ODD 6) et le passage à l'échelle industrielle (ODD 9).



V Conclusion générale

V Conclusion

Le choix porté sur notre matière première s'est révélé satisfaisant dans l'ensemble, bien qu'il laisse subsister certains défis techniques qui méritent d'être abordés. L'objectif initial d'optimiser le procédé de kraft adapté par le procédé MKM (Modifié Kraft Alcalin), basé sur un post-traitement spécifique, a donné des résultats encourageants qui ont validé l'approche méthodologique adoptée. Ces premiers résultats positifs nous ont conduits à poursuivre l'optimisation du procédé afin d'améliorer davantage les performances techniques et économiques du processus de production.

Suite à cette évaluation comparative, le caoutchouc a été sélectionné comme matière première optimale en raison de ses paramètres techniques supérieurs : un rendement de 83%, une résistance mécanique de 3,2, un pH neutre de 7, un taux d'absorbance de 280, et un indice de Kappa de 2,5. Ces caractéristiques, bien que perfectibles, positionnent le caoutchouc comme la ressource la plus prometteuse parmi les quatre matériaux étudiés. L'étape d'amélioration suivante s'est concentrée sur l'élimination du module énergétique, c'est-à-dire la suppression complète du chauffage dans le processus de traitement. Cette modification substantielle du procédé a permis de maintenir le matériau dans une solution alcaline pendant 48 heures à température ambiante (25°C), tout en réduisant de moitié la dose de peroxyde d'hydrogène utilisée pour le blanchiment.

Les derniers résultats obtenus après cette optimisation énergétique démontrent la viabilité de cette approche innovante. Le processus sans chauffage a permis d'obtenir une pâte de couleur blanc verdâtre avec un indice de Kappa de 2,5, un rendement maintenu à 83%, une résistance préservée à 3,2, un pH stable à 7, et un taux d'absorbance constant à 280. Bien que l'indice de Kappa reste légèrement élevé en raison de la réduction de la dose de blanchiment, l'amélioration de la résistance et de l'absorbance témoigne d'une meilleure conservation de la cellulose. Ces résultats sont particulièrement satisfaisants car ils respectent les principes des Objectifs de Développement Durable (ODD), notamment l'ODD 7 (Énergie propre et d'un coût abordable) par la réduction de la consommation énergétique, l'ODD 9 (Industrie, innovation et infrastructure) par le développement de procédés innovants, l'ODD 12 (Consommation et production responsables) par l'utilisation de ressources renouvelables, et l'ODD 15 (Vie terrestre) par la valorisation de ressources végétales sans impact sur les écosystèmes forestiers.

Néanmoins, ce travail de recherche constitue une étape fondamentale qui doit être approfondie dans le cadre d'études supérieures plus avancées. Les perspectives d'amélioration incluent l'optimisation fine des paramètres de traitement alcalin, l'exploration de nouveaux agents de blanchiment écologiques, l'étude de l'impact des conditions de stockage sur la qualité de la pâte, et l'évaluation de la faisabilité économique à l'échelle industrielle. Ces développements futurs permettront de perfectionner le procédé et de contribuer significativement au développement d'une industrie papetière nationale durable et compétitive.

TOUTE CETTE ÉTUDE A ÉTÉ INSPIRÉE PAR UNE ÉQUIPE D'ADULTES PORTEURS DE TRISOMIE 21 ICI EN ALGÉRIE, ENGAGÉE DANS LE RECYCLAGE DU PAPIER. CES TRAVAILLEURS PERÇOIVENT UN SALAIRE CHAQUE FIN DE MOIS – CERTES SYMBOLIQUE AU REGARD DE LEURS CONDITIONS DE TRAVAIL – MAIS PORTEUR D'UNE IMMENSE VALEUR. NOUS SOUHAITONS ARDEMMENT QUE CETTE LUEUR D'ESPOIR TROUVE UNE PLUS GRANDE LUMIÈRE, ET QU'ELLE APPORTE DES AVANTAGES SIGNIFICATIFS AUX TROIS PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE :

L'ENVIRONNEMENT, LE SOCIAL ET L'ÉCONOMIE.





*Si cette étude trace un chemin, la lumière vient de celles et ceux qui le parcourent.
À l'image de ces adultes porteurs de trisomie 21 d'Algérie, dont les mains
transforment chaque feuille de papier en geste écologique, social et économique
- une lueur d'espoir qui appelle à devenir flamme-*

