

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

Inscription N°

/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية و الكهروميكانيك
Département d'Automatique et de l'Électromécanique
Mémoire de fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine: Science et Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Thème

**Évaluation des Performances du Système De
Refroidissement par Evaporation d'Eau dans les
Régions Arides Utilisant des Fibres Naturelles**

Présenté Par:
Abdenmour BenGaid
et
Otmane Ben Dehina

Soutenu publiquement le 15/06/2024

Membres du jury:

Pr. Bahmed Daoudi	Pr	Univ-Ghardaia	Président
Dr. Abdelhakem Belaghit	MCB	Univ-Ghardaia	Examineur
Dr. Amor Bouaricha	MCA	Univ-Ghardaia	Examineur
Dr. Faris Aissaoui	MCA	Univ-Ghardaia	Encadreur

Année Universitaire : 2023/2024

Dedicace



Je dédie ce message à mes chers parents

Nos parents pour leur patience et leur amour

Soutenez-les et encouragez-les

À mes chères sœurs et frères.

À mes estimés professeurs de l'Université de Ghardaïa,

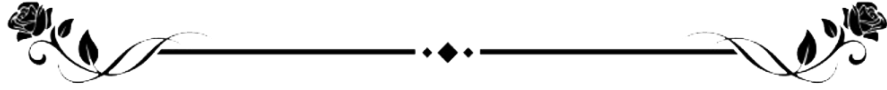
A mes chers amis

À mes amis et collègues

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin



Remerciements



ALLAH celui qui nous a aidé à atteindre ce jour

Nos Parents nous ont soutenus tout au long de ses études

Aux personnes qui ont suivi ce travail avec nous

Tous nos professeurs de l'école primaire à l'université

Tous ceux qui nous ont aidé dans cette thèse de loin ou de près



تبحث هذه المذكرة في مدى فعالية نظام التبريد بالتبخير المائي باستخدام الألياف الطبيعية في المناطق القاحلة. مع ارتفاع درجات الحرارة بسبب تغير المناخ، أصبحت أنظمة التبريد الفعالة أمرًا ضروريًا، خاصة في المناخات القاحلة حيث قد تكون طرق التبريد التقليدية غير كافية أو غير مستدامة. تتناول الدراسة استخدام الألياف الطبيعية كحل محتمل لتحسين أداء أنظمة التبريد بالتبخير. ومن خلال الاختبارات والتحليلات التجريبية، يقوم البحث بتقييم كفاءة التبريد واستهلاك الطاقة والأثر البيئي للنظام. تكشف النتائج عن نتائج واعدة، مما يدل على أن الألياف الطبيعية يمكن أن تعزز فعالية التبريد بالتبخير مع تقليل استهلاك الطاقة والبصمة البيئية. وتساهم الأطروحة برؤى قيمة حول حلول التبريد المستدامة للمناطق القاحلة، مع ما يترتب على ذلك من آثار على الاستدامة البيئية وكفاءة الطاقة.

الكلمات المفتاحية: التقييم، الأداء، الماء، نظام التبريد التبخيري، المناطق القاحلة، الألياف الطبيعية.

This thesis investigates the efficacy of a water evaporative cooling system employing natural fibers in arid regions. With rising temperatures due to climate change, efficient cooling systems are imperative, especially in arid climates where traditional cooling methods may be insufficient or unsustainable. The study examines the utilization of natural fibers as a potential solution to enhance the performance of evaporative cooling systems. Through empirical testing and analysis, the research evaluates the cooling efficiency, energy consumption, and environmental impact of the system. The findings reveal promising results, demonstrating that natural fibers can enhance evaporative cooling effectiveness while minimizing energy consumption and environmental footprint. The thesis contributes valuable insights into sustainable cooling solutions for arid regions, with implications for both environmental sustainability and energy efficiency.

Keywords : Evaluating, performance, water, evaporative cooling system, arid areas, natural fibers.

Cette mémoire étudie l'efficacité d'un système de refroidissement par évaporation d'eau utilisant des fibres naturelles dans les régions arides. En raison de la hausse des températures due au changement climatique, des systèmes de refroidissement efficaces sont impératifs, surtout dans les climats arides où les méthodes de refroidissement traditionnelles peuvent s'avérer insuffisantes ou non durables. L'étude examine l'utilisation de fibres naturelles comme solution potentielle pour améliorer les performances des systèmes de refroidissement par évaporation. Grâce à des tests et des analyses empiriques, la recherche évalue l'efficacité du refroidissement, la consommation d'énergie et l'impact environnemental du système. Les résultats révèlent des résultats prometteurs, démontrant que les fibres naturelles peuvent améliorer l'efficacité du refroidissement par évaporation tout en minimisant la consommation d'énergie et l'empreinte environnementale. Le mémoire apporte des informations précieuses sur les solutions de refroidissement durables pour les régions arides, avec des implications à la fois sur la durabilité environnementale et l'efficacité énergétique.

