

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de :
MASTER
En Génie Mécanique
Option : **Construction**

Présenté par :

RABCHI Belkacem & BEN YOUNES Ilal
MEHDAOUI Hamza & ABEDLHAK Nabil

Thème

FABRICATION ET RECYCLAGE DE PAPIER

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Amroune Salah	Professeur	Président
Zaoui moussa	Professeur	Encadrant
Farsi chaouki	Professeur	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/..... /2025



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله تعالى: **لِيَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ**
[المجادلة: 11]

لِصَدَقَ اللَّهُ الْعَلِيِّ الْعَظِيمِ



Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à notre encadrant, Monsieur Zaoui Moussa, pour sa patience, son accompagnement et ses conseils précieux qui ont guidé nos pas tout au long de ce travail.

Nous tenons également à exprimer toute notre gratitude à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, pour la qualité de l'enseignement et le cadre de formation qu'elle nous a offert.

Un remerciement particulier à l'entreprise Lafarge Ciment – Bordj Bou Arreridj, où nous avons effectué notre stage pratique. Nous remercions toute l'équipe pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur encadrement professionnel qui ont grandement enrichi notre expérience.

Enfin, nous remercions tous les enseignants, personnels administratifs et collègues qui nous ont soutenus tout au long de notre parcours.

À vous tous, merci infiniment.



Dédicace

Nous dédions humblement ce travail à :

La famille Rabchi, dont le soutien et l'affection nous ont toujours accompagnés.

Un hommage tout particulier à notre petite sœur Lamia, dont la douceur et l'innocence ont illuminé nos journées.

À l'âme de notre oncle, guerbase sid ali, qui continue de vivre en nous à travers ses valeurs et ses souvenirs impérissables.

À la famille mehdaoui, merci pour votre appui constant et votre générosité de cœur.

À la famille ben Younes, pour vos encouragements sincères et votre présence chaleureuse.

À la famille Abdelhak, nous vous exprimons notre gratitude pour votre respect et votre soutien bienveillant.

Ce travail est le fruit de notre dévouement, mais aussi de votre présence dans nos vies.

Merci du fond du cœur.

Résumé

Résumé en français...

Ce travail porte sur la valorisation des déchets papiers à travers un processus de recyclage utilisant l'esparto comme additif naturel. Trois expériences ont été réalisées: un mélange à parts égales de papier et d'esparto, un mélange avec prédominance de papier, et une troisième sans esparto. L'objectif était d'évaluer l'influence de l'esparto sur la qualité du papier recyclé. Les résultats ont montré que l'ajout de l'esparto améliore la texture et la résistance du papier. Ce travail s'inscrit dans une perspective écologique visant à réduire les déchets et à promouvoir des matériaux durables.

Abstract

Abstract in English...

This study focuses on the recycling of paper waste by incorporating esparto as a natural additive. Three experimental batches were conducted: one with equal proportions of paper and esparto, one with more paper than esparto, and a third without esparto. The goal was to evaluate the impact of esparto on the quality of the recycled paper. Results showed that the presence of esparto enhanced the texture and strength of the final product. This work contributes to an eco-friendly approach to waste reduction and sustainable material development.

ملخص

ملخص بالعربية

تناول هذا العمل إعادة تدوير الورق المستعمل من خلال دمج مع نبات الحلفاء كمادة طبيعية مضافة. تم إجراء ثلاث تجارب: الأولى بمزيج متساوٍ من الورق والحلفاء، والثانية بنسبة أكبر من الورق، والثالثة بدون حلفاء. هدفنا كان تقييم تأثير الحلفاء على جودة الورق المعاد تصنيعه. وقد أظهرت النتائج أن إضافة الحلفاء تحسن من ملمس الورق ومتانته. يندرج هذا العمل ضمن الجهود البيئية الرامية إلى تقليل النفايات وتعزيز استخدام المواد المستدامة.

Table des matières

.....	2
Remerciements.....	2
Dédicace.....	3
Résumé.....	4
Abstract	4
ملخص	4
Introduction générale.....	10
PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	11
Chapitre1 : Généralités sur le papier	12
1.1. Historique sur le papier	13
1.2. Définition et introduction de papier	14
1.2.1. Format de papier	15
1.2.2. Typologie	15
1.2.3. Mesures de quantité de feuilles	15
1.2.4. Mesures de qualité du papier	16
1.2.5. Grammages selon l'utilisation.....	16
1.3. La composition du papier	17
1.3.1 Structure physico-chimique du papier.....	18
1.4. La fabrication de papier	21
1.4.1. Les matières de base.....	21
1.4.2. La fabrication de la pâte à papier	21
1.4.4. La différence entre le papier et le carton.....	23
1.5. Les différents types et qualités de papier et leur domaine d'usage	24
1.5.1. Les types de papier	24
□ Papier couché	24
1.5.2. Les papiers et cartons d'emballage	25
1.5.3. Les papiers industriels et spéciaux	26
1.5.4. Les papiers d'hygiène ou à l'usage sanitaire et domestique	26
1.6. Les caractéristiques de papier.....	27
1.7. Les impacts de la fabrication de papier sur l'environnement	27

1.8. Pays producteurs et exportateurs de papier	28
1.8.1. Les principaux pays producteurs de pâtes et papiers au monde.....	29
1.8.2. Dix principaux pays exportateurs de pâtes et papiers	30
1.9. Pays consommateurs et le plus consommateur du papier.....	31
Chapiter 2:	37
Recyclage de papier.....	37
I.1.1 Définition du recyclage.....	37
I.1.1.1 Comprendre facilement le recyclage	38
I.1.2 Historique de recyclage	39
I.1.2.1 Les première temps de recyclage	39
I.1.3 Different types de papier.....	40
I.1.3.1 Papier qui se recycler	41
I.1.3.2 Le papier qui ne se recycle pas.....	42
I.1.4 Processus de recyclage de papier	42
I.1.5 Objectifs du recyclage de papier	46
I.1.5.1 Réduction de la pollution	47
I.1.5.2 Économie d'énergie	47
I.1.5.3 Conservation des ressources naturelles.....	47
I.1.5.4 Création d'emplois.....	47
ETUDE DE VALORISATION DES TEXTILES USES EN PAPIER.....	48
II.1.1 Introduction	49
II.1.2 Les matières éligibles pour être transformées en papier artisanal ...	49
II.1.3 La préparation des vieux tissus ou chiffons.....	49
II.1.3.1 Le triage	49
II.1.3.2 Le lissage	49
II.1.3.3 Le découpage	49
II.1.4 La préparation de la pâte à papier	50
II.1.4.1 Le principe de la pile hollandaise	51
II.1.4.2 La mise en forme.....	53
II.1.4.3 Le séchage de la feuille	53

II.1.4.4 L'encollage.....	53
Chapitre 3.....	Erreur ! Signet non défini.
Partie II: étude expérimentale	Erreur ! Signet non défini.
III. Valorisation de papier recyclé en nouvelles pâtes à papier	55
III.1. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	56
III.2. PREPARATION DE LA PATE	56
III.2.1. Collecte et tri de la matière première	56
III.2.2. Préparation de la pâte.....	57
III.3. TRANSFORMATION DE LA NOUVELLE PATE EN PAPIER RECYCLE EN PAPIER.....	59
III.4. DISCUSSION SUR LES PRODUITS OBTENUS	65
IV. Essai de valorisation de textile usés en papier	66
IV.1. But de l'étude	66
IV.2. PREPARATION DE LA PATE A PAPIER	67
IV.2.1. Tri et collecte des matières de bases	67
IV.2.2. Préparation de la pulpe.....	68
IV.3. TRANSFORMATION DE LA PATE EN FEUILLE DE PAPIER....	72
IV.4. DISCUSSIONS SUR LES PRODUITS OBTENUS	81
Résultats et discussions	82
Contexte de l'essai de traction.....	82
La Forme d'échantillon de papier	83
Reproductibilité des résultats.....	86
Analyse des courbes (F - dép.).....	88
Analyse des courbes (σ / ϵ).....	89
Résultat.....	90
Conclusion et Perspectives (exemple).....	92
Bibliographie.....	93

Liste des figures

Figure I-1: Morceau de papier le plus ancien retrouvé à ce jour, appartenant à une carte géographique découverte en 1986 à Fàngmǎtān (nord-est de la Chine).....	14
Figure I-2: Structure macroscopique des fibres d'une feuille de papier.	15
Figure I-3: Un empilement de feuilles de papier.....	17
Figure I-4: Zones amorphes.	20
Figure I-5 : Machine à papier.	23
Figure I-6: La consommation apparente de papiers et cartons dans le monde de 2009 à 2017.	31
Figure I-7: La consommation apparente de papiers et cartons dans une sélection de pays du monde en 2017.	32
Figure I-8: Consommation de papiers et cartons par habitant en 2009 et 2019.	33
Figure I-9 : Demande mondiale de papiers et de cartons 1970-2015.	34
Figure I-10: Consommation apparente de papiers et cartons par sortes. ...	35
Figure II-1: Les collectionneurs de chiffons.....	40
Figure II-2: Le cycle de recyclage du papier.	43
Figure II-3: Le tri de papiers.	44
Figure II-4: Désencrage des produits papiers.	46
Figure II-5: Schéma d'une pile hollandaise.....	51
Figure II-6: Détail d'une pile hollandaise ancienne.	52
Figure III-1: Papier en morceau	57
Figure III-2: Le trempage du papier	58
Figure III-3: Bouillie de papier	59
Figure III-4: Immerger la pâte	60
Figure III-5: Former la pâte.....	61
Figure III-6: Égoutter l'excédent d'eau de la pâte.....	62
Figure III-7: Retirez l'eau restante.....	63
Figure III-8: Sécher le papier.....	64
Figure III-9: Papier prêt.....	65
Figure III-10: Papier en morceau	67
Figure III-11: purifier de halfa (esparto).....	68

Figure III-12: Le trempage du papier	69
Figure III-13: Le trempage du halfa (esparto).....	70
Figure III-14: Mélanges le papier imbibé et l'halfa.....	71
Figure III-15: Pâte à papier et sparte (halfa) après mélange.....	72
Figure III-16: Préparation du cadre métallique pour former le papier	73
Figure III-17: Répartir la pâte uniformément sur la surface de la grille....	74
Figure III-18: Égoutter l'excédent d'eau de la pâte	75
Figure III-19: Videz la pâte sur le torchon	76
Figure III-20: Retirez l'eau restante.....	77
Figure III-21: Accélérer le séchage avec un fer à repasser	78
Figure III-22: Le papier obtenu.....	79
Figure III-23: Papiers prêts à l'emploi (50% papier – 50% halfa).....	80
Figure III-24: Papiers prêts à l'emploi (papier > halfa).....	81
Figure III-25: La machine de test traction	83
Figure III-26: La forme d'échantillon (haltère).....	84
Figure III-27: Maintenez l'échantillon entre les mâchoires de l'appareil...	85
Figure III-28: Enregistrez avec précision les données pour chaque cas.....	86
Figure III-29: courbes de traction des trois répétitions de l'échantillon équilibré (50% papier – 50%halfa)	87
Figure III-30: la courbe charge / déplacement des échantillon renforcés par différentes proportions de halfa.....	89
Figure III-31: relation déformation / contrainte pour des papiers recyclés renforcés avec différentes proportions de halfa	90

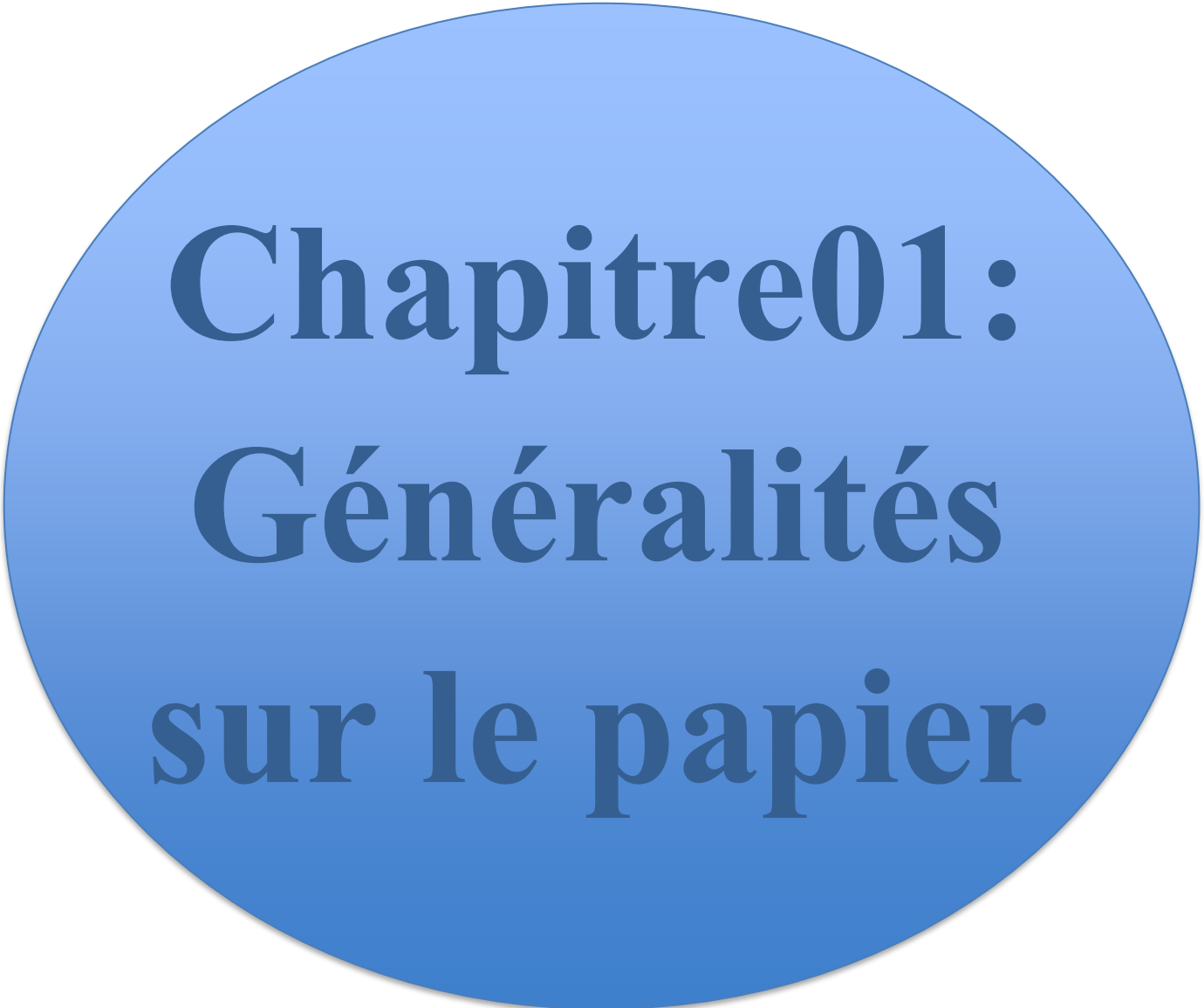
Liste des tableaux

Tableau I-1: La qualité de la cellulose selon le matériau d'origine.....	18
Tableau I-2: Répartition géographique de la production mondiale (en 2023- 2024).....	29
Tableau I-3: Rang des pays producteurs de pate et papiers au monde [38]	30
Tableau I-4: Dix pricipaux exportateurs de pate et papiers [39]	30

Introduction générale

Face aux défis environnementaux croissants auxquels notre monde est confronté, la gestion et le recyclage des déchets sont devenus des priorités essentielles pour atteindre un développement durable. Le papier, largement utilisé dans la vie quotidienne, génère une quantité importante de déchets, ce qui rend nécessaire la recherche de solutions écologiques et alternatives pour sa réutilisation. Ce projet s'inscrit dans cette logique, en visant à améliorer la qualité du papier recyclé en le combinant avec l'alfa (esparto), une plante naturelle fibreuse traditionnellement utilisée dans la fabrication du papier. L'objectif principal est d'évaluer l'effet de l'incorporation de l'esparto sur les caractéristiques physiques du papier, telles que la texture, la durabilité et la résistance. Pour cela, une démarche expérimentale a été adoptée, basée sur la préparation de trois échantillons : le premier avec un mélange équilibré de papier et d'esparto, le second avec une proportion plus élevée de papier, et le troisième composé uniquement de papier recyclé sans ajout d'esparto. Cette méthode permet de comparer les résultats obtenus et d'analyser l'impact réel de l'esparto sur la qualité finale du produit. L'ensemble du projet vise à valoriser les ressources naturelles locales à travers des techniques simples, économiques et respectueuses de l'environnement.

**PARTIE I:
ETUDE
BIBLIOGRA
PHIQUE**



Chapitre01: Généralités sur le papier

1.1. Historique sur le papier

Les premiers signes ont été écrits par l'homme des cavernes sur la pierre ou sur l'os, puis sur le bois, le métal et l'argile. [1]

-3000 Avec les **Egyptiens** apparaît le papyrus, extrait d'un roseau du Nil. Le papyrus fut concurrencé par le parchemin, mis au point dans la ville de Pergame, en Asie mineure, à partir de peaux de veau et de chèvre lavées et poncées. [1]

105 C'est en l'an **105 après J.C.**, qu'est découvert le papier en Chine, sous le règne de l'Empereur Hoti. Tsaï-Lun, ministre de l'agriculture, conçoit une pâte à papier fabriquée à l'aide de vieux chiffons, d'écorces et de filets réduits en bouillie. [1]

VIIe Au **7^{ème} siècle**, le papier est introduit au Japon. [1]

751 En **751**, la bataille de Samarcande se traduit par la défaite des Chinois, qui révèlent aux vainqueurs Arabes les secrets de la fabrication du papier. L'invention se répand ainsi jusqu'en Andalousie. C'est près de Cordoue, puis Séville, qu'apparaissent les premiers moulins à papier en Europe. [1]

1250 Vers **1250** sont installés à leur tour les premiers moulins italiens à Fabriano. [1]

XIIIe Au **13^{ème} siècle** apparaissent en France les premiers documents d'archives écrits sur papier, tels que les "Minutes de Notaire marseillais" (1248) ou le "Registre des Enquêteurs d'Alphonse de Poitiers" (1243), mais c'est au **14^{ème} siècle** que sont construits les premiers moulins à papier français : à Troyes (1348) et Essones (1354). [1]

1445 En **1445**, Gutenberg invente l'imprimerie. [1]

1799 Le **18 janvier 1799**, Louis-Nicolas Robert (1761-1828), jeune inspecteur à la papeterie d'Essones, obtient un brevet pour son invention : la première machine à papier en continu, qui permet de produire davantage de papier à prix moindres. [1]

1803 En **1803**, Didot Saint Léger, Bryan Donkin et les frères Fourdrinier font fonctionner la première machine à papier anglaise à Frogmore (Kent). [1]

1825 Vers **1825**, en Europe et aux Etats-Unis, débute l'industrialisation massive de la fabrication du papier. En 1850, on dénombre 300 machines à papier en Angleterre et 250 en France. L'usage des papiers et cartons d'emballage se développe. [1]

1850

Vers 1850 apparaît la première machine à fabriquer le carton multi-couches. En 1856, Edward C.Haley dépose en Angleterre le premier brevet de papier ondulé utilisé notamment pour la confection des chapeaux. Le premier brevet de papier ondulé pour emballage est déposé à New York en 1871. La première machine à onduler française est installée en 1888 dans le Limousin. On doit le papier-toilette à l'américain Joseph Coyetty en 1857. Introduit en France au début du 20^{ème} siècle, mais longtemps considéré comme un produit de luxe, son utilisation ne s'est vraiment généralisée que dans les années 60. [1]

Aujourd'hui

Aujourd'hui, les technologies papetières ne cessent d'évoluer, contribuant au développement de l'industrie, de la diffusion des connaissances et du conditionnement des produits de consommation. [1]



Figure I-1: Morceau de papier le plus ancien retrouvé à ce jour, appartenant à une carte géographique découverte en 1986 à Fàngmǎtān (nord-est de la Chine). [3]

1.2. Définition et introduction de papier

Le papier, issu du latin papyrus, est un produit fabriqué à partir de fibres végétales et animales riches en cellulose. Ce matériau se présente en feuilles fragiles et est considéré comme un

composant essentiel dans les domaines de la rédaction, du dessin, de l'impression, de l'emballage et de la peinture. On l'emploie également dans la fabrication de diverses pièces, comme les filtres. [3]

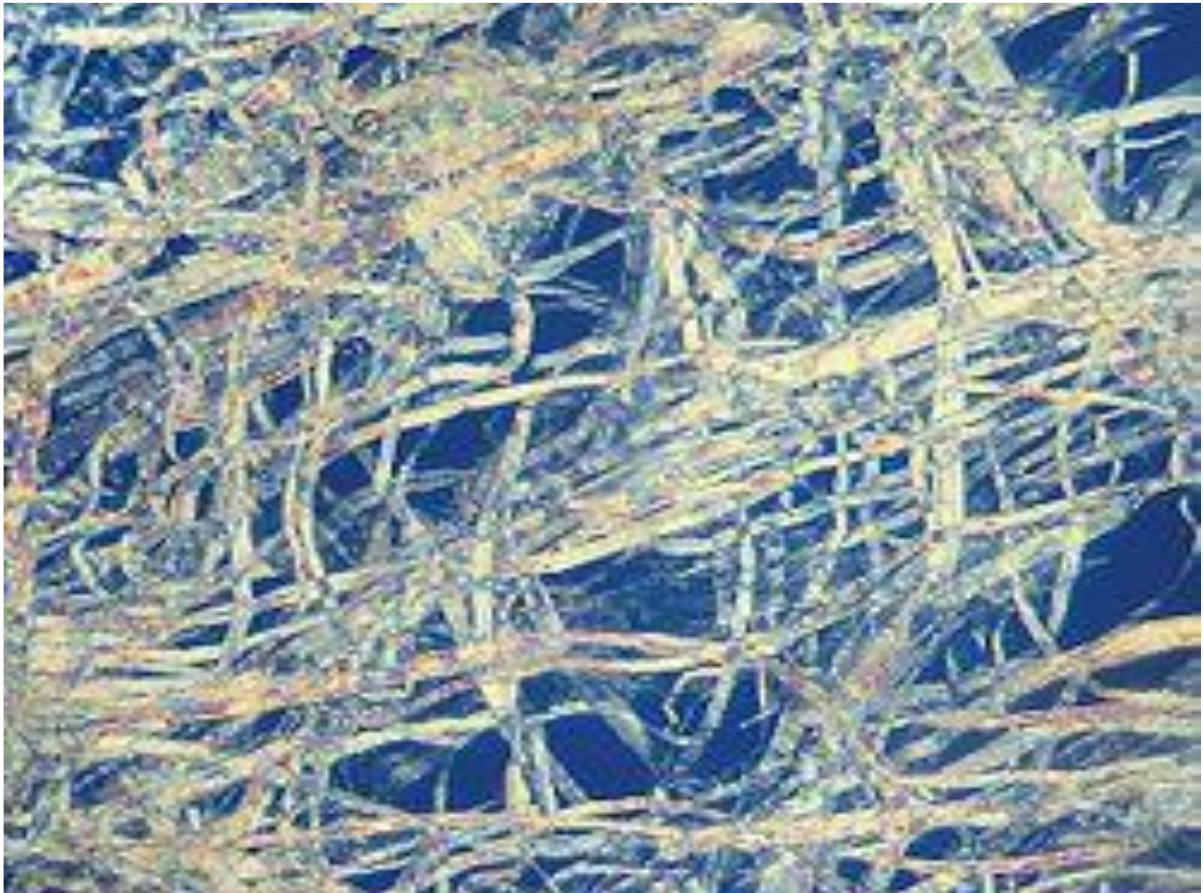


Figure I-2: Structure macroscopique des fibres d'une feuille de papier. [3]

1.2.1. Format de papier

La dimension d'une feuille de papier rectangulaire se réfère à la paire formée de sa largeur et de sa longueur. Le format peut varier en fonction de l'usage de la feuille, de la période et de la localisation géographique [1]. Il existe des appellations particulières pour quelques-uns de ces formats : A4, raisin, letter, et ainsi de suite. Certains formats sont soumis à une normalisation au niveau international (ISO) ou national (DIN, AFNOR, ANSI, etc.). [4]

1.2.2. Typologie

On désigne par le terme « papier » les substances fabriquées à partir de fibres végétales dont la masse ne dépasse pas 224 g/m². [3]

1.2.3. Mesures de quantité de feuilles

- La ramette : 500 feuilles, une ramette représente une quantité de papier équivalente à une rame pour les formats plus petits (A4, A3).
- La main : vingt-cinq pages.
- Cinq feuilles sont équivalentes à un doigt.