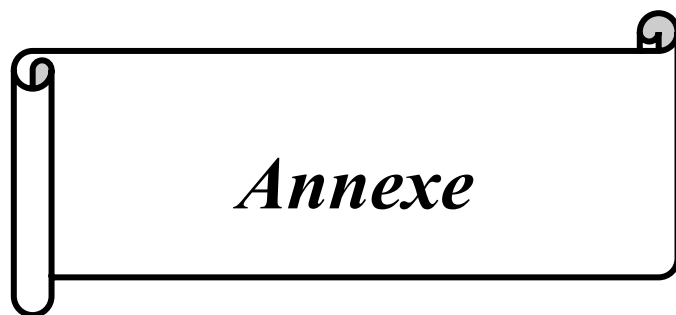





















VI Références

VI Références







- [1] Lhote, H. (1970). *Les gravures rupestres du Hoggar. Arts et Métiers Graphiques.*
- [2] Bloom, J. M. (2001). *Paper before print: The history and impact of paper in the Islamic world. Yale University Press.*
- [3] Hunter, D. (1947). *Papermaking: The history and technique of an ancient craft. Dover Publications.*
- [4] Tsien, T.-H. (1985). *Paper and printing. In J. Needham (Ed.), Science and civilisation in China.*
- [5] Bajpai, P. (2024). *Sustainable fiber resources for modern papermaking. Springer Nature.*
- [6] Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *Global forest products facts and figures 2023. FAO.*
- [7] Nature Sustainability. (2022). *Circular solutions for the paper industry. Nature Sustainability.*
- [8] Sjöström, E. (1993). *Wood chemistry: Fundamentals and applications (2nd ed.). Academic Press.*
- [9] Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *Pulp and paper capacities survey 2022–2027. FAO.*
- [10] Bajpai, P. (2024). *Biotechnology in pulp and paper processing (2nd ed.). Springer.*
- [11] TAPPI Journal. (2023). *Energy reduction in kraft pulping through enzymatic pretreatment. TAPPI Journal.*
- [12] Nature Communications. (2022). *Lignin valorization in modern biorefineries. Nature Communications.*
- [13] Confederation of European Paper Industries (CEPI). (2023). *Sustainability report 2023. CEPI.*
- [14] Science. (2023). *Engineered bacteria for selective lignin degradation. Science.*
- [15] Gierer, J. (1980). *Chemistry of delignification. Wood Science and Technology, 14, 241–266.*
- [16] Chakar, F. S. (2004). *Lignin degradation: A review. Journal of Pulp and Paper Science, 30(3), 107–113.*
- [17] Bajpai, P. (2024). *Biotechnology for pulp and paper processing (2nd ed.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-5466-8>*
- [18] Confederation of European Paper Industries (CEPI). (2023). *Sustainability report 2023: Pathways to green transition. CEPI. <https://www.cepi.org/sustainability-report-2023>*

- [19] Sani, N. A. A., & Dahlan, K. Z. M. (2021). Cellulose isolated from waste rubber wood and its application in PLA based composite films. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 666399.
- [20] https://aqr.itrop.cirad.fr/409034/1/document_409034.pdf
- [21] https://apps.worldagroforestry.org/usefultrees/pdflib/Eriobotrya_japonica_ETH.pdf
- [22] <https://plantpono.org/wp-content/uploads/Eriobotrya-japonica.pdf>
- [23] Benabid, A., & Bouazza, A. (2018). Dynamique de la production foliaire chez *Pinus halepensis* en milieu méditerranéen algérien. *Revue Forestière Méditerranéenne*, 39(2), 125-134.
- [24] Khelifa, M., Boudjemaa, A., & Saidi, M. (2020). Valorisation des déchets de *Pinus halepensis* pour la production de pâte à papier en Algérie. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(4), 345-360.
- [25] Jones, M.B. & Muthuri, F.M. (1989). Primary productivity of papyrus (*Cyperus papyrus*) in a tropical swamp; Lake Naivasha, Kenya. *Biomass*, 18(1), 1-14.
- [26] Henriksson, G., Germgård, U. & Lindström, M. (2024). A review on chemical mechanisms of kraft pulping. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 39 (3), 297–311.
- [27] *Pulp and Paper Chemistry and Technology" (Mirja Illikainen, 2009) - Vol. 2 (Chapitre3: Non-wood Fibers*
- [28] *The potential use of lignin as a platform product in biorefineries: A review*
- [29] *Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2013). *T 236 om-13: Kappa number of pulp* [Withdrawn standard]*
- [30] Marlin, N., Marcon, J., Mortha, G., & Burnet, A. (2023). Le blanchiment de la pâte à papier a toujours la fibre de l'innovation. *L'Actualité Chimique*, (484-485), 45
- [31] *Handbook For Pulp & Paper Technologists Fourth Edition Handbook For Pulp and Paper Technologists, Fourth Edition Gary A. Smook and Technical Editor, Michael Kocurek*
- [32] *Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). TAPPI/ANSI T 494 om-22: Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). TAPPI Press.*
- [33] *Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2016). TAPPI T 211 om-16: Ash in wood, pulp, paper and paperboard : combustion at 525°C. TAPPI Press*
- [34] *International Organization for Standardization. (2020). ISO 6588-1:2020 Paper, board and pulp — Determination of pH of aqueous extracts — Part 1: Cold extraction. ISO.*
- [35] *International Organization for Standardization. (2014). ISO 23714:2014 Pulps — Determination of water retention value (WRV). ISO.*



				
Bécher	Erlenmeyer	Fiole jaugée	Verre de montre	Cristalliseur
				
Entonnoir	Ballon à fond plats	Barreau aimanté	Balance Analytique	Agitateur et plaque chauffante
				
Broyage	Tamis	Thermomètre	Spectromètre infrarouge	Papier-pH
				
Papier filtre	Pompe d'aspiration d'eau	Buchner	Tissu coton blanc	Four

Annexe1 : Matériels et appareils utilisées

CAS	Nom	Formule	Risques	Masse molaire (g/mol)
1310-73-2	Hydroxyde de sodium	NaOH	 	39.997
1313-82-2	Sulfure de sodium	Na ₂ S	  <p>Danger pour l'environnement</p>	78,0452
7722-84-1	Le peroxyde d'hydrogène	H ₂ O ₂	 	34.0147g/mol

Annexe 2 : produits utilisés et sécurités