Mots clés : Évaluation, performance, eau, système de refroidissement par évaporation, zones arides, fibres naturelles.

Table des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Symboles

Introduction Générale..... 2

Chapitre I : Généralités sur le Système de Refroidissement

I.1. Introduction.....	5
I.2 Aperçu des systèmes de refroidissement	5
I-2-1 Types de refroidissement utilisés.....	5
I-3 État de l'Art.....	6
I-4 Système de refroidissement par évaporation.....	9
I-4-1 Définition du refroidissement par évaporation.....	9
I-4-2 Principe de fonctionnement par refroidissement par évaporation.....	9
I-4-3 Refroidissement évaporation direct.....	9
I-4-4 Refroidissement par évaporation indirect.....	10
I-4-5 Refroidissement par évaporation au point de rosée.....	11
I-4-6 Refroidissement par évaporation mixte.....	12
I-5 Importance de l'eau dans les processus de refroidissement par évaporation.....	13
I-6 Transfert de chaleur dans le processus d'évaporation de refroidissement.....	14
I-6-1 Mécanismes de transfert de chaleur.....	14
I-6-2 Chaleur latente de vaporisation.....	14
I.7 Conclusion.....	15

Chapitre II : Fibres Naturelles et Végétales et Leurs Propriétés

II.1 Introduction.....	17
II.2 Fibres Naturelles.....	17
II.2.1 Fibres Naturelles Végétales.....	18
II.2.2. Classification des Fibres Végétales.....	19
II.2.3. Structure de la fibre végétale.....	20
II.2.3.1 Structure et Composition Chimique.....	21
II.2.3.2 Propriétés des Fibres Cellulosiques	24
II.3 Avantages des fibres naturelles dans le refroidissement par évaporation.....	26
II.4 Fibres végétales utilisées dans les terres arides.....	26
II.4.1 Cotton.....	27

II.4.1.1 Propriétés chimiques du coton.....	27
II.4.1.2 Composition de la paroi cellulaire du coton.....	27
II.4.1.3 Structure de la paroi cellulaire du coton.....	28
II.4.2 Fibres de palme.....	29
II.4.2.1 Propriétés chimiques des fibres de palmier.....	29
II.4.2.2 Composition de la paroi cellulaire des fibres de palme.....	30
II.4.2.3 Structure de la paroi cellulaire des fibres de palme.....	31
II.4.3 Jute.....	32
II.4.3.1 Propriétés chimiques du Jute.....	32
II.4.3.2 Composition de la paroi cellulaire du jute.....	33
II.4.3.3 Structure de la paroi cellulaire du jute.....	34
II.5 Conclusion.....	36

Chapitre III : Montage Expérimental et Formulation Mathématique

III.1 Introduction.....	38
III.2 Description du système.....	38
III.3 Description du montage expérimental.....	39
III.4 Instrumentation.....	41
III.5 Modélisation mathématique du DEC.....	44
III.5.1 Analyse des performances du DEC.....	44
III.6 Conclusion.....	47

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Procédures et mesures expérimentales.....	49
IV.3 Analyser et Calculer Les résultats.....	52
IV.3.1 Analyse comparative de la réduction de température.....	54
IV.3.2 Analyse comparative des taux d'évaporation.....	56
IV.4 Effet du type de matériau du tampon sur la performance thermique.....	57
IV.5 Effet du débit d'air sur la performance thermique.....	58
IV.6 Chaleur absorbée par l'air pendant le processus DEC.....	58
IV.7 Conclusion.....	59
Conclusion Générale	61
Références Bibliographique	64

Liste des Figures

Figures	Page
Figure I.1: Refroidissement par évaporation de l'air via un processus d'évaporation	9
Figure I.2: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation directe	10
Figure I.3: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation indirect	11
Figure I.4: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation au point	12
Figure I.5: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation mixte	13
Figure I.6: Circuits de refroidissement	14
Figure II.1: Variétés de fibres naturelles végétales et leur provenance	18
Figure II.2: Classification des fibres végétales selon leur type et leur structure	19
Figure II.3: Microstructure des fibres naturelles : tige de lin	20
Figure II.4: Microfibrilles de cellulose dans leur matrice de lignine et hémicellulose	21
Figure II.5: Structure chimique de la cellulose	22
Figure II.6: Structure chimique d'une classe des hémicelluloses	23
Figure II.7 : (a) Structure de la lignine (b) alcools primaires de la lignine	24
Figure II.8 : Propriétés chimiques du coton	27
Figure II.9 : Structure physique de la fibre de coton	28
Figure II.10 : Une fibre de palmier avec sa gaine et un petit morceau de gaine	29
Figure II.11 : (a) Le mécanisme par lequel les fibres sont séparées lors de la fibrillation mécanique et (b) un diagramme de la structure des fibres naturelles, (c) une fibre de palme avec des liaisons chimiques	30
Figure II.12 : Schéma de composition chimique de la surface des fibres de palme	31
Figure II.13 : Propriétés et structure d'une plante de jute et fibre de jute	33
Figure II.14 : Structure chimique de l'alpha cellulose	33
Figure II.15 : Structure chimique de l'hémicellulose	34
Figure II.16 : microscopique (coupe transversale et longitudinale) de la fibre de jute	35
Figure II.17 : microscopique (coupe transversale et longitudinale) de la fibre de jute	35
Figure III.1 : Schéma de la configuration expérimentale DEC	38
Figure III.2 : Une image de la plateforme du système DEC et de ses composants	39
Figure III.3 : Matériaux utilisés dans les modules de coussinets	40
Figure IV.1 : Réduire la température grâce aux trois fibres naturelles	55
Figure IV.2 : Quantité d'eau évaporée dans chaque expérience avec le temps	56
Figure IV.3 : Effet des fibres naturelles sur les performances thermiques	57
Figure IV.4 : Effet du débit d'air sur la capacité de refroidissement des fibres	58
Figure IV.5 : Évolution de la Chaleur Absorbée par l'Air au Cours du Temps.	59