Ces unités proviennent de l'inspection manuelle des documents dans les anciens centres de triage. Les employées superposaient les feuilles de papier, en en conservant cinq par doigt. [3]

1.2.4. Mesures de qualité du papier

- La dimension (indiquée en micromètres, à l'image du papier à lettres qui fait 110 micromètres d'épaisseur).
- Le grammage, aussi connu sous le terme de densité (indiqué en grammes au mètre carré, par exemple, le papier à cigarettes à un poids de 15 g/m² alors que le papier à lettres pèse 80 g/m²).
- La dimension du papier : proportion entre l'épaisseur et le poids en grammes.
 - Le lissage Bekk (s) : durée nécessaire à l'écoulement d'un volume d'air à la surface du papier.
 - La porosité Bekk, ou capacité de perméabilité à l'air : courant d'air à travers un papier.
 - La transparence.
 - La mesure de la blancheur (à 457 nm).
 - La brillance : souvent évaluée à 20, 60, 75 et 85°.
 - La rugosité, qui correspond à la dimension moyenne des irrégularités présentes sur le papier, est exprimée en μm .
 - Le bouffant, qui évalue la hausse de l'épaisseur du papier lorsqu'une pile est prise en compte (le papier standard pour bande dessinée est très épais, tandis que le papier bible a un bouffant très mince, c'est le rapport entre la mesure de 5 feuilles réunies). Par le poids du papier.
 - La nuance.
 - L'inflexibilité.
 - La longueur de rupture.
 - Le module de Young : cet indicateur, obtenu en temps réel grâce à la machine à papier, autorise l'ajustement des paramètres de production au cours du processus (ce procédé peut être automatisé).
 - Le coefficient de frottement du papier en relation avec un autre matériau (papier, métal, caoutchouc...)
 - La cohésion d'un papier : caractéristique intrinsèque du papier qui reflète l'uniformité de sa solidité interne (cohésion des fibres et des jonctions hydrogène). [3]

1.2.5. Grammages selon l'utilisation

- Papier à rouler : 12 g/m² • Papier journal : 42 grammes par mètre carré.
- Impression - rédaction : 65-80-90 g/m².
- Carton : 120 grammes par mètre carré.
- Photo 10x15 archive : poids de 175 grammes au mètre carré.
- Photo 10x15 qualité : 250 g/m².
- Épaisseur de la couverture du livre : entre 240 et 250 g/m².
- Peinture à l'eau : 300 g/m². [3]



Figure I-3: Un empilement de feuilles de papier. [3]

1.3. La composition du papier

Le papier est principalement fabriqué à partir de fibres végétales, surtout de cellulose, qui constitue l'élément principal des parois cellulaires des plantes. Ces fibres ont principalement pour origine le bois, mais peuvent également être dérivées d'autres substances ligno-cellulosiques telles que la bagasse de canne à sucre, la paille, le chanvre, le lin ou même des tissus en coton. [5]

1.3.1 Structure physico-chimique du papier

La cellulose constitue l'élément principal du papier.

Il peut également inclure, en proportions diverses, des impuretés provenant du bois ainsi que des charges minérales, des adhésifs, des teintures et différents additifs.

➤ La cellulose

La cellulose constitue l'élément majeur des parois cellulaires chez les plantes. Elle est presque purement présente dans le coton, le lin et le chanvre.

Les propriétés de la molécule de cellulose permettent la production de papier et lui donnent ses propriétés physiques distinctives.

Comprendre les propriétés principales de cette molécule nous aide à mieux saisir la nature du papier et les mécanismes de sa dégradation.

- La cellulose est un matériau stable qui présente une faible sensibilité à l'eau, aux acides et aux bases diluées.
- Il s'agit d'une longue chaîne linéaire constituée par la liaison d'éléments identiques, ce qui est désigné sous le nom de polymère.
- Le monomère de cette chaîne allongée, connu sous le nom de cellobiose, est constitué par l'union de deux molécules de glucose.
- La molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) se compose de six atomes de carbone. Le glucose se présente sous forme cyclique, où cinq atomes de carbone (C) et un atome d'oxygène (O) forment une structure hexagonale.
- Les monomères se regroupent en éliminant une molécule d'eau (H_2O), permettant ainsi la création d'une chaîne de structures hexagonales : c'est le processus de polymérisation, soit la production du polymère.

Molécule glucose

La qualité et la durabilité de la cellulose dépendent grandement de la longueur de la chaîne, qui peut varier en fonction de sa source. On exprime généralement le nombre de monomères liés dans une chaîne de cellulose par le degré moyen de polymérisation (DP). Une cellulose qui a un-DP inférieur à 300 perd toute résistance. [5]

Tableau I-1: La qualité de la cellulose selon le matériau d'origine

Matériau	DP
Coton	7000 à 15000
Bois	1000 à 3000

Le DP est fréquemment modifié par les processus effectués dans l'industrie du papier, surtout ceux qui sont impliqués dans la production de papier fabriqué à partir de cellulose dérivée du bois.

- La caractéristique la plus exceptionnelle des molécules de cellulose est leur aptitude à créer des liaisons spécifiques entre elles qui les maintiennent intactes : les liaisons hydrogène. Le pont hydrogène se crée lorsque deux atomes d'oxygène (O) accueillent un atome d'hydrogène (H) entre eux, celui-ci formant une liaison covalente avec l'un d'eux en partageant deux électrons. L'hydrogène devient alors légèrement chargé positivement et modifie l'autre oxygène.

La cellulose offre de nombreuses opportunités pour la formation de liaisons hydrogène grâce à la présence d'un nombre important de groupes OH ; ces liaisons peuvent se créer entre les molécules ou même au sein de la molécule elle-même, renforçant ainsi sa stabilité. Les associations entre molécules facilitent leur regroupement en faisceaux qui se transforment ensuite en microfibrilles, puis en fibres et finalement en papier.

Ainsi, le papier est constitué de fibres de cellulose qui s'assemblent en présence d'eau. La résistance du papier est définie par la qualité des fibres et leur liaison mutuelle.

Ainsi, les chaînes de cellulose s'assemblent en faisceaux, maintenues ensemble par des liaisons hydrogène. Ces faisceaux de molécules peuvent être arrangés de deux manières :

- Les parties cristallines, qui présentent une organisation régulière. La quantité de liaisons hydrogène y atteint un maximum. Ce sont ces dernières qui confèrent au papier sa dureté et sa rigidité relative.
- Les parties amorphes, qui sont plus désorganisées, donnent au papier sa capacité d'élasticité et de flexibilité. Mais elles sont également plus sensibles et réactives à des facteurs externes. Elles constituent un environnement propice aux modifications de la cellulose, qui entraînent une détérioration de la qualité du papier. [5]

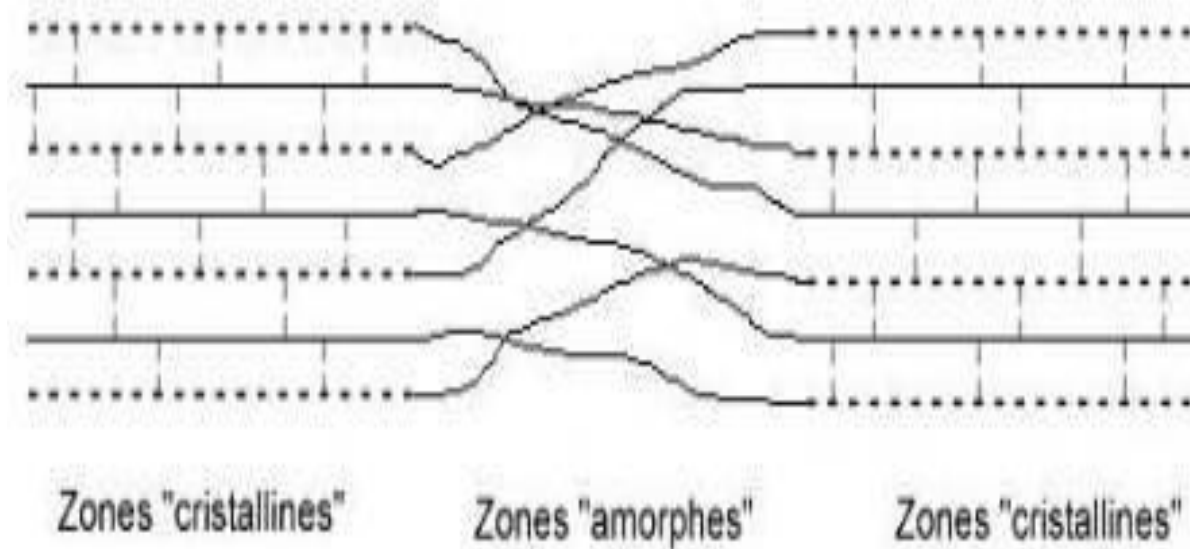


Figure I-4: Zones amorphes. [5]

➤ Les hémicelluloses

Les hémicelluloses, présentes aux côtés de la cellulose dans le bois, possèdent les propriétés suivantes :

- Une structure comparable à celle de la cellulose, mais faite de différents sucres, certains ayant cinq atomes de carbone et d'autres six.
- Les chaînes sont de longueur inférieure à celles de la cellulose.
- Ces chaînes peuvent être de nature linéaire ou ramifiée.
- On retrouve les hémicelluloses.
- Ou associées à la lignine dans le feuillet intermédiaire des fibres ligneuses.
- Ou au niveau de la paroi secondaire des fibres
- Elles peuvent être plus ou moins fortement attachées à la cellulose et à la lignine, de telle sorte qu'elles restent généralement associées à la cellulose, même après les processus de blanchiment.
- Elles présentent une stabilité chimique inférieure à celle de la cellulose et sont en partie solubles dans les solutions alcalines. Elles constituent une source d'instabilité pour le papier.

➤ Les lignines

La lignine est le composant majeur de la lamelle intermédiaire présente entre les fibres végétales. Cette lame fusionne les fibres entre elles, leur conférant ainsi une certaine rigidité. C'est la raison pour laquelle on le qualifie d'incrément.

La lignine possède une structure chimique extrêmement complexe et distincte de celle de la cellulose ; sa composition varie en fonction des espèces végétales.

Les lignines ne se dissolvent pas dans l'eau, cependant elles sont partiellement solubles dans des solutions alcalines. C'est par des procédés chimiques appropriés qu'on peut libérer les fibres de cellulose des dépôts pour produire la pâte à papier.

Dans l'article, les lignines sont considérées comme une impureté non souhaitée et leur présence contribue à un vieillissement accéléré. [5]

1.4. La fabrication de papier

1.4.1. Les matières de base

Un support confectionné à partir de fibres de cellulose est appelé une feuille de papier-carton. Ces fibres proviennent principalement du bois ou de Papiers et Cartons à Recyclage en vue de leur recyclage :

- Le bois employé est principalement issu des opérations d'éclaircissement réalisées en forêt, et des résidus de sciage du bois destiné à la menuiserie, l'ameublement ou la construction.
- Les Papiers et Cartons à Recycler sont conçus pour être recyclés et proviennent de diverses sources : industrielles (déchets de transformation, emballages industriels et commerciaux, journaux invendus, fournitures de bureau...) et domestiques (anciens journaux, emballages ménagers...).
- Au cours du processus de production du papier, des substances complémentaires peuvent être intégrées (charges minérales, additifs...) dans le but d'optimiser les propriétés du papier. [6]

1.4.2. La fabrication de la pâte à papier

La production de pâte implique la séparation des fibres de cellulose, qui proviennent en partie du bois et/ou de papiers et cartons destinés au recyclage.:

- Les pâtes de bois se produisent soit par le raclage du bois (pâte mécanique ou thermo-mécanique), soit par son traitement avec des substances chimiques (pâte chimique).
- La pâte recyclée est produite en suspendant les papiers et cartons à recycler dans l'eau, puis en les brassant dans un « pulpeur ». Ce processus est habituellement suivi d'opérations de purification et/ou d'élimination de l'encre. [6]

1.4.3. La fabrication de la feuille de papier-carton

Avant de se transformer en papier ou carton, la pâte à papier traverse tout un processus à travers la machine à papier :

Chapitre 01 : Généralités sur le papier

- La table de formation : la pâte à papier est appliquée en jet sur la « table de formation ». Le tissu est dynamisé par un mouvement intermittent, qui favorise la création de la feuille et son drainage.
- Les presses : le papier est pressé entre deux rouleaux tapissés de feutre absorbant.
- Le séchage : la feuille est déshydratée contre des tambours de fer qui sont chauffés à l'intérieur par de la vapeur.
- L'enduction : la feuille est revêtue de substances (pigments, colorants, ...) qui améliorent ses caractéristiques.
- Les apprêts : la surface du papier est nivelée par compression entre des cylindres d'acier (lissage et calandrage).
- Le couchage : Le papier peut être enduit d'une couche de pigment minéral (comme le kaolin, etc.) sur une ou deux faces, afin d'améliorer sa capacité à être imprimé.
- La enrouleuse : la feuille est transformée en bobines. Elle peut ensuite être découpée en feuilles ou reconditionnée en rouleaux de plus petite taille. Le papier est prêt pour la livraison. [6]

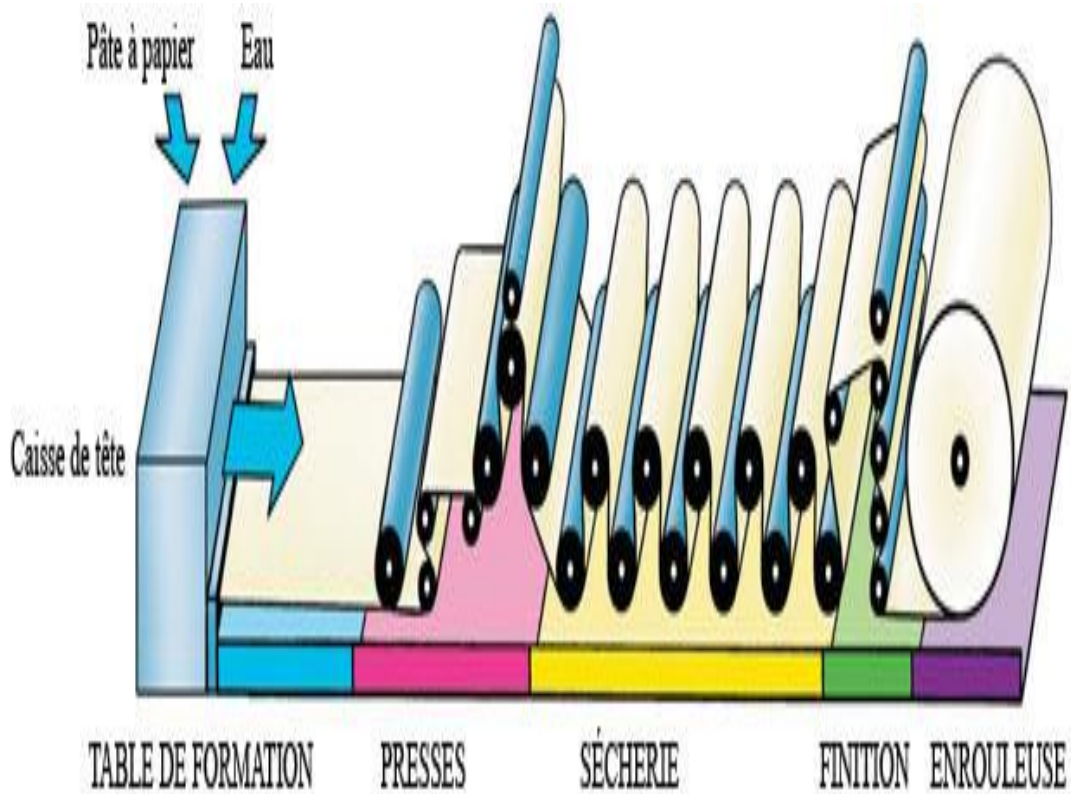


Figure I-5 : Machine à papier. [6]

1.4.4. La différence entre le papier et le carton

La principale différence entre le papier et le carton se trouve dans leur composition, leur structure et leur usage prévu. Le papier est habituellement plus mince et fait d'une seule couche de fibres de cellulose, alors que le carton, généralement multicouche et plus épais, est conçu pour être solide et résistant. Les sections ci-après expliquent en détail ces divergences.

Composition et structure:

Papier : constitué d'une unique couche de fibres de cellulose, élaborée à partir d'une émulsion de matières similaires à des fibres et asséchée pour produire des feuilles. (Lüchtrath et al., 1983). [6]

Carton : il est généralement constitué de plusieurs couches, pouvant comporter un papier de fond ainsi que des finitions additionnelles pour des caractéristiques améliorées, comme l'imperméabilité et l'adaptabilité à l'impression. (Mitsuhiro, 2010).

Résistance et durabilité :

Papier : moins résistant et plus léger, idéal pour l'impression, l'écriture et l'emballage de produits peu lourds.

Carton : Fabriqué pour être robuste, intégrant fréquemment des additifs comme des débris plastiques afin d'accroître la résistance à la rupture et la pérennité écologique. (Guoxi & Zhaoqiang, 2016).

Demandes :

Papier : fréquemment employé pour les livres, la papeterie et les quotidiens.

Carton : très utilisé pour l'emballage, le transport et les applications structurales grâce à sa solidité.

Au contraire, bien que le carton soit généralement perçu comme une alternative plus durable, les avancées technologiques dans le domaine du papier ont donné naissance à des papiers spécialisés capables de fournir des propriétés significatives de solidité et de protection, remettant en cause les idées conventionnelles concernant les limites du papier. (Gilbert & Lundh, 2005).

1.5. Les différents types et qualités de papier et leur domaine d'usage

1.5.1. Les types de papier

Papier offset

Ce papier, destiné tout particulièrement à l'impression offset, se décline en diverses qualités. Ce sont des papiers non couchés dont la surface est traitée avec de l'amidon : ce processus réduit le déchirement et l'absorption de l'encre, offrant ainsi une excellente qualité d'impression d'image. Applications : livres, catalogues, brochures, dictionnaires, papeterie...

- Papier Bristol

Doté d'une rigidité marquée, d'une texture très douce et d'un grain uniforme, ce papier est employé aussi bien pour l'écriture que pour l'impression.

- Papier couché

Le papier couché peut se présenter sous une finition brillante, satinée ou mate. On le trouve fréquemment dans l'imprimerie, où il est soumis à un processus particulier pour obtenir une texture lisse au toucher. Le terme « couché » ne se réfère pas forcément à l'idée de brillance, car il existe des papiers couchés satinés et mats en plus des papiers couchés brillants. Un papier non couché a une plus grande capacité à absorber l'encre. Usage : brochures, dépliants, prospectus, posters, revues, encyclopédies, éditions de luxe ou artistiques.

- Papier non couché

Possède une surface légèrement inégale, couramment utilisée dans le domaine de la communication et de la bureautique. Utilisation : photocopies, impressions, liasses de papier, dessins, enveloppes, agendas, posters, étiquettes et autres.

- Papier (non couché) bouffant

Papier d'impression, qu'il soit boisé ou non, peu chargé et non collé, de qualité brute, présentant une bonne maniabilité et utilisé pour la production de livres typographiés.

- Papier autocopiant

Formé pour reproduire un original par simple impression, sans recours au papier carbone, et utilisé principalement pour la production de duplicata : carnets de commandes, factures, etc.

- Papier ignifugé

En raison de considérations liées à la sécurité, la loi française exige l'utilisation de matériaux ignifugés classés M1 (non-inflammables) pour les panneaux d'affichage et de décoration d'une superficie égale ou supérieure à 0,5 m², dans des espaces et dégagements dépassant les 50 m². Pour les événements temporaires, il est nécessaire que les matériaux employés soient de classe M2 (peu inflammables). Gardez cela à l'esprit surtout quand vous commandez l'impression de kakémonos, bâches... [7]

1.5.2. Les papiers et cartons d'emballage

Les papiers et cartons d'emballage sont des matériaux largement utilisés pour protéger, stocker et transporter des produits. Ils sont principalement composés de fibres végétales à base de cellulose, issues de fibres vierges ou recyclées, parfois associées à des additifs ou revêtements spécifiques selon leur usage. [8]

Types et usages des papiers et cartons d'emballage :

- Cartons ondulés et cartons plats : très courants pour les boîtes d'emballage, ils assurent la protection des produits lors du transport et du stockage. [9] [10]
- Papiers kraft : couramment utilisés pour l'emballage intérieur, ils sont recyclables et disponibles en versions étanches pour se défendre contre l'humidité. [11]
- Emballages légers : comme le papier de soie ou le papier goudronné, ils ont pour fonction de préserver les produits délicats, en particulier ceux en textile ou fragiles. [11]
- Emballages personnalisables : papiers et cartons en rouleaux que l'on peut couper à la demande, offrant une solution d'emballage sur mesure et soignée. [12].

Recyclage et tri :

En France, les papiers et cartons d'emballage constituent des déchets parmi les plus recyclés, avec une utilisation annuelle approximative de 9 millions de tonnes. Un tri minutieux est nécessaire : les cartons doivent être pliés, exempts de restes alimentaires, et on évitera la coupe du papier en petites particules afin de conserver la longueur des fibres de cellulose, ce qui favorise le recyclage. [9]

- Suite à leur collecte, les papiers et cartons sont triés, conditionnés sous forme de balles, puis acheminés vers des sites de recyclage où ils sont convertis en pâte à papier. On utilise ensuite cette pâte pour produire de nouveaux papiers et cartons, complétant ainsi le cycle de valorisation. [9] [10]

Avantages des emballages papier-carton

- Protection optimale des articles, en particulier ceux qui sont délicats, grâce à une augmentation de la densité du matériau à l'intérieur de l'emballage. [12]
- Des matériaux légers et stables, qui favorisent une production durable grâce à l'emploi de fibres renouvelables. [13]
- Facilité de recyclage et participation à la protection des ressources naturelles tout en diminuant l'impact sur l'environnement. [9] [12]

1.5.3. Les papiers industriels et spéciaux

Les papiers industriels et spéciaux regroupent une catégorie de papiers et cartons qui ne correspondent pas aux usages graphiques, d'emballage ou d'hygiène classiques. Ils sont conçus pour des usages techniques et de pointe, souvent avec des procédés de fabrication sophistiqués.

Caractéristiques et usages des papiers industriels et spéciaux :

- Applications fiduciaires : Ces documents assurent la véracité et la protection des documents officiels comme les billets de banque, cartes d'identité, chèques, tickets de loterie, etc. Ils sont conçus pour être inaltérables et protégés. [14] [15] [16]
- Applications industrielles : Cela englobe les papiers destinés aux stratifiés, les papiers abrasifs, les papiers résistants au feu, les papiers pour la filtration, ainsi que les papiers isolants employés dans les fils électriques et téléphoniques. [14] [15] [16]
- Applications graphiques spécifiques : Par exemple, les papiers de transfert, les papiers calques, les papiers destinés à l'impression ou au transfert d'image, les papiers fluorescents, les papiers synthétiques, ou encore les papiers présentant des caractéristiques spécifiques comme le papier filigrané ou coloré. [14] [17] [16]
- Usages supplémentaires : Papiers pour cigarettes, papiers mousseline (serviettes, essuie-tout), papiers de soie, papiers décorés, papiers pour la cuisson, et ainsi de suite. [15] [16]

1.5.4. Les papiers d'hygiène ou à l'usage sanitaire et domestique

Les produits d'hygiène ou sanitaires et domestiques incluent principalement des articles en papier tissu destinés à l'hygiène personnelle, au nettoyage et à la gestion des liquides. Ces articles comprennent entre autres le papier hygiénique, les essuie-tout, les kleenex, les serviettes de table en papier et les nappes en papier.

Types de papiers d'hygiène :

- Papier toilette : Utilisé pour l'hygiène intime, il est généralement doux, absorbant et conforme aux normes d'hygiène. Il existe en plusieurs formats : rouleaux classiques,

bobines pour lieux à forte fréquentation, et papier plié distribué feuille à feuille pour une meilleure hygiène et gestion de la consommation. [18] [19] [20]

- Essuie-tout et serviettes en papier : Ces produits, fabriqués à partir de ouate de cellulose, sont destinés au nettoyage et à l'absorption, notamment dans la cuisine ou pour l'essuyage des mains. Ils ne sont pas conçus pour un contact prolongé avec les aliments mais peuvent être utilisés occasionnellement à cet effet. [21]
- Mouchoirs et lingettes : Utilisés pour le visage ou le nettoyage, ils partagent les caractéristiques de douceur et d'absorption du papier tissue. [21]

1.6. Les caractéristiques de papier

Les caractéristiques du papier se répartissent en plusieurs catégories : physiques, mécaniques, optiques et physico-chimiques. Voici les principales :

Caractéristiques physiques :

- Grammage : masse du papier par unité de surface, exprimée en grammes par mètre carré (g/m^2). C'est un indice fondamental qui influence la résistance, l'épaisseur, l'opacité et la qualité d'impression du papier. [22] [23]
- Épaisseur : mesure la hauteur de la feuille, généralement en micromètres (μm). Elle est liée au grammage mais aussi à la structure du papier. L'épaisseur doit être uniforme pour garantir une bonne qualité d'impression et de fabrication. [22] [23]
- Bouffant : impression tactile d'épaisseur donnée par un papier, exprimant la sensation de volume ou de gonflement. Un papier avec un fort bouffant paraît plus épais et plus souple. [22] [23]
- Main : rapport entre l'épaisseur et le grammage, indicateur de la sensation au toucher, de la souplesse et du volume du papier. [22] [23]
- Rugosité : mesure la texture de surface, la profondeur moyenne des reliefs en micromètres. Elle influence la qualité d'impression et la douceur au toucher. [22] [23]
- Lissé : inverse de la porosité, indique la régularité et la finesse de la surface. Un papier lisse facilite l'impression nette. [24] [22]
- Porosité : : perméabilité à l'air ou à l'eau, elle mesure la capacité du papier à laisser passer un fluide. Elle affecte l'absorption d'encre et la résistance.
- Sens de fabrication (sens machine) : orientation des fibres dans la feuille, influençant la rigidité, la flexibilité et le comportement au pliage. [24] [22]

1.7. Les impacts de la fabrication de papier sur l'environnement

La fabrication de papier a plusieurs impacts significatifs sur l'environnement, notamment liés à la consommation de ressources naturelles, la pollution, et les émissions de gaz à effet de serre.

Consommation de ressources naturelles :

- La production de papier nécessite une grande quantité d'eau : environ 324 litres pour 1 kg de papier, soit environ 10 litres pour une seule feuille A4. [25]

- Elle consomme également beaucoup d'énergie, l'industrie papetière étant le cinquième plus grand consommateur d'énergie au monde, utilisant environ 4 à 5 % de l'énergie mondiale. [25]
- La fabrication repose majoritairement sur des fibres de bois, avec environ 42 % du bois mondial destiné à la production de papier, dont 17 % provient de forêts vierges, ce qui contribue à la déforestation et à la perte de biodiversité, notamment dans les forêts tropicales primaires comme l'Amazonie. [25] [26]

Pollution et déchets :

- La production de papier génère des rejets toxiques dans l'air, l'eau et le sol, notamment des substances issues des agents de blanchiment au chlore et des additifs utilisés pour l'impression et l'imperméabilisation. [27] [28]
- Ces polluants affectent les écosystèmes aquatiques en tuant les microbes, insectes et plantes aquatiques. [25].
- La fabrication produit aussi des déchets solides importants, qui occupent environ 17 % des espaces de décharge mondiaux, et une grande partie des déchets municipaux est constituée de papier. [25]
- Le papier en décomposition dans les décharges émet du méthane, un gaz à effet de serre 25 fois plus puissant que le CO₂. [28]

Émission de gaz à effet de serre :

- La fabrication de papier contribue significativement aux émissions mondiales de gaz à effet de serre. Environ 21 % des émissions de GES des industries proviennent des usines de pâte et papier, principalement durant la phase de production, mais aussi à cause de la déforestation et des décharges. [25] [29]
- Cependant, des progrès sont réalisés, notamment avec le remplacement de 40 % des énergies fossiles par de la biomasse, ce qui a permis de réduire de 50 % les émissions de CO₂ dans la fabrication du papier. [30]

Gestion durable et recyclage :

- L'industrie papetière utilise de plus en plus des fibres recyclées, avec un taux européen de plus de 70 % de papier réutilisé, bien que les fibres ne puissent être recyclées qu'environ 5 à 6 fois avant d'être trop dégradée. [30]
- Des certifications telles que PEFC et FSC encouragent une gestion durable des forêts utilisées pour la production de pâte à papier. [27] [30]
- L'industrie utilise aussi des sous-produits forestiers comme les chutes de scieries et le bois d'éclaircie, contribuant à une meilleure gestion forestière. [29]

1.8. Pays producteurs et exportateurs de papier

Les principaux pays producteurs et exportateurs de papier et de pâte à papier dans le monde sont répartis principalement en Asie, en Europe et en Amérique du Nord.

1.8.1. Les principaux pays producteurs de pâtes et papiers au monde

- Chine : Premier producteur mondial, avec une production dépassant 100 millions de tonnes. La Chine est également un exportateur majeur, avec une croissance notable ces dernières années. [32] [33] [34]
- États-Unis : Deuxième producteur mondial avec environ 75 millions de tonnes par an, également un grand exportateur. [32] [33] [34]
- Japon : Environ 26 millions de tonnes de papier produits par an, un acteur majeur en Asie. [32] [33]
- Allemagne : Premier producteur européen avec une production proche de 22 millions de tonnes, important exportateur en Europe. [35] [33]
- Finlande : Environ 22,7 millions de tonnes par an, avec des entreprises comme Stora Enso et UPM-Kymmene qui dominent le marché européen et mondial. [35] [15] [36]
- France : Production d'environ 7 à 8 millions de tonnes, concentrée aussi bien dans la pâte à papier que dans le papier journal et carton. [37]
- Corée du Sud : Environ 12 millions de tonnes, un acteur important en Asie. [33]

Exportateurs clés :

- Finlande : Exporte environ 1,8 million de tonnes de pâte à papier par an, avec une industrie très tournée vers l'export. [36]
- Chili : Exporte plus de 4 millions de tonnes de pâte à papier, représentant environ 8 % de la production mondiale, un acteur important en Amérique latine. [36]
- Europe : La production est concentrée dans plusieurs pays (Portugal, Espagne, France, Belgique pour la pâte à papier ; Allemagne, Royaume-Uni, France, Pays-Bas, Italie pour le papier journal), avec une forte orientation exportatrice. [35]

Entreprises majeures influençant la production et l'exportation :

- International Paper (États-Unis) : Présence mondiale avec une large gamme de produits, leader dans l'industrie. [36] [15]
- UPM-Kymmene (Finlande) : Connu pour ses produits renouvelables et ses pratiques durables. [35]
- Stora Enso (Finlande) : Large gamme de produits, innovation et durabilité au cœur de sa stratégie. [15] [35]
- Sappi (Afrique du Sud) et Fibria (Brésil) sont aussi des acteurs importants dans la production de pâte à papier et papier. [35]

Tableau I-2: Répartition géographique de la production mondiale (en 2023-2024)

Région	Principaux pays	Part de la production mondiale approximative
--------	-----------------	--

Chapitre 01 : Généralités sur le papier

Asie	Chine, Japon, Indonésie, Corée du Sud	Environ 46 %
Europe	Allemagne, Finlande, France, Portugal	Environ 25 %
Amérique du Nord	États-Unis, Canada	Environ 22 %
Amérique latine	Chili, Brésil	Minoritaire mais en croissance

Tableau I-3: Rang des pays producteurs de pâte et papiers au monde [38]

Rang	Pays	Production (1,000 Ton)
1	Chine	99,300
2	États – unis	75,083
3	Japan	26,627
4	Allemagne	22,698
5	Canada	12,112
6	Corée du Sud	11,492
7	Finlande	11,329
8	Suède	11,298
9	Brésil	10,159
10	Indonésie	10,035

1.8.2. Dix principaux pays exportateurs de pâtes et papiers

Voici les dix principaux pays exportateurs de pâtes et papiers, basés sur les données récentes et les analyses des flux commerciaux mondiaux :

Tableau I-4: Dix principaux exportateurs de pâte et papiers [39]

Pays	Part des pâtes et papiers dans les exportations du pays	Part du pays dans le total des exportations de pâtes et papiers	Plus importante exportation
États-Unis	1,6%	12,9%	Papier de bureau
Allemagne	2,9%	11,8%	Papier de bureau
Canada	3,3%	7,8%	Pâte kraft
Chine	0,7%	7,1%	Papier d'emballage

Chapitre 01 : Généralités sur le papier

Suède	7,7%	6,8%	Papier de bureau
Finlande	15,7%	5,9%	Papier de bureau
France	1,5%	4,2%	Papier de bureau
Italie	1,5%	3,9%	Papier de bureau
Pays-Bas	1,1%	3,8%	Pâte kraft
Brésil	2,7%	3,4%	Pâte kraft

1.9. Pays consommateurs et le plus consommateur du papier

L'usage de papier et carton à l'échelle mondiale a connu une hausse de 5,4% sur une décennie (de 2010 à 2020). Cette hausse est principalement attribuée à la croissance économique dans les pays en développement (Asie, Amérique latine, etc. [40])

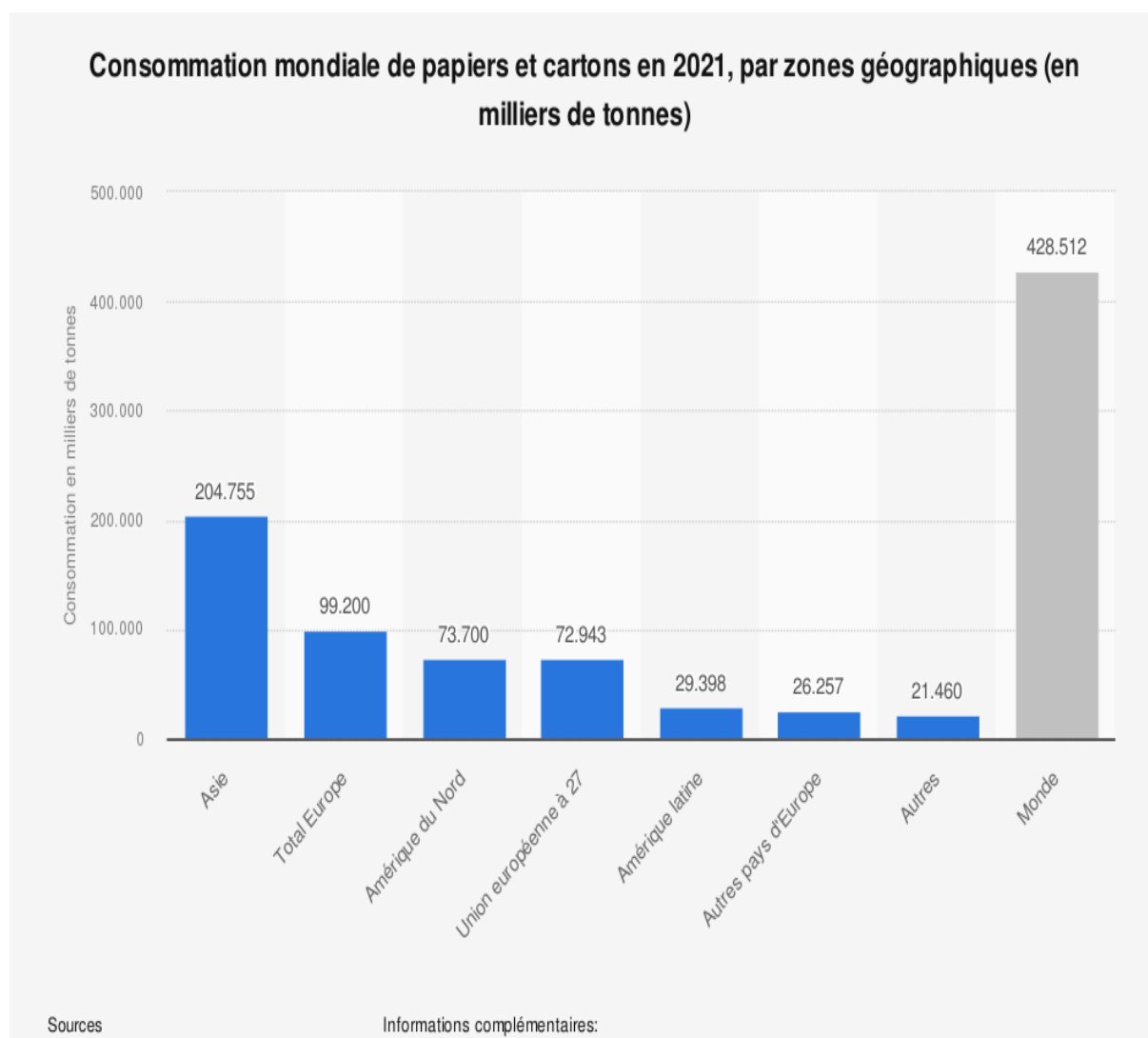


Figure I-6: La consommation apparente de papiers et cartons dans le monde de 2009 à 2017. [42]

En 2017, la consommation mondiale de papier, qui dépassait les 420 millions de tonnes, était équivalente à la production de cette même industrie. En moyenne, un individu utilise 57 kilos de papier et carton chaque année. La Chine utilise à elle seule 113 millions de tonnes de papier et carton chaque année. Les États-Unis la suivent de près avec une production dépassant les 70 millions de tonnes. Avec près de neuf millions de tonnes, la France se classe au huitième rang des pays consommateurs. [40]

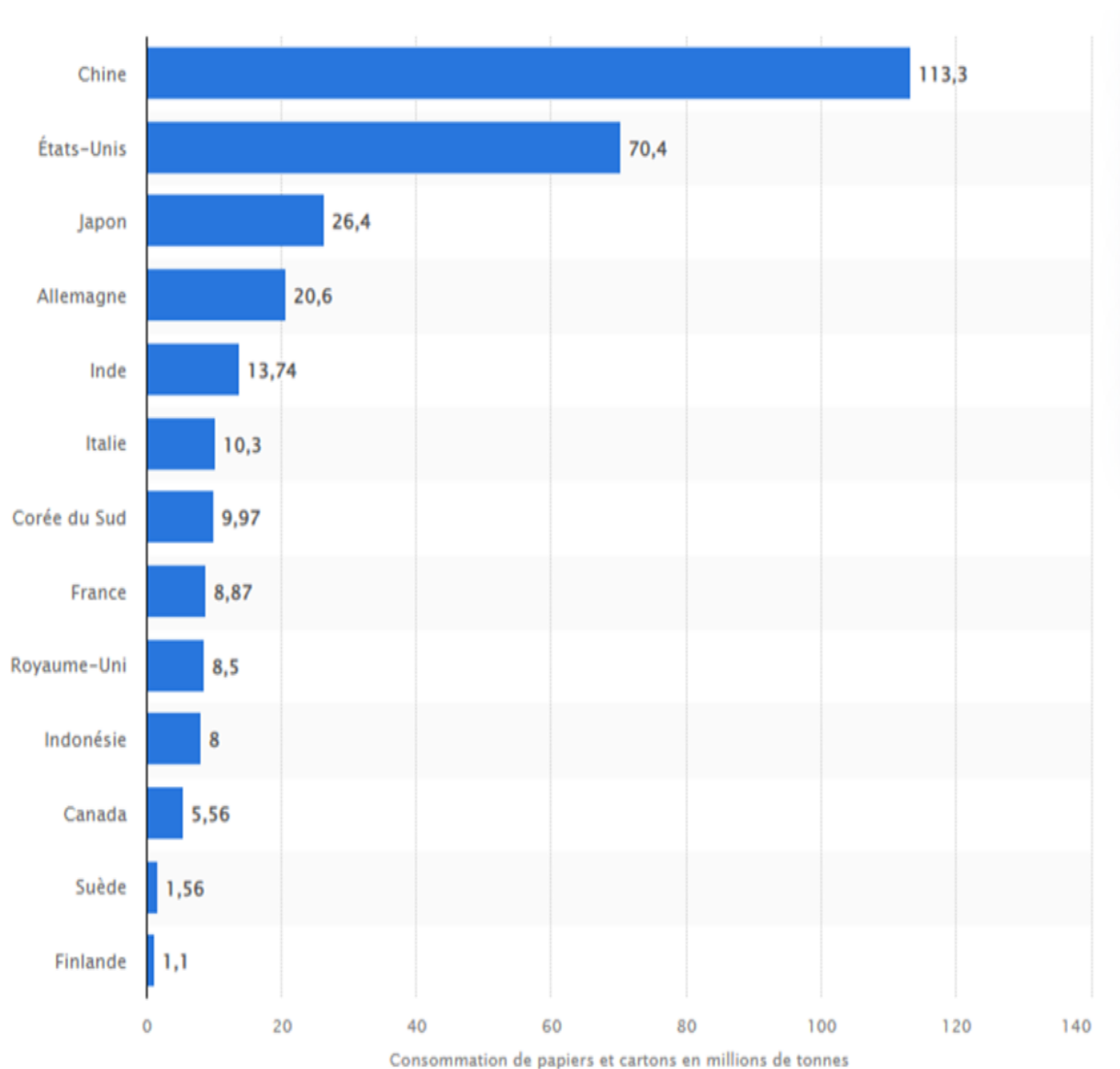


Figure I-7: La consommation apparente de papiers et cartons dans une sélection de pays du monde en 2017. [37]

Consommation de papiers et cartons par habitant

en kilogrammes	2009	2019	Rang 2019
Belgique	317	268	1
Slovénie	160	265	2
Allemagne	221	235	3
Autriche	232	227	4
USA	231	206	5
Japon	215	203	6
République de Corée	173	189	7
Finlande	282	172	8
Italie	170	169	9
Taiwan	153	169	10
Pays-Bas	189	164	11
Nouvelle-Zélande	201	162	12
Pologne	108	161	13
République Tchèque	133	155	14
Emirats Arabes Unis	189	152	15
Danemark	205	150	16
Canada	190	150	17
Suède	210	149	18
Estonie	87	138	19
Espagne	154	134	20
Lituanie	50	133	21
Croatie	86	128	22
Australie	176	127	23
France	149	127	24

Figure I-8: Consommation de papiers et cartons par habitant en 2009 et 2019. [40]

En 2019, la Belgique et l'Allemagne se distinguent comme les principaux pays consommateurs de papiers et cartons, avec respectivement 268 kg par habitant par an et 235 kg par habitant par an. [40]

- Les papiers à usages graphiques et les papiers d'emballage représentent environ 88,7% de la consommation en 2009.