Liste des Tableaux

Tableaux	Page
Tableau II.1 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles	17
Tableau II.2 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles	22
Tableau II.3 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles	25
Tableau II.4 : Propriétés physiques et mécaniques de fibres naturelles synthétique	26
Tableau II.5 : Propriétés chimiques des fibres de palmier	30
Tableau II.6 : Propriétés chimiques et mécaniques de la fibre de jute	32
Tableau III.1 : Composants de la plate-forme du système d'évaporation directe DEC	40
Tableau III. 2 : Spécifications techniques des éléments et instruments de mesure utilisés.	41
Tableau IV.1 : Paramètres mesurés au début de l'expérience d'entrée	50
Tableau IV.2 : Paramètres disponibles à la fin de l'expérience Enregistrer les données en sortie	51
Tableau IV.3 : Données de calcul des paramètres d'efficacité, de puissance et de taux d'évaporation	53

Liste des Symboles

DEC	Refroidisseur par évaporation directe
LHV	La valeur de chauffage inférieure
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
HR	Humidité relative
EAHE	Échangeur de chaleur terre-air
DEC	Refroidisseur par évaporation directe
EER	Rapport d'efficacité énergétique
A	Allongement à la rupture en traction
Cu	Cuivre
Al	Aluminium
E	Module de Young
σ_u	Contrainte à la rupture en traction
T_{int}	Température de l'air d'entrée °C.
T_{ext}	Température de l'air de sortie °C.
T_h	Température humide de l'air °C.
\dot{m}_{air}	Débit massique de l'air (Kg/s).
ρ_{air}	Densité de l'air (kg/m ³).
\dot{V}_{air}	Débit volumétrique de l'air (m/s).
S	Surface (m ²).
\dot{m}_{air}	Débit massique de l'air d'admission (Kg/s)
Cp_{air}	Chaleur spécifique de l'air d'admission (KJ/Kg °C)
\dot{m}_{evap}	Taux d'évaporation (L/min) .
t	Durée de l'expérience (min).
Q_{evap}	Chaleur nécessaire à l'évaporation (Joules).
m_{eau}	Masse d'eau évaporée(kg).
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).
Q_{air}	Chaleur absorbée par l'air (Joules).
Cp_g	Capacité thermique spécifique de la vapeur
w	Rapport d'humidité
h_{fg}	Enthalpie des liquides saturés
h_{gs}	Enthalpie des vapeurs saturées
e_{sat}	Pression de saturation
e_{vapor}	Pression de vapeur

- m_{air} Masse de l'air (peut être dérivée du débit d'air et de la densité de l'air) (kg).
- c_{air} Capacité thermique spécifique de l'air.
- ΔT_{air} Changement de température de l'air (C°).
- W_f Puissance du ventilateur (W).
- W_p Puissance de la pompe (W).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de raréfaction des ressources énergétiques, le développement de systèmes de réfrigération efficaces et durables est devenu une priorité mondiale. Les systèmes de réfrigération par évaporation, qui utilisent le processus naturel de l'évaporation de l'eau pour refroidir l'air, offrent une alternative écologique et économiquement viable aux méthodes traditionnelles de climatisation, particulièrement dans les régions arides où l'humidité relative est faible.

L'évaluation de la performance des systèmes de réfrigération dans les zones arides revêt une importance cruciale pour répondre aux défis posés par les conditions climatiques extrêmes. Dans ces régions, la chaleur intense et le manque d'eau constituent des obstacles majeurs à la mise en œuvre de solutions de refroidissement efficaces et durables. Face à cette problématique, l'utilisation de la réfrigération par vaporisation d'eau, une méthode traditionnelle, se présente comme une alternative viable et écologique .

Ce projet de recherche se concentre sur l'optimisation de cette technique en intégrant des matériaux naturels tels que le coton, le jute et la fibre de palme pour améliorer l'efficacité du système. L'objectif principal de cette étude est de comparer la performance de ces fibres naturelles dans des conditions arides, en évaluant leur capacité à absorber et évaporer l'eau, ainsi que leur durabilité et leur impact environnemental.