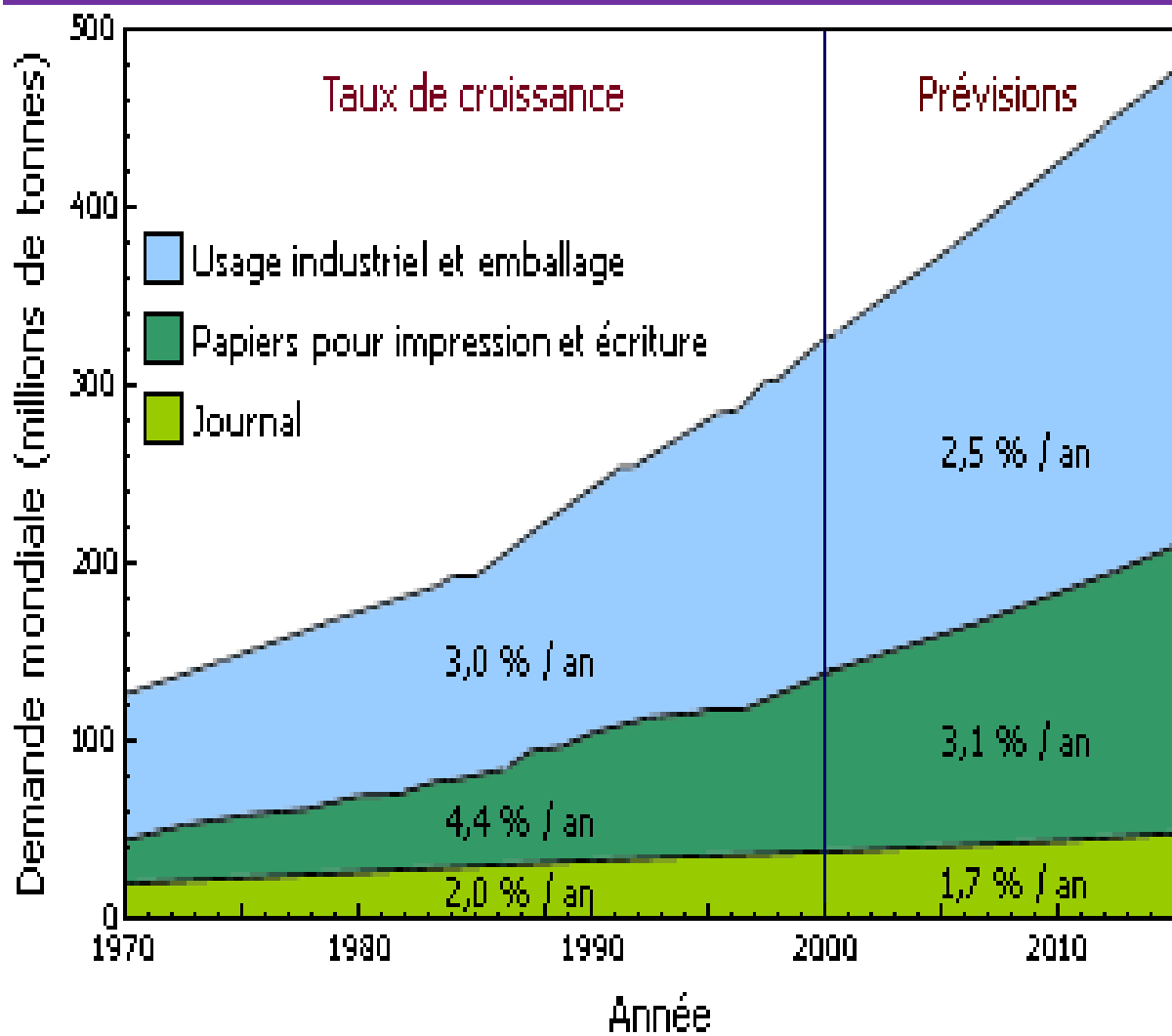


Figure I-9 : Demande mondiale de papiers et de cartons 1970-2015. [40]

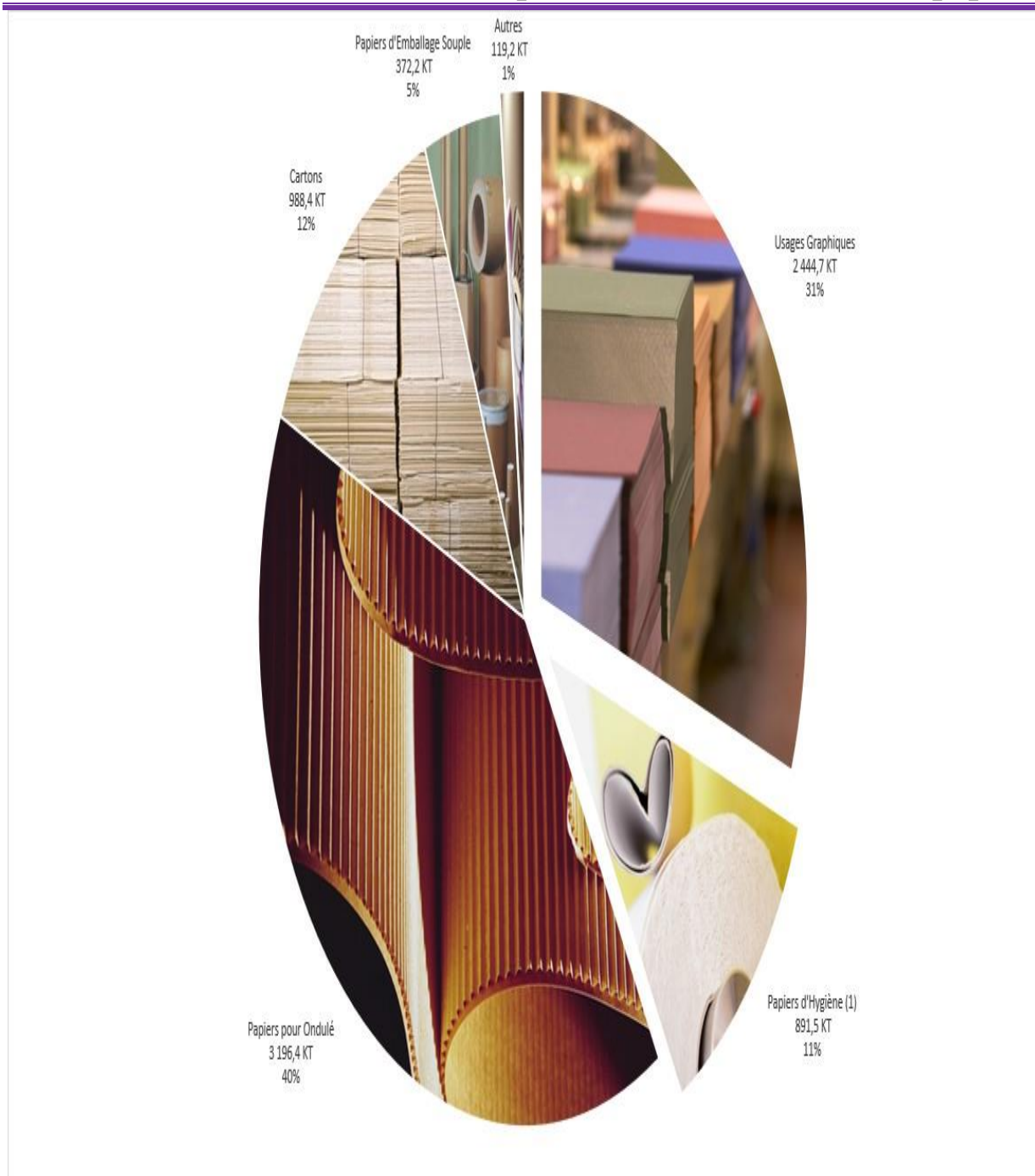


Figure I-10: Consommation apparente de papiers et cartons par sortes. [40]

– Plutôt que d'éliminer le papier, l'informatique, les smartphones, la télévision et les technologies de communication modernes ont en fait augmenté notre consommation de papier. Le papier demeure le principal moyen de communication en entreprise, malgré son statut d'outil complémentaire et essentiel aux technologies de l'information et de la communication. L'informatique crée donc une demande de plus en plus grande d'impression, et par conséquent, de papier. [36]

- Étant donné que le papier est une ressource renouvelable, son recyclage représente un défi crucial pour l'industrie du papier et du carton. [41]

Chapiter 2: Recyclage de papier

I.1.1 Définition du recyclage

En d'autres termes, le recyclage consiste à convertir des substances et des matières en de nouvelles, dans le but de réduire les pollutions et la consommation de ressources liées à la production de produits neufs.

Le recyclage en circuit fermé, qui permet de produire des produits de qualité similaire, est généralement distingué du recyclage en circuit ouvert, où la matière produite est intégrée à des biens différents du produit initial.

Ces dernières années, le recyclage a connu une certaine évolution

Le souci réside dans le fait que notre consommation continue de croître de manière croissante et que la quantité de déchets dans le monde atteint désormais des niveaux records.

I.1.1.1 Comprendre facilement le recyclage

Nos modes de vie et de consommation ont un impact direct sur notre environnement, et notre croissance se fait encore trop souvent au détriment de la nature qui a tant à nous offrir.

Heureusement, les mentalités évoluent grâce à la prise de conscience écologique qui met en lumières, chaque jour, tous les services inimaginables rendus par notre belle planète.

Alors pour lui rendre un peu la pareille, on multiplie aujourd'hui les initiatives écoresponsables dans l'espoir de lui donner un peu de répit, un petit geste à la fois.

Le recyclage fait partie de ces initiatives et permet de réaliser chaque année de formidables économies de ressources et d'énergie.

Dans ce nouveau sujet, nous nous intéresserons à son fonctionnement et à ses avantages mais aussi à ses limites, mais dans le domaine des papiers. [43]

Si le papier contient au moins 50 % de fibres de cellulose issues de vieux papiers (post-consommation) ou de déchets industriels (pré-consommation), on parle de papier recyclable. Il existe du papier 100 % recyclé ou un mélange de fibres recyclées et de fibres vierges dans des proportions différentes. Bien entendu, le papier le plus respectueux de l'environnement sera du papier 100 % recyclé post-consommation, non désancré et non blanchi. [44]

Après la collecte, les papiers et cartons sont triés, puis compactés en grosses balles. A la papèterie, ils sont réduits mécaniquement en pâte avec un apport d'eau. Celle-ci est ensuite désancrée avec du savon et de l'oxygène. Cette étape permet aussi d'éliminer les substances et les objets indésirables (colles, plastiques, agrafes), ainsi qu'une partie des fibres devenues trop courtes. La pâte blanchie est enrichie des additifs nécessaires et est répartie sur un tamis déroulant, pour former de longues feuilles, qui seront pressées, avant d'être enroulées. [45]

L'augmentation du niveau de vie a entraîné, depuis trente ans, un doublement des achats de biens.

Fabriqués par les foyers. Le recours croissant aux ressources naturelles et à leur utilisation

La diminution de la raréfaction encourage le recyclage et le réemploi, voire les rend nécessaires.

Depuis longtemps ignoré, le recyclage a toujours existé, mais il est désormais au centre de l'industrie du recyclage. Profitant de la hausse des prix et de l'évolution du cours des matières premières.

Depuis des années, le recyclage a été régulé par les réglementations européennes.

Au fil des décennies, de nombreuses avancées techniques ont permis d'obtenir une nouvelle matière première. [46]

I.1.2 Historique de recyclage

Le recyclage des déchets n'est pas né d'hier et précède même de plusieurs siècles l'invention des poubelles. Il fait désormais partie de notre quotidien.

I.1.2.1 Les première temps de recyclage

Malgré le manque de sources permettant de l'attester dès l'âge de bronze (de 3000 à 1000 avant JC), les historiens ne douteraient pas que le principe du recyclage ait accompagné l'évolution des premiers artisanats humains.

D'autre part, plusieurs études archéologiques démontrent que les proto-décharges de la Grèce antique – vers 400 avant JC – renfermaient moins d'outils usagés ou de vases brisés pendant les périodes de récession. Cela nécessiterait une réutilisation méthodique des matériaux, qui seraient refondus afin d'être transformés en nouvelles pièces.

Puis l'idée du recyclage du papier s'est répandue dans la plupart des régions du monde par exemple Au premier siècle en Chine, le chef de l'agriculture de la dynastie Han recommandait aux citoyens de l'empereur de cuire des morceaux de lin ancien pour produire du papier. Cette technique a ensuite été introduite en Europe au VIIIe siècle (à cette époque, les collectionneurs de chiffons sont apparus) par les civilisations arabes, qui ont mené des explorations en Extrême-Orient. C'est ainsi qu'est né le recyclage des tissus.

Un peu plus tard, durant le moyen âge, la gestion des déchets pose de véritables difficultés. Les villes se développent, les populations augmentent, tout comme la quantité de déchets. Sans réglementations claires pour leur gestion, les ordures s'accumulent dans les rues et les rivières des villes, représentant un problème majeur jusqu'à la renaissance. À cette époque, des rois comme François 1er commencent à introduire des récipients pour collecter les déchets, ce qui facilite leur réutilisation. En Angleterre, les premiers professionnels du recyclage se mettent à récupérer régulièrement la poussière et les cendres provenant des cheminées, pour ensuite les vendre aux entreprises de briques, qui

voient en elles un matériau de construction particulièrement abordable. Du côté du Japon, le recyclage du papier existe déjà depuis plusieurs siècles et leurs méthodes continuent de s'améliorer. [47]



Figure II-1: Les collectionneurs de chiffons. [48]

Origine du papier recyclé

L'idée de recycler le papier remonte à plusieurs siècles, mais ce n'est qu'au 20^e siècle que le recyclage a été adopté à grande échelle. Initialement, le recyclage du papier était motivé par la pénurie de matières premières, notamment pendant les périodes de guerre.

Avec le début de la prise de conscience environnementale dans les années 1970, le recyclage a su se faire une place. Des avancées technologiques ont amélioré la qualité de ce papier, pour devenir un concurrent direct du papier vierge. [49]

I.1.3 Different types de papier [50]

Les produits de la papeterie sont extrêmement diversifiés. Leur aspect doit être adapté à leurs usages.

-Papiers “impression” et les papiers “écriture”

Les papiers “impression” sont destinés à recevoir une ou plusieurs impressions. Les papiers “écritures” aptes à recevoir des inscriptions au moyen d'encre pour écriture. Ils se différencient selon leur état de surface, qui peut être : non apprêté, apprêté, satiné, surglacé.

Cet état de surface résulte du traitement subi par le papier au cours de sa fabrication. On classe les papiers “impression” et “écriture” en quatre groupes.

-Papier journal

Chapitre 02 : Recyclage de papier

Un papier journal existe en non apprêté et apprêté ; il prend alors les noms de “journal ordinaire” ou “journal amélioré” (papier ayant une blancheur supérieure). [50]

-Papiers “emballage”

Par combinaison de différents supports à base de cellulose avec des métaux, des matières plastiques, des cires, des colles, de la paraffine, les spécialistes créent, à la demande, des produits étanches ou perméables, dont la porosité est parfaitement contrôlée. [50]

- Papiers métallisés

Ils sont constitués d’une feuille de cellulose qui a reçu une couche d’aluminium par métallisation directe sous vide. L’aluminium fondu est vaporisé sur un support lisse, vernis et de très faible teneur en eau. [50]

-Papiers entrant dans la composition des complexes

Le complexe consiste à associer différentes matières (papiers, plastiques, aluminium...) pour obtenir un compromis utile entre l’aspect (valorisant) et l’imprimabilité du support, et les qualités spécifiques.

Et il en existe de nombreux autres types, dont la plupart ont été mentionnés dans le premier chapitre. [50]

1.1.3.1 Papier qui se recycler

-Les cartons multicouches: C’est un emballage pour les aliments ou les boissons, comme les emballages pour les jus, le lait, la crème, les soupes et bouillons, le vin, etc. Ces contenants ne sont pas cirés ; ils peuvent donc être recyclés ;

-Les cartons ondulés: Tous les cartons ondulés (bruns) servant à l’emballage ou à la protection de diverses sortes de produits et de biens sont recyclables, tels que les cartons dans les emballages de biscuits

- Les journaux, circulaires, revues, magazines et livres

- Le papier de bureau : Les feuilles de papier servant pour l’imprimante ou simplement à écrire sont toutes recyclables

-Les enveloppes : même avec la petite fenêtre de plastique, les enveloppes régulières se recyclent

- Le papier de soie

- Les sacs en papier bruns

- Les boîtes d’œufs

- Les boîtes de mouchoirs, de céréales, de savon à lessive et de chaussures. [51]

I.1.3.2 Le papier qui ne se recycle pas

- Le papier plastifié
- Le papier traité avec de la colle
- Le papier souillé par la nourriture
- Le papier cadeau
- Le papier photo
- Le papier filtre
- Le papier peint
- Le papier aluminium
- Le papier calque
- Le papier carbone
- Le papier toilette, le sopalin et les mouchoirs... [51]

I.1.4 Processus de recyclage de papier

Le processus de recyclage du papier se déroule en plusieurs étapes clés qui garantissent la transformation efficace des déchets de papier en nouveaux produits. Au départ, les déchets de papier collectés sont transportés vers des centres de recyclage où ils subissent un processus rigoureux. Cette démarche commence par la collecte des déchets de papier, qui proviennent de diverses sources telles que les ménages, les bureaux et les industries. Les matériaux sont ensuite acheminés vers des installations spécialisées pour le tri et la sélection. Dans cette phase, les différents types de papier sont séparés, car chacun a des propriétés spécifiques et peut être recyclé de manière différente. Par exemple, le papier journal est traité différemment du carton ou du papier d'impression. Une fois triés, les papiers sont généralement broyés et réduits en pulpe. Cette pulpe est ensuite mélangée avec de l'eau et des additifs pour éliminer les impuretés et les encres, un processus crucial pour obtenir un produit de qualité. Après le broyage, la pulpe de papier est filtrée, blanchie si nécessaire, et finalement séchée pour former de nouvelles feuilles de papier. Ce papier recyclé peut ensuite être utilisé pour produire une variété de nouveaux produits, allant des articles ménagers aux emballages, contribuant ainsi à la réduction des déchets et à la préservation des ressources naturelles. La gestion efficace de ce processus nécessite des technologies avancées et une coopération entre divers acteurs pour

maximiser le taux de recyclage et minimiser l'empreinte écologique associée à la production de papier. [52] [53]

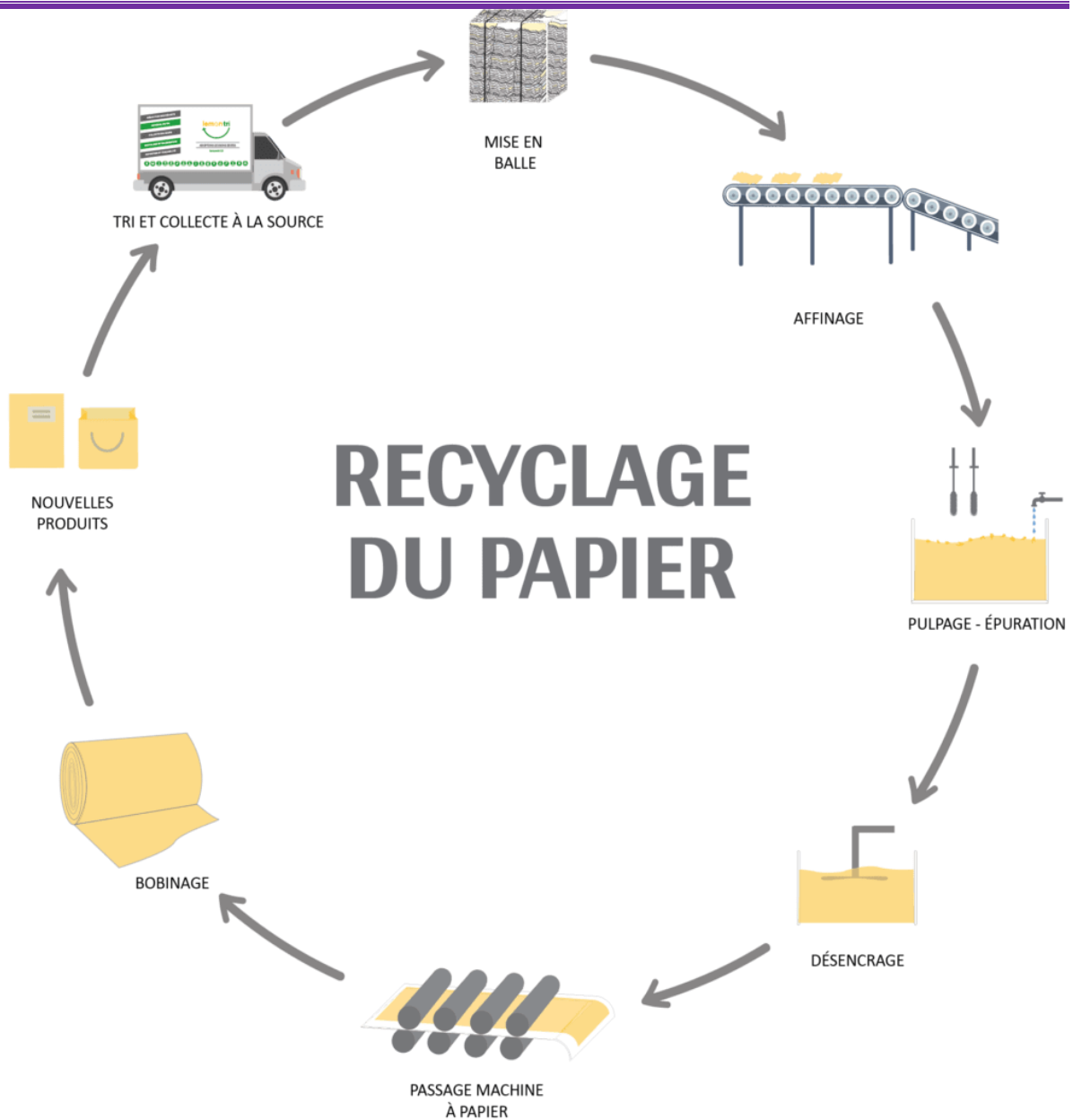


Figure II-2: Le cycle de recyclage du papier. [54]

Etape 1 - Tri des papiers

C'est plus facile car les processus de recyclage d'aujourd'hui sont très efficaces et permettent l'extraction d'éléments étrangers (plastique, verre ou autre) pour réorientation vers d'autres formations. C'est notamment le cas des spirales portables, des goupilles et des

Autres trombones. Le tri est donc très simple : les papiers sont placés dans des boîtes de tri spéciales, généralement de couleur bleue ou jaune. [56]

Tous les papiers se trient et se recyclent



Figure 2-3: Le tri de papiers. [55]

Etape 2- collecte des papiers en entreprise :

D'une manière générale, dans les réseaux professionnels, il est indispensable de faire appel à des professionnels du recyclage qui se chargeront de la collecte et de la revalorisation. Pour chaque circuit (industriel, commercial ou ménager) la collecte appropriée sera mise en place. Les collectivités organisent les collectes des papiers jetés par les ménages dans les containers de couleurs jaunes ou bleues.

Etape 3 – Recyclage et revalorization:

a. Pulpage et défibrage

Cette première étape implique : L'introduction de tous les produits en papier et/ou en carton usés collectés, soit dans un pulpeur (c'est une cuve cylindrique où un rotor crée des turbulences intenses qui fragmentent les produits papiers-cartons récupérés). Grâce à des équipements

Chapitre 02 : Recyclage de papier

spécifiques (comme la poire à pulpeur ou les sacs de décontamination), une première séparation des contaminants du pulpeur est réalisée, que ce soit dans un tambour tournant et légèrement incliné, ce qui facilite l'élimination des résidus non désirés (plastiques, CD-Rom, détritres, etc.). L'étape suivante consiste à les saturer d'eau, puis à les agiter pour fragmenter les fibres de cellulose. Grâce à ce mélange, les produits résiduels que l'on pourrait y déceler sont séparés de la masse. Les fibres sont désormais prêtes pour le processus de purification. [51]

b. Epuration

Après la pulpeuse ou du tambour, une pré-épuration permet de se débarrasser des impuretés de grande taille par le biais de tamis vibrants, de séparateurs à fentes et à perforations et d'épérateurs centrifuges. L'épuration fine affine ce processus et permet de retirer les impuretés résiduelles en fonction de leur densité (à l'aide de cyclones) ou de leur taille (par un classement très précis). Même après un défibrage rigoureux des papiers-cartons imprimés, suivi d'une purification minutieuse, on ne parvient qu'à obtenir une pâte de couleur grise, plus ou moins sombre. L'emploi de cette pâte pour produire certains types de papiers (papiers graphiques, papiers sanitaires blancs) n'est réalisable qu'en retirant la couleur causée par l'encre. [51]

c. Désencrage par flottation

Pour désencrer un papier il est nécessaire dans un premier temps de décrocher les particules d'encres. Ce décrochage est facilité lors de l'étape de défibrage. On agit pour cela sur différents paramètres : [57]

- La quantité et la nature des produits chimiques ajoutés (voir ci-après) ;
- Le pH ;
- La température ;
- Le temps de contact ;
- etc.

Les produits chimiques intervenant dans le désencrage de la pâte à papier sont les suivants : [57]

- La soude caustique est employée pour améliorer le détachement de l'encre en élevant le pH et en faisant gonfler les fibres ;

- Un surfactant permet de stabiliser les particules d'encre décrochées en solution et empêche qu'elles soient redéposées sur les fibres ;

- Le silicate de sodium séquestre certains ions métalliques présents dans l'eau (essentiellement les ions calcium et magnésium). En l'absence de ce produit, les ions métalliques formeraient des dépôts insolubles en réagissant avec le surfactant-

- Le peroxyde d'hydrogène et un agent séquestrant sont utilisés pour maintenir un niveau de blancheur de la pâte. Celle-ci a tendance à jaunir du fait de l'action de la soude caustique sur la lignine. Le peroxyde d'hydrogène est un agent de blanchiment qui peut

se décomposer sous l'action de métaux lourds en composés inutilisables pour le blanchiment. Un agent séquestrant est alors utilisé afin de capter les métaux lourds présents dans l'eau.

Chapitre 02 : Recyclage de papier

La principale technique utilisée pour la phase d'élimination de l'encre est le procédé par flottation. Le procédé repose sur les différences physiques et physico-chimiques superficielles des fibres et des particules d'encre. La suspension fibreuse est envoyée dans une succession de cellules à la base desquelles des bulles d'air sont injectées. En montant à la surface, ces bulles d'air se chargent des particules d'encres, séparées des fibres, qui se concentrent sous forme de mousses à la surface des cellules. Ces mousses sont raclées, aspirées puis évacuées vers l'installation de traitement des boues de l'usine

Ces boues peuvent être récupérées et transformées en un amendement calcique pour les terres agricoles. Ces dernières contiennent une forte concentration en calcium issue des matériaux ajoutés pour rehausser la blancheur et les propriétés d'impression du papier. Ce sous-produit est valorisé par l'industrie papetière qui le met sur le marché pour satisfaire en partie les exigences de l'agriculture.

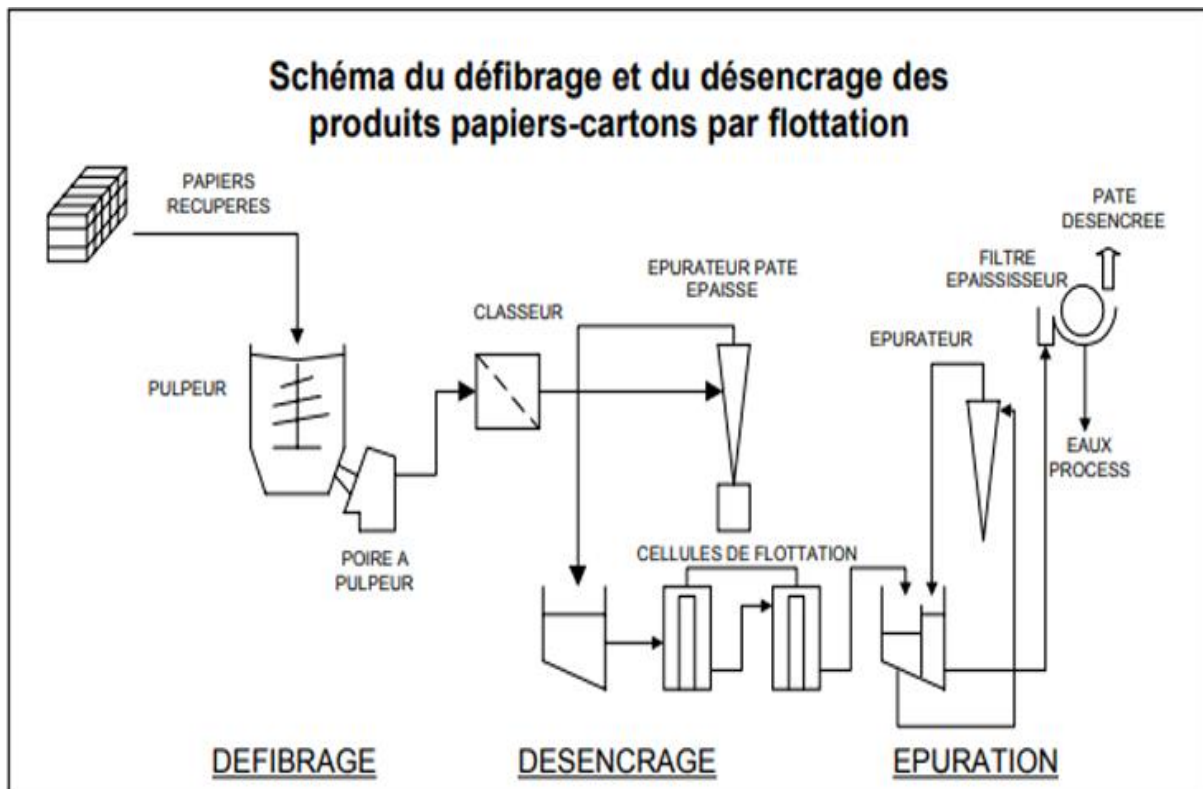


Figure II-4: Désencrage des produits papiers. [58]

I.1.5 Objectifs du recyclage de papier

Le recyclage revêt une importance capitale dans la protection de l'environnement et la préservation des ressources naturelles. [56] [60]

I.1.5.1 Réduction de la pollution

Le recyclage contribue à diminuer le volume de déchets destiné aux décharges ou à l'incinération. Cela aide à protéger l'eau, l'air et les sols, tout en empêchant l'émission de gaz à effet de serre nuisibles. [56] [60]

I.1.5.2 Économie d'énergie

En réutilisant les matériaux, on prévient la nécessité d'extraire, de traiter et de déplacer de nouvelles ressources. Cela offre la possibilité de faire d'importantes économies en matière d'énergie tout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre liées à ces procédures. [56] [60]

I.1.5.3 Conservation des ressources naturelles

Le recyclage a pour but de récupérer les matériaux de valeur contenus dans les produits obsolètes, comme les métaux, le papier et le plastique. En les réemployant, on diminue le besoin de puiser de nouvelles ressources, préservant de ce fait les écosystèmes et réduisant la détérioration de l'environnement.

Il faut l'équivalent de 17 arbres, 20 000 litres d'eau et environ 1 000 litres de pétrole pour produire une tonne de papier vierge. [56] [60]

I.1.5.4 Création d'emplois

Le secteur du recyclage génère une multitude de postes dans les domaines de la collecte, du tri, du traitement et de la conversion des déchets. Ceci contribue à l'expansion économique et au développement durable.

Le recyclage est un outil essentiel pour gérer les déchets de façon responsable et durable.

En saisissant sa signification et son enjeu, nous avons la possibilité de participer à la protection de l'environnement, à la diminution de la pollution et à l'exploitation optimale des ressources. [56] [60]

**ETUDE DE
VALORISAT
ION DES
TEXTILES
USES EN
PAPIER**

II.1.1 Introduction

À travers les âges, les morceaux de tissu ont été utilisés pour la production du papier et il serait erroné de croire que c'est le Moyen Âge occidental qui en est l'inventeur. Par conséquent, les premiers papiers chinois, qui datent d'environ 200 ans avant J-C, présentent notamment des marques de chiffons.

Dans quelques siècles, ce sera également le cas pour les papiers arabes.

Cependant, ce sont les avancées technologiques des fabricants de papier italiens qui favoriseront l'usage constant et exclusif des chiffons pour la production de papier, du XIII^e siècle jusqu'à la fin du XIX^e siècle. On utilisera alors les fibres de lin et de chanvre Et quelques autres herbes.

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, le papier à base de chiffon sera remplacé par le papier en bois, suite à une demande grandissante de papier entraînant de sérieuses pénuries de chiffons. [61]

II.1.2 Les matières éligibles pour être transformées en papier artisanal

Seuls les tissus « chiffons » composés de fibres naturelles telles que le chanvre, le coton et le lin peuvent être convertis en papier fait main.[62]

II.1.3 La préparation des vieux tissus ou chiffons

La production de papier, qui a évolué en fonction de l'époque et du lieu, a longtemps suivi les mêmes phases.

Historiquement, la production de papier reposait sur l'utilisation de chiffons comme matière première. Ainsi, la première phase impliquait le rassemblement de chiffons. Cependant, avant d'être transformés en papier, les chiffons nécessitaient plusieurs traitements. [63]

II.1.3.1 Le triage

Les chiffons sont classés selon leurs fibres, leur qualité (usés, fins, gros, neufs, résistance...), et aussi en fonction de leurs couleurs. Ce classement permettra au papetier de les utiliser de manière différente en fonction des productions désirées.

II.1.3.2 Le lissage

Cette procédure vise à éliminer tout élément indésirable comme les boutons et épingles susceptibles de représenter un danger pour les opérations ultérieures, ainsi que les coutures et ourlets excessivement épais qui constitueront une catégorie spécifique de matière première.

II.1.3.3 Le découpage

Les tissus seront continuellement découpés en petits morceaux de quelques centimètres, plus ou moins réguliers. Ici, on les désigne sous le nom de « pétassous ». Ce sont eux qui, par la

suite, seront réduits en morceaux par la machine pour produire la pâte à papier. Ces deux dernières phases décident de la transition des tissus vers le « dérompoir ».

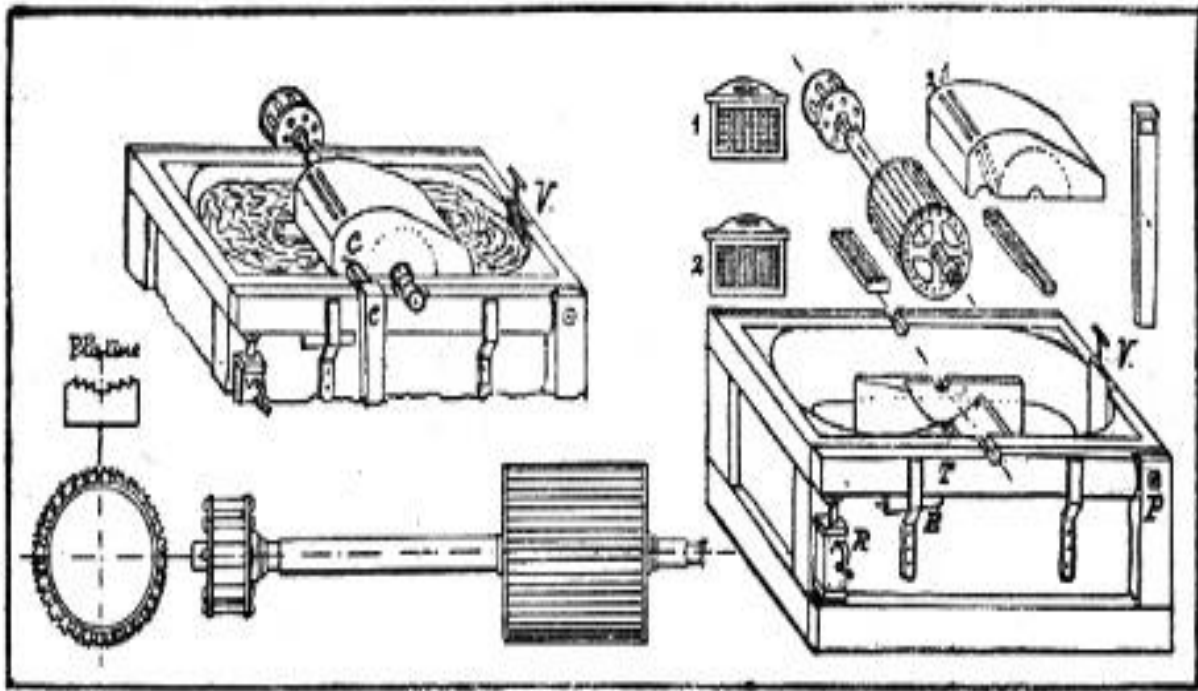
II.1.4 La préparation de la pâte à papier

Auparavant, ces étoffes étaient exposées à un processus de pourrissement pendant quelques semaines pour détendre les fibres. Cette procédure n'est plus effectuée de nos jours. On vous a formé sur des données jusqu'en octobre 2023. [64] [65]

Suite au passage au dérompoir, les tissus minutieusement tranchés étaient soumis à un traitement mécanique intensif dans des cuves ovoïdes désignées sous le nom de « piles 45 ». Ces derniers contiennent de l'eau où se déchaînent des maillets aigus. Les chiffons sont démembrés après 24 à 36 heures, produisant une pâte plutôt rudimentaire.

Pour la perfectionner, on l'utilise dans une autre sorte de pile appelée « pile hollandaise ». Ce dispositif, conçu aux Pays-Bas au XVIII^e siècle, présente l'avantage d'éliminer le pourrissage. La pile hollandaise est un récipient en fonte de forme ovale où un cylindre équipé de lames brise la chiffe pendant une heure et demie, tout en garantissant un mouvement d'eau. Cette innovation constitue une avancée, car elle élimine non seulement le processus de pourrissage, mais elle donne également lieu à un papier plus fin et plus lisse.

Pour donner une idée, 4 marteaux peuvent exécuter 700 frappes par minute, tandis que la pile hollandaise peut atteindre entre 50 et 100 000 coupes de lame à la minute !



Premier type de Pile Hollandaise.

Figure II-5: Schéma d'une pile hollandaise. [66]

II.1.4.1 Le principe de la pile hollandaise

Initialement, nous remplissons la pile hollandaise avec de l'eau au pH neutre afin d'assurer une qualité et une conservation optimales du papier. On peut alors remplir progressivement la pile hollandaise, en ajoutant les pétassous dans le réservoir de manière uniforme. Il est indispensable que tous les « pétassous » soient périodiquement soumis aux lames du cylindre pour garantir une exécution précise de la première phase, « le défilage ». La durée de cette intervention varie considérablement selon la qualité du tissu.

Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023.

Le processus suit avec le défilage et le raffinage de la pâte à papier, tandis que le cylindre est continuellement descendu pour traiter adéquatement le mélange jusqu'à l'obtention de la pâte à papier souhaitée. Dans un laps de temps de quelques heures, la pâte à papier est prête !

Les compositions de pâte à papier et les temps requis pour sa production diffèrent d'un lot à l'autre.

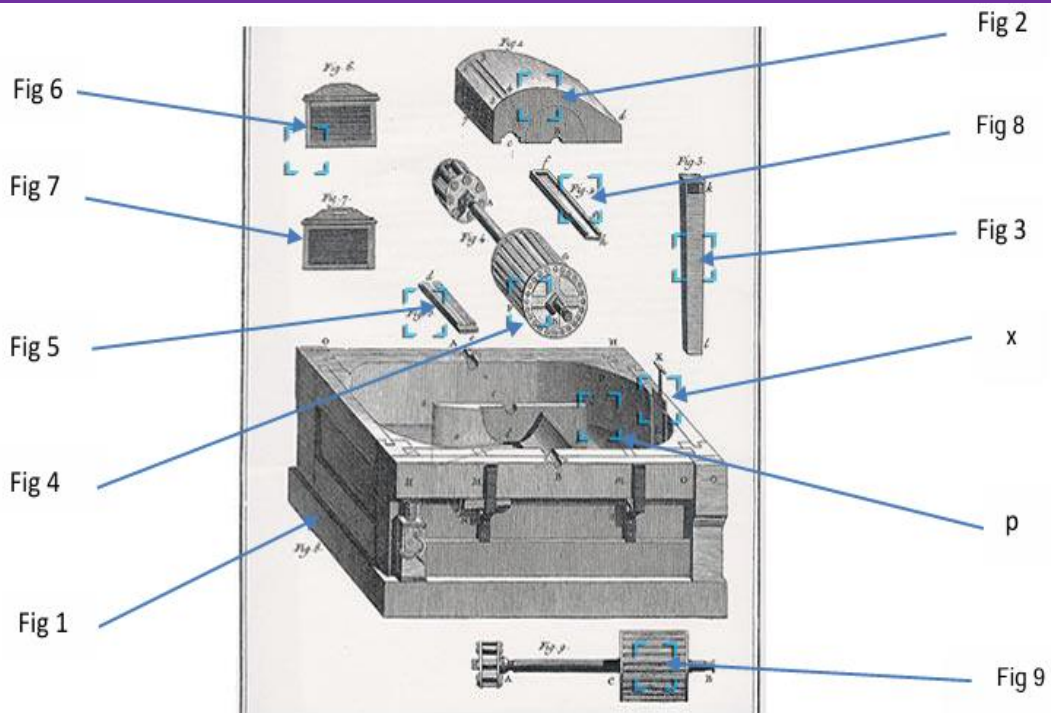


Figure II-6: Détail d'une pile hollandaise ancienne. [67]

Les figures représentent :

- 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
- Fig. 10 : partie amovible permettant de vider la cuve

Chaque cuve cylindrique est entièrement recouverte à l'intérieur, le renfort de la cloison, la face extérieure de la cuve et les plans inclinés par des lames de laiton soudées entre elles et fixées par des clous au bois de la cuve. Au fond, on trouve une platine cannelée. Le processus

de déchiquetage et d'affinage s'effectue entre les dents de cette platine et les lames du cylindre. Une cloison divise la cuve en son milieu.