Les fibres naturelles présentent des caractéristiques uniques, telles que leur capacité de rétention d'eau, leur perméabilité à l'air et leur résistance à la dégradation, qui peuvent potentiellement maximiser l'efficacité du processus de refroidissement par évaporation. En analysant ces propriétés, cette étude vise à identifier les matériaux les plus performants pour une application optimale dans les systèmes de réfrigération utilisés dans les zones arides. Les résultats de cette recherche pourraient offrir des solutions innovantes et respectueuses de l'environnement, contribuant ainsi à améliorer le confort thermique et la qualité de vie des populations vivant dans ces régions.

Cette note de fin d'études, intitulée Évaluation de la performance du système de réfrigération par vaporisation d'eau dans les zones arides en utilisant des fibres naturelles (coton, jute et fibre de palmier), explore l'utilisation de fibres naturelles comme médias évaporatifs pour améliorer l'efficacité de ces systèmes. L'étude est structurée en quatre chapitres, chacun contribuant à une compréhension approfondie et complète de la problématique.

Le Chapitre I fournit des informations générales sur les systèmes de réfrigération par évaporation. Les types de réfrigération utilisés, avec un accent particulier sur la réfrigération par évaporation, les études précédentes sur le sujet abordent le principe du refroidissement par évaporation et ses types, l'importance de la transmission de l'eau et de la chaleur dans le processus de refroidissement par évaporation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Chapitre II se concentre sur les fibres naturelles et végétales et leurs caractéristiques spécifiques. Il analyse les propriétés physiques et thermiques du coton, du jute et de la fibre de palmier, et discute de leur potentiel en tant que matériaux efficaces pour les coussinets évaporatifs dans les systèmes de réfrigération.

Le Chapitre III, intitulé Préparation expérimentale et formulation mathématique, décrit les méthodologies expérimentales mises en place pour évaluer la performance des différentes fibres. Il détaille les procédures de préparation des échantillons, les configurations expérimentales, ainsi que les modèles mathématiques utilisés pour interpréter les données recueillies.

Enfin, le Chapitre IV, intitulé Derniers résultats et analyses, présente et analyse les résultats expérimentaux obtenus. Il compare l'efficacité des fibres de coton, de jute et de palmier en termes de capacité de refroidissement et de consommation d'eau. Ce chapitre offre une discussion critique des performances observées et propose des recommandations pour l'optimisation future des systèmes de réfrigération par évaporation dans les environnements arides.

Chapitre I

Généralités Sur Le Système De Refroidissement

I.1 Introduction

L'importance de maintenir des environnements intérieurs et extérieurs frais et confortables dans un monde confronté aux défis du changement climatique et de l'urbanisation croissante ne peut être sous-estimée. Les systèmes de refroidissement jouent un rôle vital dans cette quête, offrant une gamme variée de technologies et d'approches pour abaisser les températures ambiantes. Ce chapitre explore en profondeur les différents systèmes de refroidissement disponibles, en examinant leurs principes de fonctionnement, leurs applications et leurs avantages spécifiques.

I.2 Aperçu des systèmes de refroidissement

Les systèmes de refroidissement englobent diverses technologies et processus conçus pour éliminer la chaleur d'un espace ou d'un objet donné afin de maintenir ou de réduire sa température. Ces systèmes utilisent les principes de la thermodynamique, de la mécanique des fluides et du transfert de chaleur pour atteindre leurs objectifs. Ils peuvent aller de mécanismes simples comme les ventilateurs et la convection naturelle à des systèmes plus complexes comme la réfrigération et la climatisation [1].

Les systèmes de refroidissement font référence à un large éventail de technologies et de méthodologies utilisées pour abaisser la température d'un système, d'un environnement ou d'un objet. Ces systèmes fonctionnent en transférant la chaleur de la zone cible vers un dissipateur thermique, généralement par conduction, convection ou rayonnement. Les systèmes de refroidissement peuvent utiliser divers fluides tels que l'air, l'eau ou des réfrigérants pour faciliter le transfert de chaleur. La conception et le fonctionnement des systèmes de refroidissement sont guidés par les principes de la thermodynamique, de la dynamique des fluides et de l'ingénierie du transfert de chaleur. Ces systèmes jouent un rôle crucial pour maintenir des conditions de fonctionnement optimales des équipements, préserver les denrées périssables et assurer le confort des environnements intérieurs [1].