II.1.4.2 La mise en forme

La pâte est extraite d'un moule qui imprime son motif sur la feuille. Une forme à papier est une structure rectangulaire en bois traversée, du côté le plus court, par des lames de bois de forme triangulaire, nommés pontuseaux. Sur ces plaques, des fils de laiton ou de bronze qui sont installés parallèlement au côté principal par le biais de chaînettes (fils extrêmement fins en laiton) : ce sont les vergeures.

Ces fils constituent une sorte de filtre qui retient la pâte à papier tout en permettant à l'eau de passer.

Cette forme est enrichie par un châssis amovible en bois, connu sous le nom de couverte, qui s'adapte à celle-ci et dont la hauteur définit le volume de pâte à papier extrait, et par conséquent l'épaisseur de la feuille produite. La forme est par la suite plongée dans la cuve et elle en ressort, chargée de pâte qui est ensuite répartie sur l'ensemble de la surface, secouée de manière horizontale dans un mouvement de balancement semblable à une tamisassions. L'eau passe à travers la structure et les fibrilles de cellulose présentes dans les fibres textiles commencent à se mêler.

On inverse la forme pour placer la feuille sur un feutre prévu pour la distinguer de la feuille antérieure, et ce, de manière continue. Ensuite, la pile de feuilles et de feutres est mise sous une presse à vis pour retirer le surplus d'eau. Cela favorisera l'association des fibrilles pour constituer la feuille. Suite à cette étape d'essorage, les feuilles sont détachées des feutres, puis, même humide, elles subissent une pression avant d'être suspendues sur des cordes dans les séchoirs pour sécher. [68]

II.1.4.3 Le séchage de la feuille

Les feuilles sont par la suite acheminées vers une salle spécifique, dénommée « l'étendoir », pour leur séchage. Tenues en place par des pinces, elles sont suspendues dans l'air et, selon la saison, le temps de séchage peut varier de deux à sept jours. Ce processus peut être facilité par des volets qui aident à diriger le flux d'air et à intensifier ses effets. [68]

II.1.4.4 L'encollage

Un dernier traitement est nécessaire, car la surface de la feuille reste trop irrégulière. Le papier est ensuite soumis à un second traitement, appelé « encollage ». En effet, la colle fusionne les fibres, renforçant ainsi la solidité de la feuille tout en lui conférant une surface plus lisse. Enfin, le polissage ou lissage à l'aide de la pierre ponce élimine les dernières irrégularités ou aspérités présentes à la surface de la feuille. Une fois mouillées et mises en presse (afin de répartir la colle de manière uniforme), les feuilles qui ont été encollées et essorées retournent à l'étendoir pour un deuxième séchage. [68]

Partie II: étude expérimentale



**Chapitre 03:
Etude
Expérimentale**

III. Valorisation de papier recyclé en nouvelles pâtes à papier

III.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le papier, l'un des matériaux les plus aisément recyclables, se voit donner une nouvelle vie grâce à ce processus. Le fait de jeter les papiers usagés dans une poubelle standard implique qu'ils seront soit incinérés, soit enterrés. En d'autres termes, il sera indispensable de payer pour éliminer une matière première susceptible d'être recyclée.

Le recyclage du papier, tout comme celui du carton et du bois, joue un rôle essentiel dans la préservation de nos forêts et de nos ressources globalement. En effet, la fabrication de papier recyclé est davantage en faveur de l'environnement que celle du papier entièrement conçu à partir de bois. De plus, le processus de recyclage du papier ne génère que peu de déchets, car 100 g de papier usé donne naissance à 90 g de papier neuf.

Dans le cadre de cette étude, nous visons à élaborer une nouvelle pâte à papier à partir de papier recyclé et effectuerons des essais pour la production de feuilles. Ainsi, nous allons adopter une approche manuelle qui respecte l'environnement. En d'autres mots, aucun composé chimique ne sera employé, de la fabrication de la pâte à la réalisation de la feuille de papier.

III.2. PREPARATION DE LA PATE

III.2.1. Collecte et tri de la matière première

Le démarrage du processus de recyclage à la main implique la collecte et le tri des matières premières, principalement composées de papiers usagés devenus non réutilisables. Cette liste englobe des pages de cahiers anciens, des journaux, des magazines, des documents imprimés et des emballages en carton léger.

Une fois collectées, ces matières sont soigneusement triées afin d'éliminer les impuretés susceptibles d'altérer la qualité du papier recyclé. Ce tri comprend :

- La séparation du papier blanc et du papier coloré.
- L'exclusion des papiers souillés par des graisses ou des colles.
- Le retrait des agrafes, plastiques, rubans adhésifs ou tout éléments non papier.

Cette phase est cruciale pour obtenir une pâte à papier pure et un produit final de haute qualité.

III.2.2. Préparation de la pâte

Une fois les matières premières rassemblées et classées, on aborde la confection de la pâte, une phase déterminante du procédé de recyclage à la main. On commence par réduire manuellement le papier en petites pièces, idéalement de moins de 5 centimètres, afin de simplifier les étapes ultérieures.



Figure III-1: Papier en morceau

Les morceaux sont ensuite placés dans un récipient rempli d'eau et laissés à tremper pendant 6 à 24 heures, selon la nature du papier et sa rigidité. Le trempage permet d'assouplir les fibres et de faciliter leur désintégration.

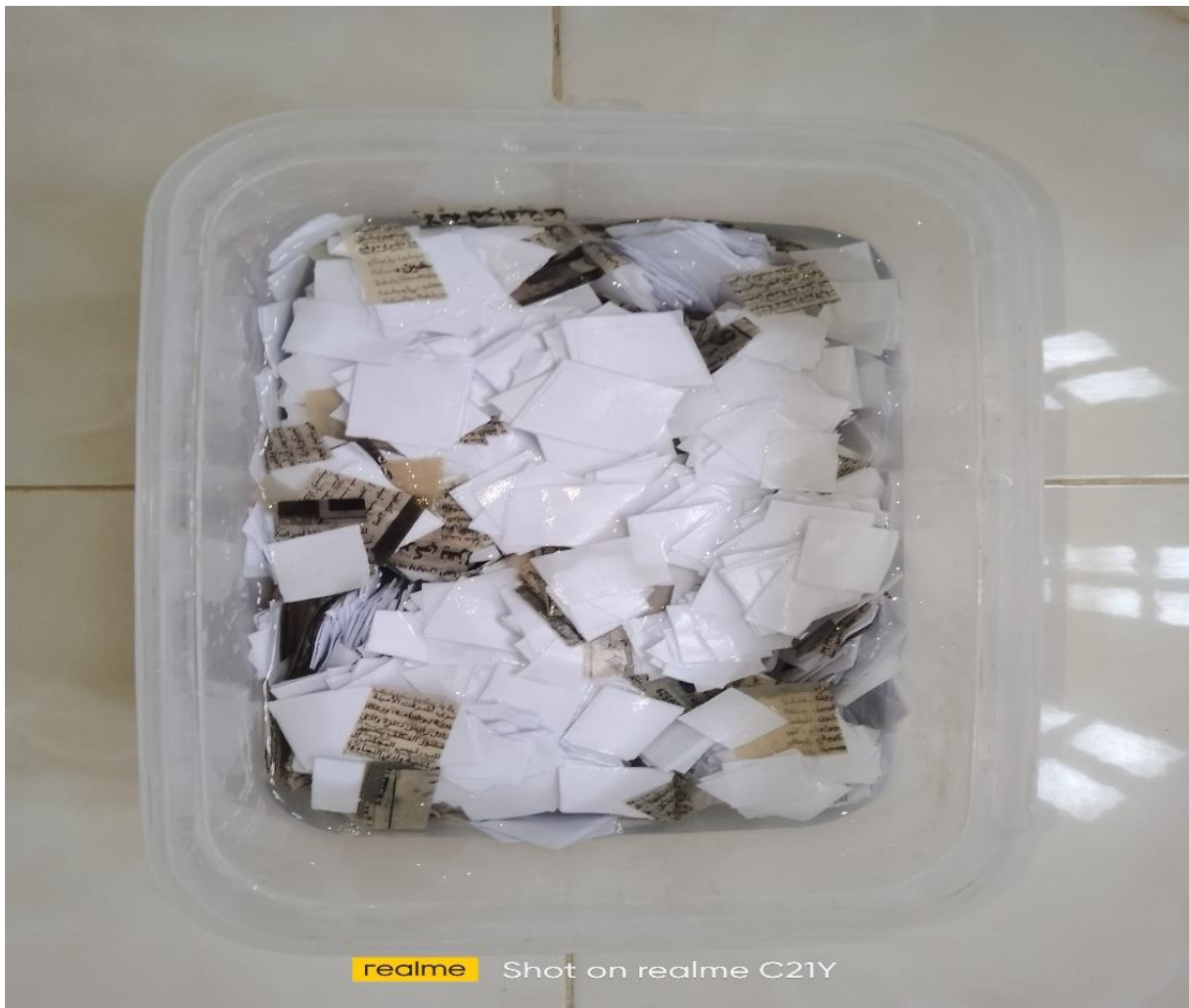


Figure III-2: Le trempage du papier

Après trempage, les morceaux sont mixés dans un blender avec de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et lisse. Si aucun mixeur n'est disponible, on peut écraser manuellement les fibres à l'aide d'un outil ou à la main, bien que cela demande plus d'effort.



Figure III-3: Bouillie de papier

III.3. TRANSFORMATION DE LA NOUVELLE PÂTE EN PAPIER RECYCLE EN PAPIER

Suite à la préparation de la pâte à papier, on entame l'étape de formation de la feuille. C'est un processus manuel qui requiert des instruments basiques tels qu'un cadre en bois équipé d'un tamis fin ou d'un tissu étiré.

On verse une quantité adéquate de pâte dans un récipient qui renferme un peu d'eau. On immerge ensuite le cadre de manière horizontale dans le mélange pour obtenir une couche uniforme de pâte.



Figure III-4: Immerger la pâte



Figure III-5: Former la pâte

Après avoir retiré le cadre, on le laisse s'égoutter quelques instants pour éliminer l'eau en excès. Ensuite, on retourne le cadre sur un tissu absorbant ou une serviette, et on appuie doucement pour faire sortir un maximum d'eau.



Figure III-6: Égoutter l'excédent d'eau de la pâte

La feuille ainsi formée est ensuite recouverte d'un autre tissu et laissée à sécher à l'air libre ou au soleil pendant plusieurs heures, selon les conditions climatiques. L'usage d'une éponge peut aider à absorber l'humidité plus rapidement.

Une fois la feuille complètement sèche, elle est délicatement décollée du tissu ou du tamis. On peut la lisser à l'aide d'un fer tiède pour améliorer son aspect.



Figure III-7: Retirez l'eau restante



Figure III-8: Sécher le papier

- Pour le séchage solaire, les feuilles ont été placées dans un endroit bien ventilé et exposé à la lumière du jour, mais à l'abri des rayons directs du soleil, afin d'éviter toute fissuration ou déformation causée par un chaleur excessive. La température ambiante idéal se situe entre 25 et 35 °c, permettant une évaporation progressive sans nuire à la cohésion des fibres.
- Dans le cas de l'utilisation du fer à repasser, la température a été réglée à moins de 50 °c, en plaçant un tissu fin entre le papier et la semelle du fer pour éviter la brûlure des fibres ou l'adhérence du papier. Cette méthode est employée uniquement après un séchage partiel à l'air, afin d'accélérer la fin du processus.

Ainsi, la feuille de papier recyclé est désormais prête à être utilisée pour diverses applications telles que l'écriture, l'impression manuelle ou les travaux manuels.

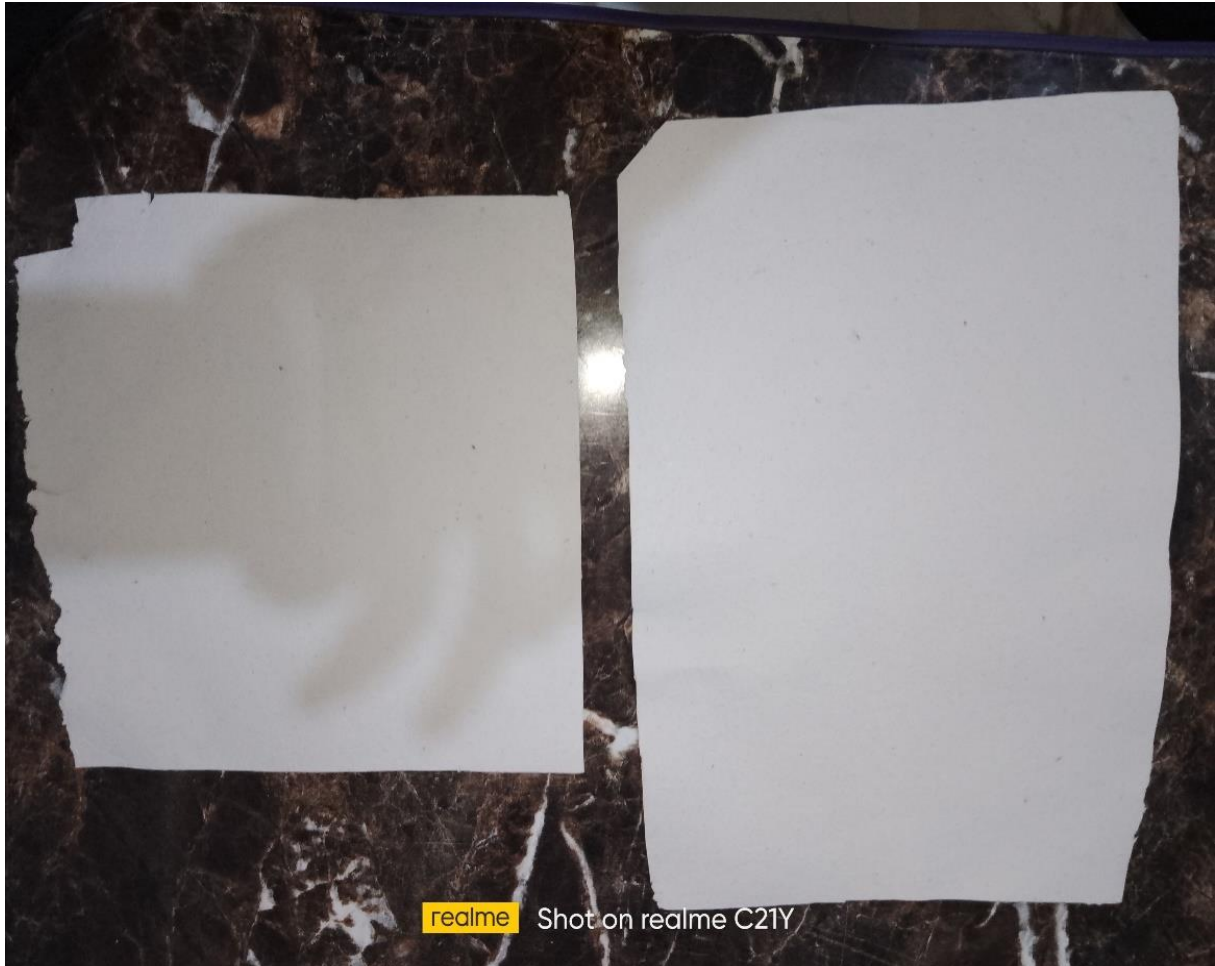


Figure III-9: Papier prêt

III.4. DISCUSSION SUR LES PRODUITS OBTENUS

Suite à l'achèvement de toutes les étapes du processus de recyclage manuel, des feuilles de papier ont été créées, présentant une apparence différente du papier industriel conventionnel. Ces feuilles ont une surface plutôt rugueuse et une épaisseur qui peut fluctuer, en raison du processus de production artisanal et de la répartition irrégulière de la pâte.

En termes d'esthétique, les feuilles présentent un aspect naturel et artistique, ce qui les rend parfaites pour la décoration, les projets DIY ou les cartes artisanales. Sur le plan pratique,

elles autorisent l'utilisation d'un stylo à bille ou d'un crayon, malgré leur capacité d'absorption élevée qui pourrait causer des soucis avec les encres liquides ou les impressions.

L'expérience montre que plusieurs facteurs influencent la qualité du papier : le type de matières premières employées, la durée d'immersion, la méthode de mélange et le niveau de séchage. On peut aussi moduler l'épaisseur de la feuille en fonction de la quantité de pâte étalée sur le cadre.

Dans l'ensemble, cette méthode s'est révélée efficace pour produire un papier écoresponsable de remplacement. Bien qu'il ne rivalise pas avec le papier industriel en termes de douceur ou d'uniformité, il a une grande importance d'un point de vue éducatif et écologique.

IV. Essai de valorisation de textile usés en papier

IV.1. But de l'étude

L'objectif de cette recherche est d'explorer la possibilité d'améliorer le recyclage manuel du papier usagé en intégrant la plante halfa (esparto), une ressource végétale naturelle riche en fibres cellulosiques. L'objectif de l'expérience consiste à mesurer l'impact de cette association sur la qualité du papier produit, notamment en ce qui concerne la cohésion, la résistance, l'uniformité et d'autres caractéristiques physiques.

Cette étude est cruciale en raison de l'impératif urgent de trouver des solutions écologiques pour diminuer l'accumulation des rebuts de papier, tout en mettant en valeur des ressources renouvelables locales telles que la d'halfa, largement présente dans les régions arides. La recherche vise aussi à encourager l'emploi de plantes sauvages dans des projets durables et artisanaux, en appuyant des techniques faciles, disponibles et respectueuses de l'environnement pour la production de papier.

- **Étude des propriétés physiques et chimiques de la plante d'halfa**

La plante d'halfa (esparto) est une graminée vivace largement répandue dans les régions arides et semi-arides, notamment en Afrique du nord. Elle est appréciée pour sa richesse en fibres, ce qui la rend particulièrement adaptée à l'industrie papetière.

Parmi les propriétés physiques :

. **Longueur des fibres** : Elle varie entre 0,8 et 1,5 mm, ce qui confère au papier une bonne cohésion.

. **Couleur** : Les fibres ont une teinte jaunâtre claire, facilement blanchissable.

. **Douceur** : Moins rugueuses que les fibres de bois, elles offrent un toucher plus doux au papier.

Parmi les propriétés chimiques :

. **Cellulose** : L'halfa contient un taux élevé de cellulose (45-55 %), élément fondamental dans la fabrication du papier.

. **Hémicellulose et lignine** : Faible teneur en lignine (10-15 %), facilitant le traitement sans recourir à des agents chimiques agressifs.

. **Cendres** : Faible teneur en matières minérales, améliorant la qualité de la pâte obtenue.

Grace à ces caractéristiques, l'halfa représente une alternative intéressante et durable pour la production de papier recyclé qualité.

IV.2. PREPARATION DE LA PATE A PAPIER

IV.2.1. Tri et collecte des matières de bases

Le processus débute par la collecte des matériaux de base requis pour la production du papier recyclé, à savoir : le papier usagé et la plante d'halfa. Le papier choisi doit être non couché, en bon état et sans polluants (tels que les papiers de bureau ou les feuilles blanches), puis il doit être découpé en petits morceaux pour faciliter sa désintégration.



Figure III-10: Papier en morceau

Concernant l'esparto, aussi appelé halfa, il est collecté dans des régions naturelles où sa croissance est très répandue. On privilégie les tiges sèches et mures en raison de leur forte teneur en fibres de cellulose. Suite à la récolte, les tiges sont dépoussiérées, puis elles sont segmentées en morceaux.



Figure III-11: purifier de halfa (esparto)

IV.2.2. Préparation de la pulpe

Après avoir rassemblé les ingrédients, on procède à la préparation de la pâte. Le papier recyclé est d'abord immergé dans l'eau pendant au moins une journée pour le rendre plus souple. À la fois, les morceaux d'halfa sont soumis à une ébullition dans de l'eau chaude mélangée à une petite dose de bicarbonate de soude pendant approximativement deux heures, ce qui favorise le dégagement des fibres.



Figure III-12: Le trempage du papier



Figure III-13: Le trempage du halfa (esparto)

Par la suite, le papier adouci et les fibres d'halfa préalablement cuites sont mélangés dans un mixeur avec de l'eau jusqu'à obtenir une pâte qui servira de fondement à la création des nouvelles feuilles de papier lors des prochaines étapes.



Figure III-14: Mélanges le papier imbibé et l'halfa



Figure III-15: Pâte à papier et sparte (halfa) après mélange

IV.3. TRANSFORMATION DE LA PATE EN FEUILLE DE PAPIER

Une fois la pâte préparée, on passe à l'étape de formation des feuilles, qui repose sur une méthode artisanale simple mais efficace. Un cadre en bois recouvert d'un tamis fin est utilisé comme moule de base.