I-2-1 Types de refroidissement utilisés

- 1. Climatisation conventionnelle** est un système qui utilise un cycle de réfrigération pour éliminer la chaleur et l'humidité d'un environnement intérieur, refroidissant ainsi l'air. Ce processus implique la compression, la condensation, l'expansion et l'évaporation d'un fluide réfrigérant au sein du système. L'air refroidi circule ensuite dans tout l'espace pour maintenir les niveaux de température souhaités [2].
- 2. Refroidissement par sorption** est un processus qui utilise le principe de l'adsorption ou de l'absorption pour réaliser la réfrigération. Dans les systèmes de refroidissement par sorption, un matériau solide ou un liquide absorbe un gaz réfrigérant, provoquant une diminution de la

température. Lorsque de la chaleur est appliquée, le réfrigérant est désorbé ou libéré, générant des effets de refroidissement. Cette technologie est souvent utilisée dans des applications de niche ou dans des zones ayant un accès limité à l'électricité [3].

3. **Refroidissement thermoélectrique** est une méthode de réfrigération qui utilise l'effet Peltier, où une différence de température est créée entre deux matériaux conducteurs différents lorsqu'un courant électrique les traverse. Ce gradient de température amène un côté des matériaux à absorber la chaleur, tandis que l'autre côté la libère, ce qui entraîne un refroidissement. Le refroidissement thermoélectrique est couramment utilisé dans des applications à petite échelle telles que les réfrigérateurs portables et les appareils électroniques [4].
4. **Refroidissement électro calorique** est une technique de réfrigération basée sur l'effet électro calorique, dans laquelle la température d'un matériau change lorsqu'un champ électrique est appliqué ou supprimé. Dans ce processus, l'application d'un champ électrique provoque l'alignement ou le désalignement des dipôles électriques à l'intérieur du matériau, entraînant un changement de température. Cet effet est réversible et peut être utilisé pour des applications de refroidissement efficaces [5].
5. **Refroidissement magnétocalorique** est une technique de réfrigération qui exploite l'effet magnétocalorique, dans lequel la température d'un matériau change en réponse à un champ magnétique appliqué. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué à un matériau magnétocalorique, ses dipôles magnétiques s'alignent, entraînant une augmentation de température. À l'inverse, lorsque le champ magnétique est supprimé, les dipôles se transforment de manière aléatoire, entraînant une diminution de la température. Cet effet est réversible et peut être utilisé à des fins de refroidissement efficace [6].
6. **Refroidissement par évaporation** est un processus dans lequel la chaleur est éliminée d'une surface ou de l'air par l'évaporation d'un liquide, généralement de l'eau. Au fur et à mesure que le liquide s'évapore, il absorbe la chaleur de son environnement, ce qui entraîne un effet de refroidissement. Ce phénomène est régi par les principes de la thermodynamique et est couramment utilisé dans les systèmes de refroidissement tels que les refroidisseurs d'air par évaporation [1].

I-3 État de l'Art

Dans cette étude, nous avons recherché et examiné plusieurs références, sources et études approuvées antérieures que nous avons menées, notamment :

- La thèse de Maissa explore un système de refroidissement hybride alliant échange thermique terre-air et refroidissement par évaporation directe, adapté aux régions chaudes et arides. L'étude évalue rigoureusement les performances thermiques, en se concentrant sur l'efficacité des matériaux DEC, l'épaisseur des tampons et les effets du diamètre des tuyaux EAHE. L'examen de la littérature

souligne l'intérêt croissant pour les solutions hybrides EAHE-DEC pour les climats secs et chauds, soulignant leur potentiel pour améliorer le confort, abaisser les températures ambiantes et fournir un refroidissement économe en énergie [7].

- L'article aborde les défis de l'estimation de l'évaporation dans les régions arides, en particulier en Algérie, en soulignant l'importance de données précises pour le bilan et la gestion de l'eau. Les formules proposées utilisent des éléments météorologiques pour estimer l'évaporation, adaptés aux climats méditerranéens. Cependant, il existe des limites à l'extrapolation des formules à diverses régions climatiques, ce qui souligne la nécessité d'améliorer les méthodologies de planification des ressources en eau [8].
- Le mémoire de maîtrise examine un système de refroidissement par évaporation directe pour le confort thermique, avec une revue de la littérature, une analyse théorique et une étude expérimentale. À l'aide d'un canal de verre rectangulaire et de divers matériaux de protection, notamment de la fibre de palme et du jute, la recherche évalue l'efficacité du système et les applications pratiques d'un refroidissement économe en énergie. Les résultats offrent un aperçu de la conception et des performances du système, suggérant des avantages potentiels pour les solutions de refroidissement durables des bâtiments [9].
- L'étude étudie un système de refroidissement à air chaud utilisant l'évaporation de l'eau, évaluant spécifiquement les performances thermiques de la fibre de palmier dattier dans des conditions arides. Des paramètres essentiels ont été mesurés pour évaluer l'efficacité du système, avec un banc d'essai conçu pour le refroidissement de l'air par évaporation de l'eau. Les résultats suggèrent l'utilisation potentielle des fibres de palmier dattier pour les systèmes de refroidissement par évaporation dans les régions chaudes, offrant ainsi un aperçu des solutions de refroidissement économes en énergie dans les secteurs de l'ingénierie mécanique et de la construction [10].
- L'étude de Djamel BENAOUNE évalue les performances thermiques d'un système de refroidissement par air par évaporation de l'eau dans le climat chaud et semi-aride de Biskra. La recherche vise à obtenir des conditions de température et d'humidité favorables à l'intérieur des structures en utilisant des méthodes de refroidissement passif pour réduire les coûts énergétiques par rapport à la climatisation traditionnelle. En utilisant les énergies naturelles tout au long de l'année, l'étude souligne l'importance économique de l'adaptation des systèmes de refroidissement aux conditions climatiques. L'expérimentation consiste à évaluer l'efficacité du refroidissement de l'air grâce à l'humidification utilisant des fibres végétales, notamment celles des palmiers dattiers, pour améliorer les paramètres de confort tels que la température, l'humidité et la vitesse de l'air [11].
- Le document de Bochra Bouali détaille la conception d'un échangeur évaporatif d'eau utilisant des fibres végétales, notamment des fibres de palmier dattier. Il passe en revue les méthodes de

refroidissement par air, y compris les puits canadiens et les échangeurs de chaleur à matériaux à changement de phase, et présente les résultats expérimentaux d'une étude menée en 2017. Le document traite de la conception et des performances de l'échangeur, offrant des informations pour faire progresser les technologies de refroidissement durables [12].

- L'étude a évalué des coussinets en fibre de palmier dattier dans un refroidisseur par évaporation directe dans un climat chaud et aride, en explorant divers flux de masse d'air et épaisseurs de coussinets. Les résultats ont indiqué des variations de performances, offrant des informations pour optimiser les systèmes de confort thermique, fournissant ainsi des données précieuses pour améliorer l'efficacité des refroidisseurs par évaporation dans des régions similaires [13].
- L'étude explore les performances des refroidisseurs d'eau avec des coussinets de refroidissement en fibres naturelles comme les fibres de jute, de coton et de noix de coco, en se concentrant sur leur impact sur l'efficacité du condenseur. Les résultats expérimentaux démontrent une capacité améliorée de rejet de chaleur et une consommation électrique réduite du compresseur avec ces coussinets. Dans l'ensemble, la recherche suggère que l'incorporation de fibres naturelles dans les refroidisseurs d'eau pourrait offrir une solution de refroidissement durable et efficace [14].
- L'étude évalue les systèmes de refroidissement par évaporation utilisant des matériaux humides à base de gazon synthétique dans des climats chauds et secs, en comparant trois configurations en termes d'efficacité et de capacité de refroidissement. En mettant l'accent sur l'adoption du refroidissement par évaporation dans les régions de chaleur extrême, la recherche comprend une analyse d'incertitude pour la fiabilité des données, fournissant ainsi des informations précieuses pour la conception de systèmes de refroidissement efficaces [15].
- L'étude a comparé les méthodes de refroidissement passif radiatif, réfléchissant et évaporatif dans les climats chauds, soulignant les performances supérieures du refroidissement radiatif par rapport aux méthodes réfléchissantes et évaporatives. Le refroidissement radiatif a démontré son efficacité tout au long de la journée, offrant des informations précieuses sur les solutions de refroidissement durables dans un contexte de hausse des températures mondiales [16].
- La note examine l'impact de la vitesse du flux d'air sur l'efficacité du bulbe humide et du point de rosée dans un système de refroidissement par évaporation indirecte utilisant divers matériaux de coussin de refroidissement comme la feuille d'ananas, la ramie et les fibres de luffa. La fibre de feuille d'ananas a donné des résultats prometteurs, suggérant son potentiel en tant que matériau de refroidissement dans de tels systèmes [17].
- L'article présente un système expérimental de collecte d'eau utilisant du gel de silice et de l'énergie solaire, montrant des gains d'efficacité notables par rapport aux systèmes existants. En optimisant divers composants et configurations, l'étude met en évidence la viabilité du système pour la récolte atmosphérique dans des climats chauds et humides aux côtés de toits d'évaporation de fibres [18].

I-4 Système de refroidissement par évaporation

I-4-1 Définition du refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation est un processus par lequel un liquide subit une transition de phase de liquide à vapeur, absorbant la chaleur latente de son environnement et réduisant ainsi la température du système. Ce phénomène est régi par les principes thermodynamiques et est couramment observé dans divers contextes naturels et industriels [1].

I-4-2 Principe de fonctionnement par refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation fonctionne sur la base du principe de la chaleur latente de vaporisation, dans lequel un liquide absorbe la chaleur de son environnement pour subir un changement de phase de liquide à vapeur. Cette absorption de chaleur abaisse la température de l'environnement. Dans un système de refroidissement par évaporation, tel qu'un refroidisseur de marais, l'air chaud passe sur une surface humide ou à travers un milieu humide, provoquant l'évaporation de l'eau et le refroidissement de l'air. L'énergie nécessaire à l'évaporation est prélevée sur l'air ambiant, ce qui entraîne une diminution de sa température [19].