Figure III-16: Préparation du cadre métallique pour former le papier

Le cadre est plongé dans une cuve, contenant la pâte diluée dans l'eau, puis remonté délicatement en le bougeant horizontalement pour répartir la pâte uniformément. L'excès d'eau s'écoule à travers le tamis, laissant les fibres se déposer et former une feuille.



Figure III-17: Répartir la pâte uniformément sur la surface de la grille



Figure III-18: Égoutter l'excédent d'eau de la pâte

Le cadre est ensuite retourné sur un tissu absorbant ou une feutrine, et la feuille est transférée avec précaution. Une éponge est utilisée pour presser légèrement et éliminer le maximum d'eau. Cette opération est répétée pour produire plusieurs feuilles.



Figure III-19: Videz la pâte sur le torchon



Figure III-20: Retirez l'eau restante

Les feuilles sont ensuite laissées à sécher à l'air libre dans un endroit propre et ombragé, ou éventuellement séchées à l'aide d'un fer à repasser à basse température. Une fois sèches, elles sont prêtes utilisées ou analysées.

- Dans le cadre du séchage solaire, les feuilles ont été mises dans un lieu bien aéré et exposé à la lumière naturelle, tout en étant protégées des rayons solaires directs pour prévenir toute fissure ou déformation due à une chaleur trop intense. Une température ambiante optimale se trouve entre 25 et 35 °C, favorisant une évaporation graduelle sans compromettre la cohésion des fibres.

- Lors de l'emploi du fer à repasser, la température a été fixée à moins de 50 °C. Un tissu léger a été intercalé entre le papier et la semelle du fer afin d'éviter une combustion des fibres ou une adhésion du papier. On utilise cette technique uniquement suite à un séchage partiel à l'air, pour l'accélérateur la conclusion du processus.



Figure III-21: Accélérer le séchage avec un fer à repasser



Figure III-22: Le papier obtenu

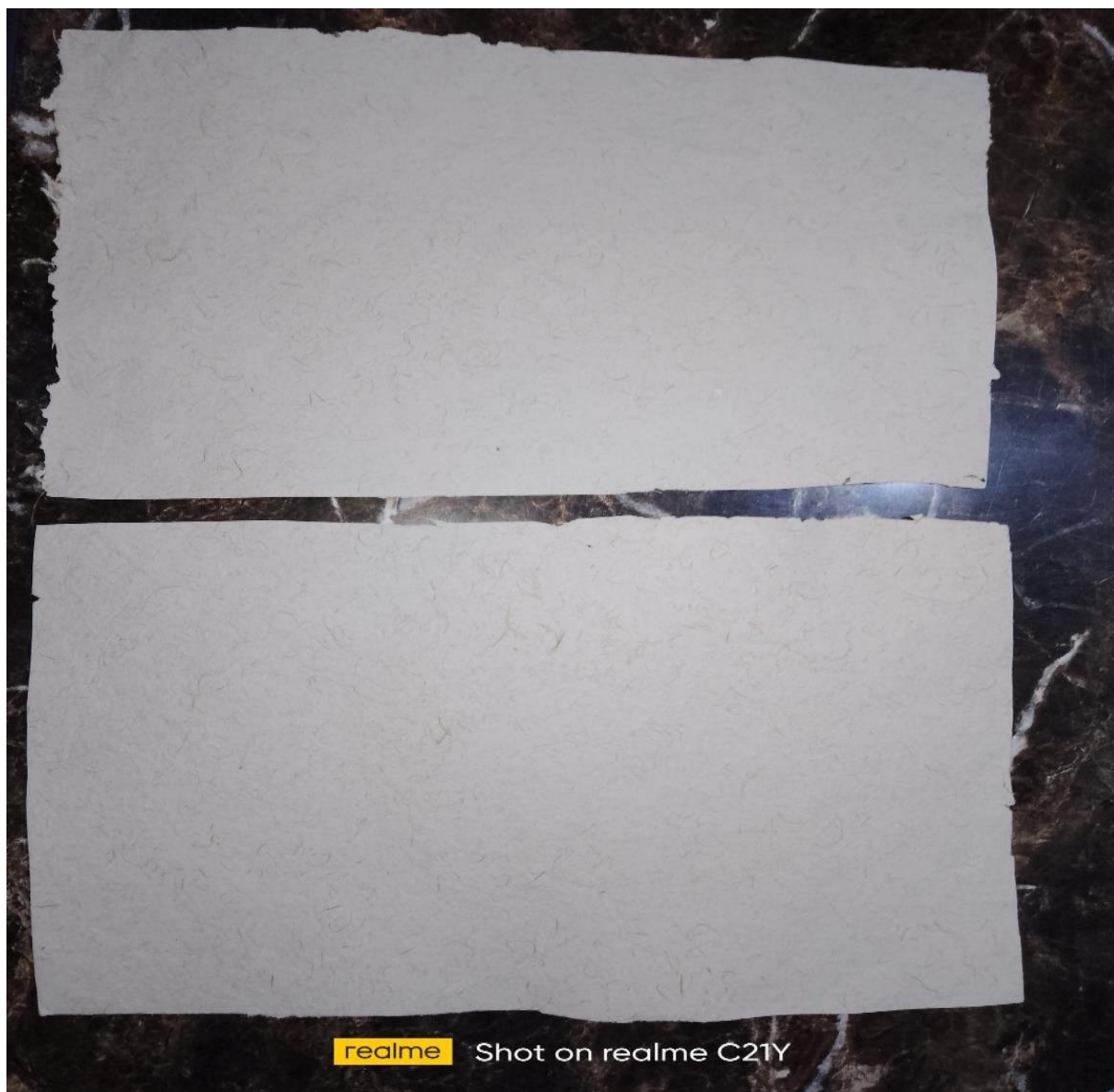


Figure III-23: Papiers prêts à l'emploi (50% papier – 50% halfa)

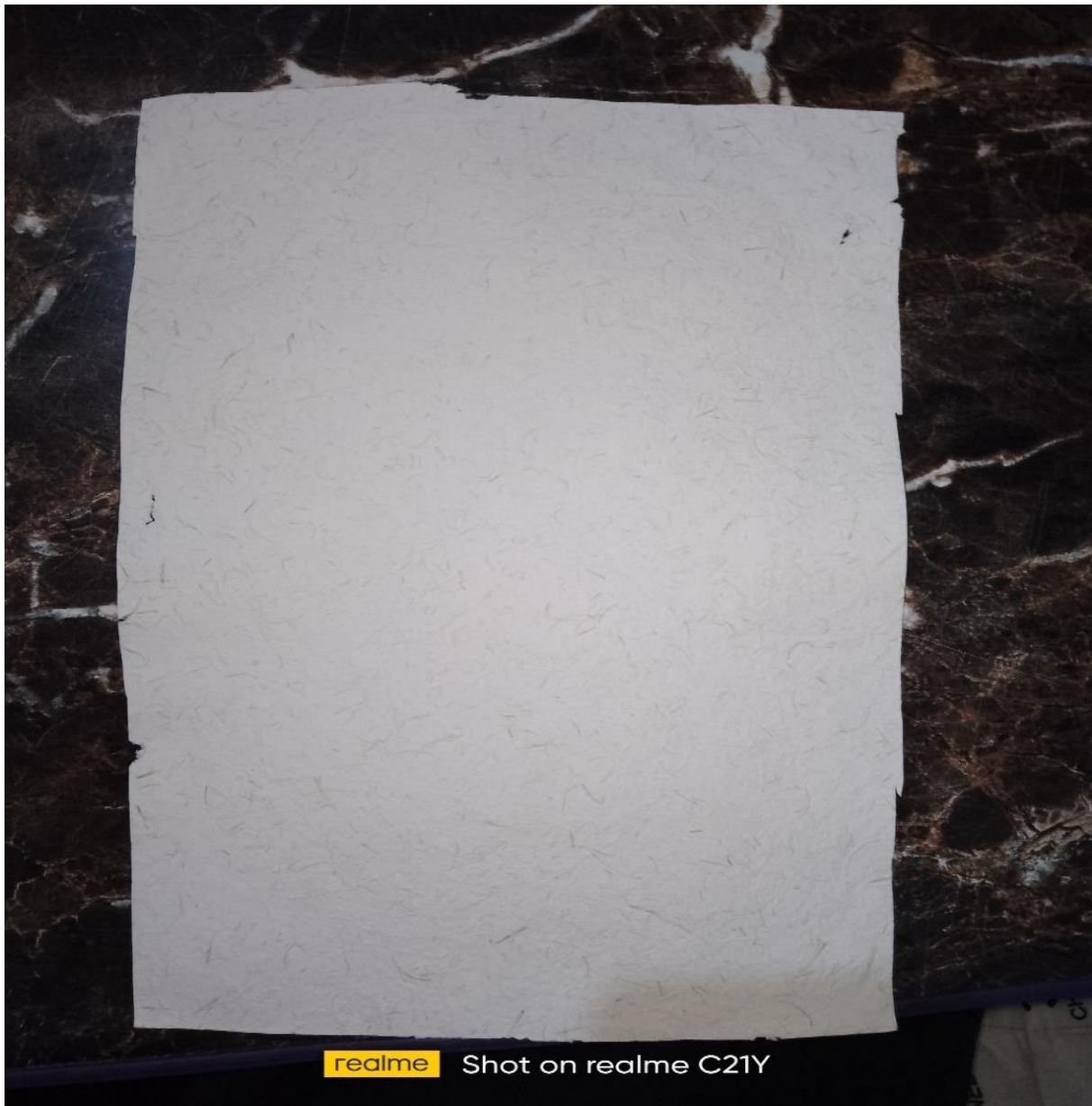


Figure III-24: Papiers prêts à l'emploi (papier > halfa)

IV.4. DISCUSSIONS SUR LES PRODUITS OBTENUS

Durant cette expérience, deux papiers ont été manuellement réalisés à partir de deux pâtes contenant des proportions distinctes de matières premières. Dans la première pâte, on utilisait des quantités équivalentes de papier recyclé et d'halfa (esparto), alors que dans la seconde, le papier recyclé prédominait sur l'halfa.

Première feuille (50 % papier ; 50 % halfa) : cette feuille présentait une couleur jaunâtre naturelle et une texture relativement rugueuse. Les fibres végétales y étaient plus visibles, témoignant de la richesse en halfa (esparto). La feuille était moins souple mais plus compacte et résistante. L'équilibre des proportions a permis d'obtenir un papier artisanal fibreux au caractère brut.

Deuxième feuille (papier 70%) > (halfa 30%) : elle avait une couleur plus claire et une texture plus douce, avec une meilleure homogénéité. Elle était plus souple et plus facile à plier, reflétant la dominance des propriétés du papier usagé.

Cependant, les fibres végétales y étaient moins visibles, ce qui pourrait affecter la solidité du papier dans certains usages.

Les résultats montrent que le pourcentage d'halfa (esparto) influence fortement les caractéristiques du papier final. Plus la proportion d'halfa est élevée, plus le papier est rigide et riche en fibres apparentes. À l'inverse, une plus grande quantité de papier usagé amélioré la souplesse mais diminue la robustesse structurelle.

Résultats et discussions

Contexte de l'essai de traction

Dans cette section de l'expérimentation, on a employé un appareil automatique de traction pour évaluer la résistance du papier recyclé sous tension. L'instrument comporte deux mâchoires : un fixe et l'autre mobile, qui impose une tension croissante sur l'échantillon jusqu'à sa rupture.

De plus, il est équipé d'un dispositif électronique de mesure exact qui consigne la force exercée et la déformation ressentie en temps réel.

Cette technique facilite l'établissement des caractéristiques mécaniques comme la résistance maximale, l'élongation et la sorte de fracture, essentielles pour juger la qualité du matériau.

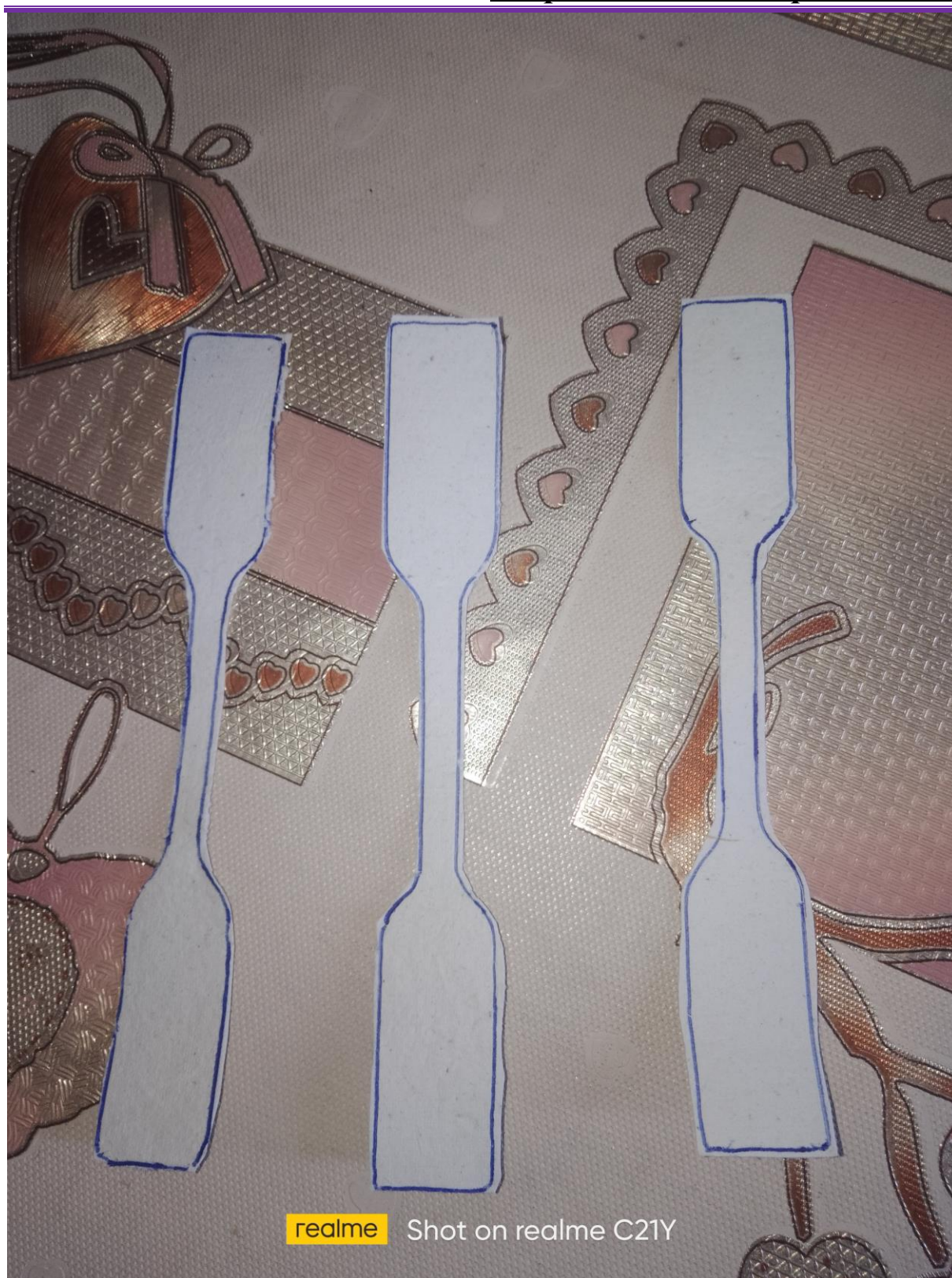


Figure III-25: La machine de test traction

La Forme d'échantillon de papier

Le spécimen a été taillé en forme d'haltère, une configuration standard pour les tests de traction des matériaux fins. Cette configuration possède deux bouts larges pour l'attachement et une zone centrale plus étroite, conçue pour résister à la tension. Cela assure une distribution homogène des tensions et diminue le danger de fracture anticipée aux points terminaux.

On a effectué le test de traction sur trois sortes d'échantillons de papier recyclé :



realme Shot on realme C21Y

Figure III-26: La forme d'échantillon (haltère)

- **Premier échantillon** : mélange papier – halfa à parts égales (50% - 50%)
- **Deuxième échantillon** : papier uniquement, sans ajout.
- **Troisième échantillon** : proportion majoritaire de papier (ex. 70% papier – 30% halfa (l'esparto))

Chaque échantillon a été fixé entre les mâchoires de la machine. La traction a été exercée à une vitesse constante de **2mm/S**, jusqu'à la rupture complète, avec enregistrement continu de la force et de l'allongement.



Figure III-27: Maintenez l'échantillon entre les mâchoires de l'appareil

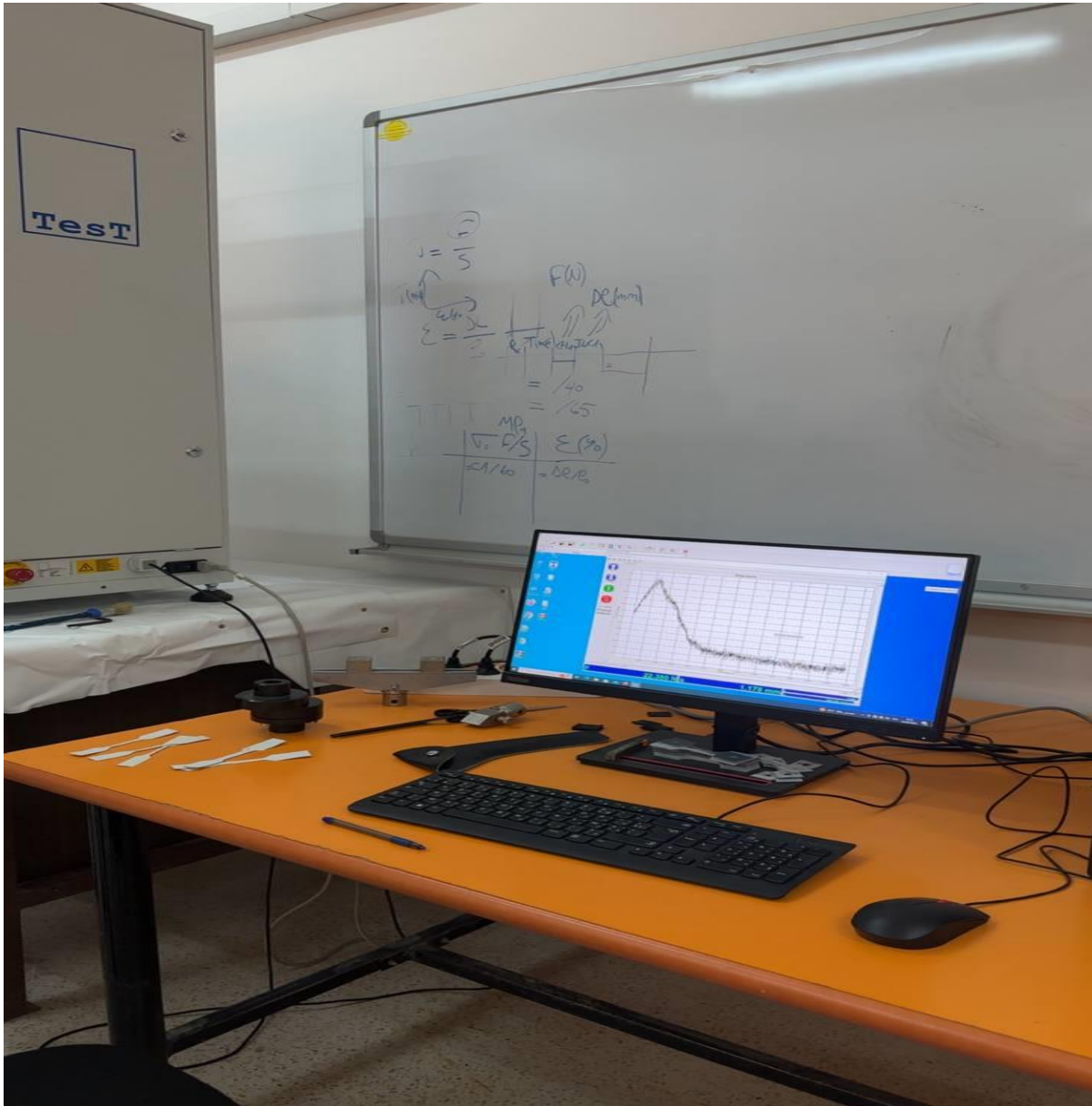


Figure III-28: Enregistrez avec précision les données pour chaque cas

Reproductibilité des résultats

Il est crucial de soumettre trois échantillons identiques à chaque type d'échantillon à un essai de traction, étant donné que les résultats peuvent varier en raison de facteurs tels qu'une distribution inégale des fibres, une épaisseur variable ou l'hétérogénéité des échantillons.

Cette approche cherche à minimiser l'impact des variations individuelles et à assurer des résultats plus précis et comparables entre les diverses formulations.

Les courbes de traction des trois exemplaires de l'échantillon équilibré (50% papier – 50% halfa) – **figure (1)** montrent une très bonne superposition, témoignant d'une homogénéité structurelle et d'une stabilité mécanique remarquable.

Les faibles écarts observés sont attribuables à des variations mineures lors de la préparation ou dans la distribution des fibres.

La même reproductibilité a été observée pour d'autres exemplaires.