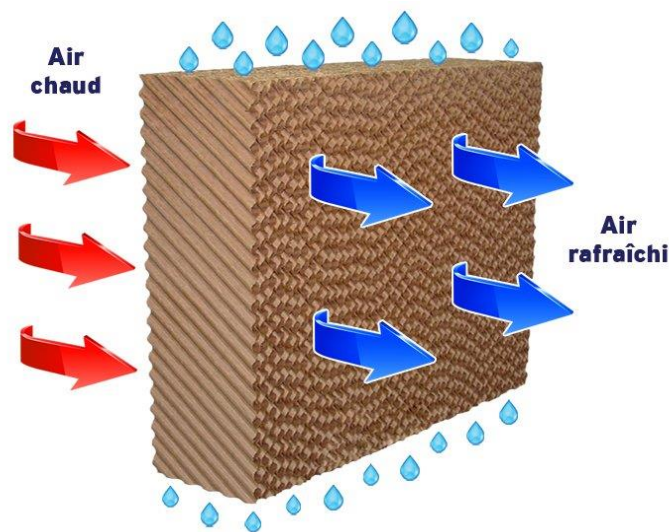


Figure I.1: Refroidissement par évaporation de l'air via un processus d'évaporation de l'eau [20].

I-4-3 Refroidissement évaporation directe

Le refroidissement par évaporation directe est un processus dans lequel la température de l'air est réduite par contact direct avec l'eau, provoquant l'évaporation de l'eau et l'absorption de la chaleur de l'air. Cet air refroidi circule ensuite dans l'espace souhaité. Les systèmes de refroidissement par évaporation directe sont de conception simple et couramment utilisés dans les climats arides ou dans les zones à faible taux d'humidité [21].

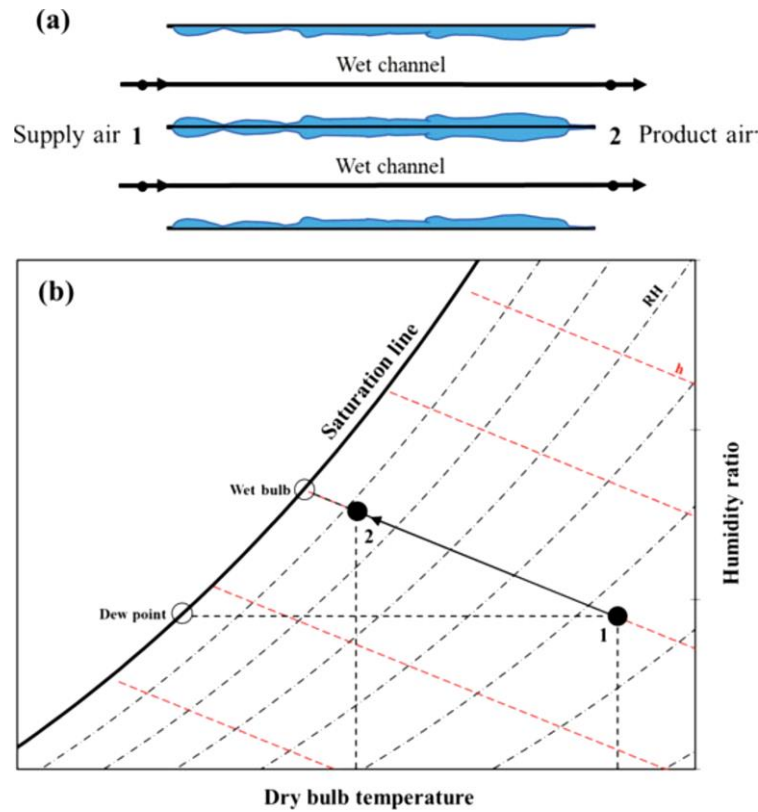


Figure I.2: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation directe : un diagramme schématique ; b diagramme psychrométrique. Les « lignes pointillées » noires représentent les lignes d'humidité relative (HR) constante et les « lignes pointillées » rouges représentent les lignes isenthalpiques [22].

I-4-4 Refroidissement par évaporation indirect

Le refroidissement par évaporation indirect est un processus de refroidissement dans lequel la chaleur est éliminée de l'air par évaporation de l'eau, mais sans ajouter directement d'humidité au flux d'air refroidi. Au lieu de cela, l'échange thermique se produit entre deux flux d'air, dont l'un est refroidi par évaporation tandis que l'autre reste sec. Cela permet un refroidissement efficace sans augmenter le niveau d'humidité de l'air refroidi [23].