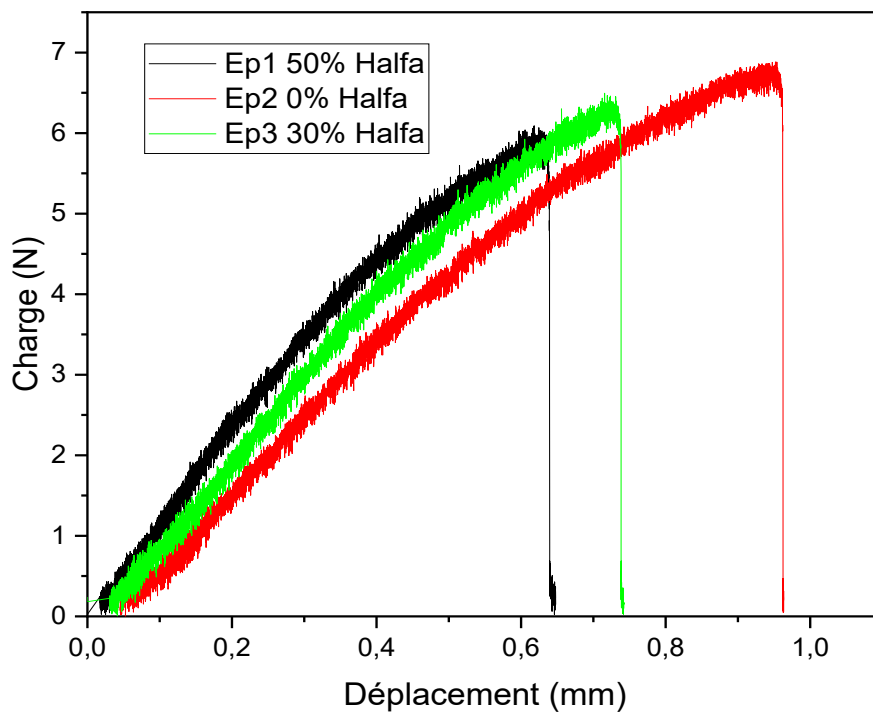


Figure III-29: courbes de traction des trois répétitions de l'échantillon équilibré (50% papier – 50%halfa)

Analyse des courbes (F - dép.)

Le graphique ci-dessous **figure 2** montre le lien entre la charge (en N) et le déplacement (en mm) pour trois types de papier recyclé, chacun bénéficiant d'une proportion distincte de fibres de halfa. Trois courbes distinctes sont observées: la première, EP1, avec 50% de halfa (courbe noire), la deuxième, EP2, comprenant 30% de halfa (courbe bleue), et la troisième, EP3, qui ne contient pas de halfa (courbe rouge).

Le modèle EP3 (0% halfa) montre une fragilité avec une résistance à la traction faible. La charge maximale enregistrée s'élève à approximativement 1,2 N, avec un mouvement extrêmement restreint avant la cassure. Ce résultat souligne la vulnérabilité du papier recyclé sans renforcement. Cependant, l'échantillon EP2 (30% halfa) montre de meilleures performances mécaniques, atteignant une charge maximale approximative de 4,5 N. Le graphique montre un équilibre entre la rigidité et la déformabilité par le biais de l'incorporation de fibres naturelles. L'échantillon EP1 (50% halfa) montre de son côté la meilleure performance générale, avec une charge maximale dépassant 6,5 N et une importante capacité de déformation avant cassure, mettant en évidence l'importance cruciale de la halfa pour le renforcement de la cohésion interne du papier.

Pour résumer, l'incorporation de fibres de halfa dans le papier recyclé améliore considérablement ses caractéristiques mécaniques, en renforçant sa résistance et sa souplesse. L'utilisation de fibres naturelles pour renforcer le papier se présente comme une solution durable et efficace dans le secteur du recyclage, ouvrant la voie à des applications requérant une plus grande résistance.

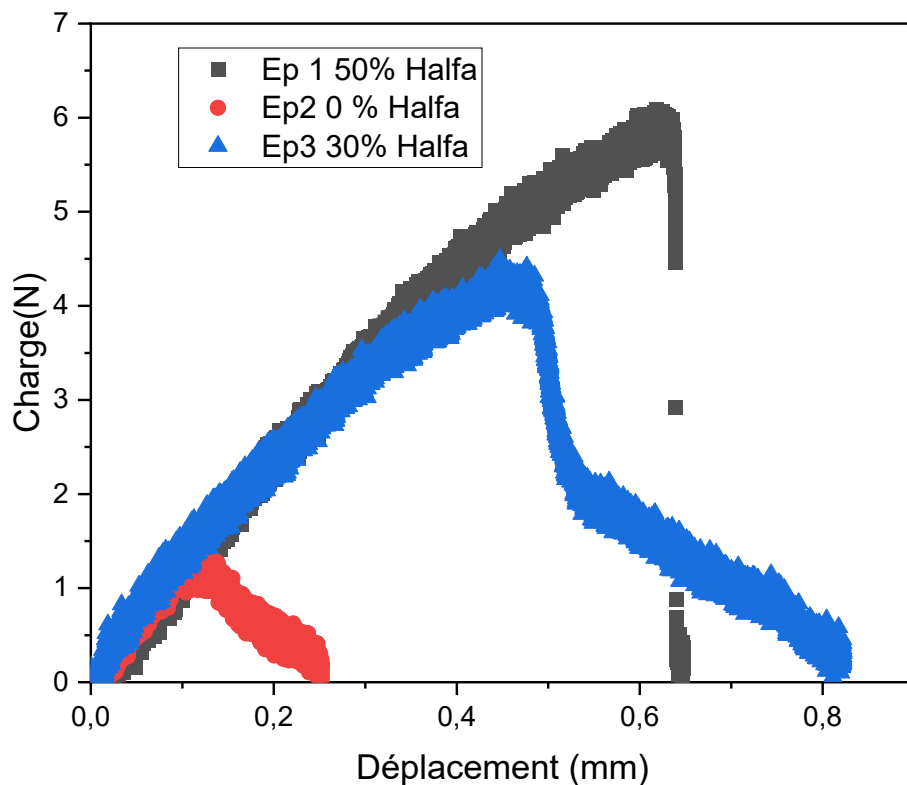


Figure III-30: la courbe charge / déplacement des échantillon renforcés par différentes proportions de halfa

Analyse des courbes (σ / ϵ)

Le graphique (**figure 3**) illustre le comportement mécanique de trois échantillons de papier recyclé soumis à un effort de traction, chacun contenant un pourcentage différent de halfa.

L'échantillon Ep1 (50% halfa) se distingue par une performance supérieure, atteignant une contrainte maximale d'environ 2,1 MPa à une déformation porche de 0,014, il affiche également le module de Young le plus élevé, soit 19770,13MPa, traduisant une grande rigidité et une excellente résistance avant rupture.

L'échantillon Ep3 (30% halfa) montre une performance intermédiaire, avec une contrainte maximale plus faible mais une déformation similaire à Ep1. Son module de Young, évalué à 15760,25MPa, reflète un compromis équilibré entre élasticité et résistance. En revanche, l'échantillon Ep2 (0% halfa) présente les résultats les plus faibles : une contrainte maximale et

une déformation réduite, accompagnées d'un module de Young minimal de 12850,16 MPa, indiquant une fragilité prononcée.

La moyenne des modules de Young est la suivante :

$$(19770,13+15760,25+12850,16)/3= 16126,84 \text{ MPa.}$$

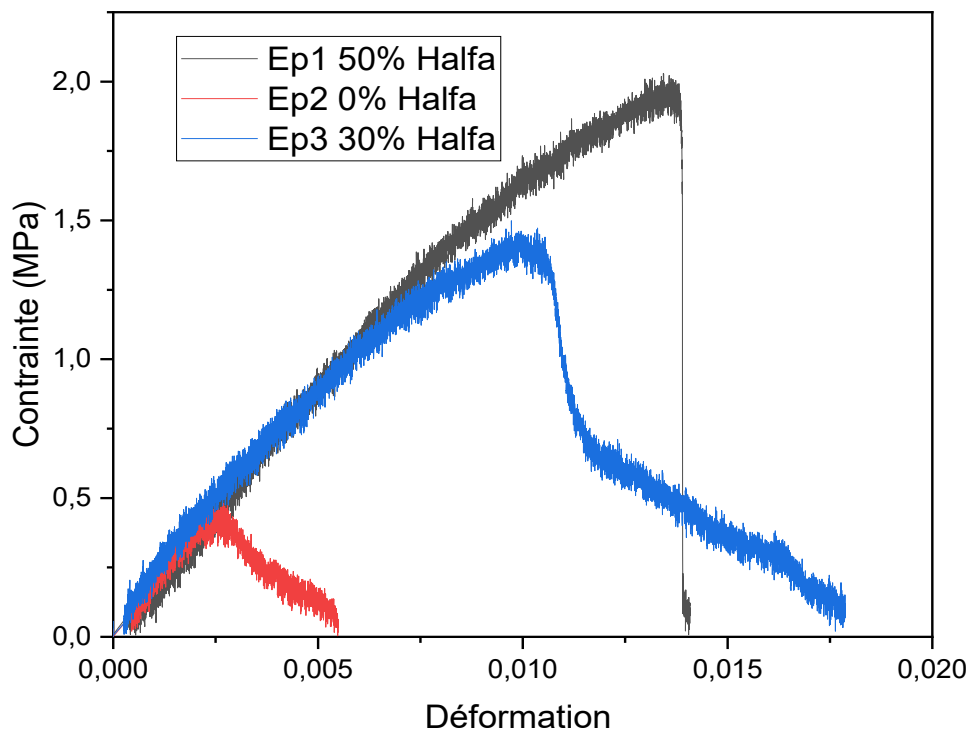


Figure III-31: relation déformation / contrainte pour des papiers recyclés renforcés avec différentes proportions de halfa

Résultat

L'examen des graphiques charge-déplacement et déformation-contrainte révèle clairement que l'ajout de la halfa au papier recyclé améliore les caractéristiques mécaniques. L'échantillon EP1 (50% halfa) a montré la plus grande charge maximale, le plus important déplacement

avant fracture, ainsi que les pics de déformation et de contrainte, démontrant une rigidité et une résistance renforcées.

L'échantillon EP3, qui contenait 30% de halfa, a présenté un comportement intermédiaire, tandis que l'échantillon EP2, qui ne contenait aucune halfa, s'est révélé être le plus fragile en raison de sa faible résistance aux charges et aux contraintes. Ce gradient de performance indique une relation directe entre la fréquence de halfa et la résistance mécanique du matériau.

Par conséquent, l'emploi de la halfa comme agent fortifiant dans le papier recyclé se révèle être une solution écologique et efficace pour accroître sa robustesse, ce qui élargit son champ d'application à des secteurs plus rigoureux.

Conclusion et Perspectives (exemple)

Le recyclage du papier représente l'une des stratégies environnementales les plus performantes pour répondre aux enjeux de la prolifération des déchets et de l'exploitation excessive des ressources naturelles. Cette étude a souligné l'opportunité d'améliorer la méthode de recyclage classique en incorporant la plante d'alfa comme matériau auxiliaire naturel. Les expérimentations ont démontré que l'incorporation de l'alfa favorise une amélioration de la qualité du papier recyclé en matière de cohésion et de résistance, ce qui le positionne comme une alternative prometteuse dans le secteur du recyclage écologique.

L'exploitation de végétaux locaux comme l'alfa ne se limite pas à offrir de nouvelles opportunités pour des secteurs économiquement viables, elle contribue aussi au renforcement des principes du développement durable et de l'économie verte. Au vu des résultats obtenus, il serait judicieux de continuer les études dans ce secteur à travers d'autres essais et d'étudier les éléments techniques et financiers en perspective d'élargir l'application de cette technique. Cela pourrait aider à poser les fondements d'un secteur de recyclage local et durable, qui respecte l'environnement et diminue la déforestation.

Bibliographie

Références bibliographiques...

- [1]. Le papier.Fr. (n.d.). Accueil. <http://www.lepapier.fr/>
- [2]. Pixartprinting. (n.d.). Histoire du papier <https://www.pixartprinting.fr/blog/histoire-du-papier/>
- [3]. Techno-science.net. (n.d.). Glossaire : Définition papier. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Papier.html>
- [4]. Wikipédia contributors. (n.d.). Format de papier. In Wikipédia. Retrieved May 24,2025, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Format_de_papier
- [5]. Association internationale des archives francophones. (n.d.). [Document pédagogique]. https://www.piaf-archives.org/sites/default/files/bulk_media/m08s2/co/m8section2_15.html
- [6]. Le papier. Fr. (n.d.). Fabrication du papier <http://www.lepapier.fr/fabrication.htm>
- [7]. ICSO Imprimerie. (n.d.). Les types de papier <https://www.imprimerie-icso.com/guides/les-types-de-papier/>
- [8]. Économie. gouv.fr. (n.d.). [Page web].
- [9]. Paprec. (n.d.). Comprendre le recyclage : tout savoir sur les matières recyclables - papiers/ cartons <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage-2/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/papiers-cartons/>
- [10]. Ordeco. (n.d.). Déchets : papiers/ cartons. <https://www.ordeco.org/dechets/papiers-cartons>
- [11]. Antalis. (n.d.). Papier d'emballage intercalaire <https://www.antalis.fr/eshop/packaging-machines-emballage/papier-d-emballage-intercalaires>
- [12]. Raja. (n.d.). Papiers d'emballage. https://www.raja.fr/calage-protection/papiers-emballage_C1430.html
- [13]. Tetra Pak. (n.d.). Packaging matériel <https://www.tetrapak.com/maghreb/solutions/packaging/packaging-material>
- [14]. Wikipédia contributors. (n.d.). Industrie papetière. In Wikipédia. Retrieved May 24, 2025, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_papeti%C3%A8re
- [15]. Techmania. (n.d.). Le papier. https://www.techmania.fr/carrefour/papier/le_papier.pdf
- [16]. Le papier.fr. (n.d.). Le papier dans votre vie. <http://www.lepapier.fr/dansvotrevie.htm>
- [17]. L'usine Nouvelle. (n.d.). Papiers spéciaux. <https://www.usinenouvelle.com/expo/papiers-speciaux-o1183.html>
- [18]. Wikipédia contributors. (n.d.). Papier toilette. In Wikipédia. Retrieved May 24, 2025, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier_toilette

- [19]. Lotus Hygiène. (n.d.). Comment utiliser du papier toilette pour une hygiène optimale. <https://www.lotushygiene.com/fr/hygiene-de-vie/hygiene-corporelle/comment-utiliser-du-papier-toilette-pour-une-hygiene-optimale/>
- [20]. Propriissimo. (n.d.). Quels sont les différents types de papiers hygiéniques ? <https://www.propriissimo.com/fr/blog/quels-sont-les-differents-types-de-papiers-hygeniques>
- [21]. EDQM. (n.d.). Essuie-tout. <https://www.edqm.eu/documents/52006/82182/essuie-tout04.pdf/8ebe4744-0bc5-5646-0292-90f7b4c72255?t=1629976784430>
- [22]. Wikipédia contributors. (n.d.). Papier. In Wikipédia. Retrieved May 24,2025, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Papier>
- [23]. Environnement. Savoir.fr. (n.d.). L’histoire d’une feuille de papier : les caractéristiques du papier. <https://environnement.savoir.fr/lhistoire-dune-feuille-de-papier-les-caracteristiques-du-papier/>
- [24]. China Paper Factory. (n.d.). Physical and mechanical properties of paper. <https://fr.chinapaperfactory.com/info/physical-and-mechanical-properties-of-paper-an-57692206.html>
- [25]. Cartlyapp. (n.d.). Impacts du papier sur l’environnement <https://cartlyapp.com/impacts-du-papier-sur-l-environnement/>
- [26]. Econotes.co. (n.d.). Quel impact environnemental pour la fabrication de papier <https://www.econotes.co/blogs/blog-econotes/quel-impact-environnemental-pour-la-fabrication-de-papier>
- [27]. Wikipédia contributors. (n.d.). Impact environnemental du papier In Wikipédia. Retrived May 24, 2025, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_environnemental_du_papier
- [28]. Econotes.co. (n.d.). Quel impact environnemental pour la fabrication de papier. <https://www.econotes.co/blogs/blog-econotes/quel-impact-environnemental-pour-la-fabrication-de-pa>
- [29]. Kunakair. (n.d.). L’impact environnemental de l’industrie papetière : de pollution à la solution <https://kunakair.com/fr/limpact-environnemental-de-lindustrie-papetiere-de-la-pollution-a-la-solution/>
- [30]. Everbal. (n.d.). Recyclage responsable avec Everbal : L’impact environnemental de l’industrie du papier. <https://everbal.eu/recyclage-responsable-avec-everbal/limpact-environnemental-de-lindustrie-du-papier/>
- [31]. WWF. (n.d.). Approvisionnement responsable papier. <https://www.wwf.fr/champs-daction/foret/approvisionnement-responsable/papier>
- [32]. FAO. (2023). Forest products statistics 2023. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d73f5de0-c7d0-4b22-bf9d-956edbd37d81/content/forest-products-statistics-2023/pulp-production-and-paper-usage.html>

- [33]. Graphiline. (n.d.). Les chiffres de la consommation et production de papiers et cartons dans le monde. <https://www.graphiline.com/article/19377/Les-chiffres-de-la-consommation-et-production-de-papiers-et-cartons-dans-le-monde>
- [34]. Coface. (n.d.). Papier – fiche secteur <https://www.coface.com/fr/actualites-economie-conseils-d-experts/tableau-de-bord-des-risques-economiques/fiches-risques-secteurs/papier>
- [35]. Yescomaper. (n.d.). The largest Pulp producers in the world <https://yescomaper.com/fr/the-largest-pulp-producers-in-the-world/>
- [36]. Planetoscope. (n.d.). Production mondiale de pâte à papier. <https://www.planetoscope.com/entreprises/1367-production-mondiale-de-pate-a-papier.html>
- [37]. Statista. (n.d.). Production de papier et de carton dans certains pays. <https://fr.statista.com/statistiques/559922/production-de-papier-et-de-carton-dans-certains-pays/>
- [38]. Ripley Believes. (n.d.). Top pulp and paper producing countries in the world. <https://fr.ripleybelieves.com/top-pulp-and-paper-producing-countries-in-world-3888>
- [39]. Natural Resources Canada. (n.d.). Coupes sélectives. <https://cfs.nrcan.gc.ca/coupes-selectives/53>
- [40]. Le papier.fr. (n.d.). C'est la vie. <http://www.lepapier.fr/cestlavie.htm>
- [41]. Statista. (n.d.). Industrie du papier en France et dans le monde. https://fr.statista.com/themes/2964/l-industrie-du-papier-en-france-et-dans-le-monde/#dossierContents__outerWrapper
- [42]. Statista. (n.d.). Consommation de papiers et cartons par pays. <https://fr.statista.com/statistiques/561233/consommation-papiers-cartons-selection-pays/>
- [43]. [Le recyclage : définition, processus, et limites - Conservation Nature](#)
- [44]. <https://le-recyclage-du-papier-55.websself.net/accueil>
- [45]. F. ZHOU, G. CHENG, B. JIANG, Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers, Applied Surface Science., 292, 806-812, 2014.
- [46]. Tristan Turlan (2015). Les déchets. paris: dunod.
- [47]. [Histoire du recyclage dans le monde – Paprec](#)
- [48]. [Tout savoir sur le papier recyclé : fabrication, utilisation et avantages - PRINTOCLOCK](#)
- [49]. [Chiffonniers, Paris. | Paris Musées](#)
- [50]. Etude de la valorisation des déchets en papiers et cartons au sein de Tonic Industrie (Approche économique, sociale et écologique) Loucif I
- [51]. Devenir des déchets papiers et carton dans la wilaya de Guelma MAAMRIA Kh \ SALAH N

- [52]. ENVIRONNEMENT ET RECYCLAGE DES DECHETS ENVIRONMENT AND RECYCLING OF WASTE S.BENSAADA,M.BENMACHICHE,M.T.BOUZIANE, H. MAZOUZ Laboratoire LARHYSS, Université de Biskra
- [53]. Des objets et des déchets loin d'être en reste Stéphanie Messal
- [54]. [Recyclage](http://recyclage-environnement.blogspot.com) recyclage-environnement.blogspot.com
- [55]. [Guide de tri | Semoctom](#)
- [56]. [Les étapes du recyclage papier : tri, collecte, recyclage et revalorisation](#)
- [57]. https://www.emse.fr/tice/uved/gidem/res/papiers_cartons.pdf?msclkid=7e167a75c0ad11e1ca78ac11908259fd0
- [58]. Source : CTP - ADEME. Energie et environnement dans l'industrie papetière. Mai 1996
- [59]. RAZAFITSALAMA Manohiniaina, « contribution à l'étude de la valorisation des déchets papiers-cartons : application à la ouate de cellulose », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'INGENIEUR MATERIAUX, université d'Antananarivo, 87p.
- [60]. RANAIVOARIVELO Mialitiana, « Contribution à la mise en place d'une pilote de valorisation des déchets cellulosiques », Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme de LICENCE EN GENIE DES PROCEDES CHIMIQUES ET INDUSTRIELS, université d'Antananarivo, 49p.
- [61]. [Page non trouvée | Papier artisanal](#)
- [62]. «Valis Clausa Moulin à papier,» [En ligne]. Available: <https://www.moulinvallisclausa.com/fr/content/8-fabrication>. [Accès le 15 Décembre 2021].
- [63]. S. Breton-Gravereau, «La fabrication manuelle du papier en Occident,» chez Matières et Formes.
- [64]. S. Breton-Gravereau, « La fabrication manuelle du papier en Occident».
- [65]. B. Bakhouch, B. Beys, D. Delattre, C. Guérin et T. Tran, «Préparation du papier,» chez Le livre de l'Antiquité à la Renaissance.
- [66]. [Le musée du papier Canson - Aux couleurs d'Alix](#)
- [67]. Extrait d'une planche de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (Archives départementales de Maine-et-Loire) www.piaf-archives.org
- [68]. HERIMANANTSOA Miora Etude de la valorisation du papier recyclé en nouvelles pâtes à papiers et essai de valorisation de textiles usés en papier