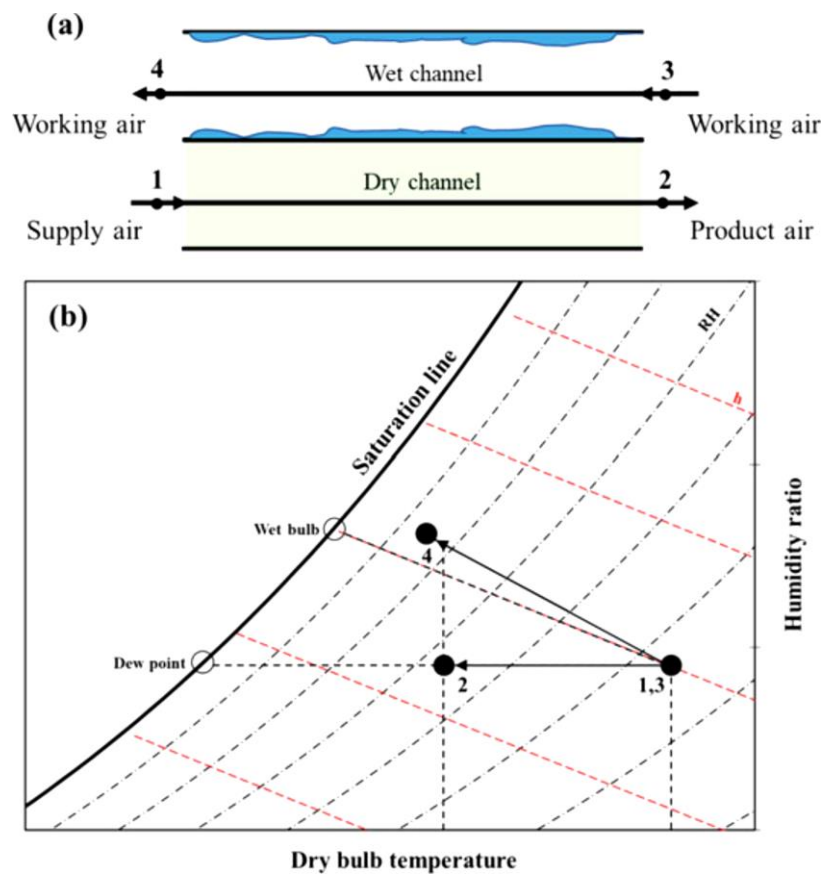


Figure I.3: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation indirect :
 (a) un diagramme schématique ;(b) diagramme psychrométrique [22].

I-4-5 Refroidissement par évaporation au point de rosée

Refroidissement par évaporation au point de rosée est un processus qui refroidit l'air en utilisant le principe du refroidissement par évaporation tout en contrôlant les niveaux d'humidité pour éviter la saturation en humidité. Cette méthode consiste à abaisser la température de l'air jusqu'à son point de rosée, température à laquelle l'air devient saturé d'humidité, en y évaporant de l'eau. En maintenant la température de l'air proche du point de rosée, un refroidissement efficace peut être obtenu sans accumulation excessive d'humidité. [24].

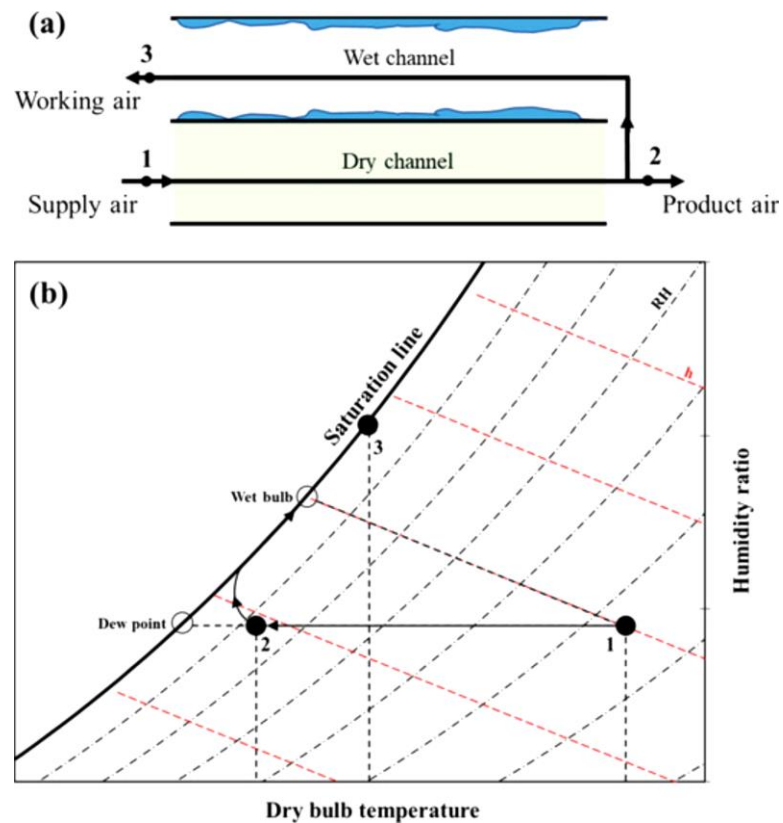


Figure I.4: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation au point de rosée :

(a) un diagramme schématisé ; (b) carte psychrométrique [22].

I-4-6 Refroidissement par évaporation mixte

Le refroidissement par évaporation mixte combine des techniques de refroidissement par évaporation directe et indirecte pour obtenir un refroidissement efficace tout en gérant les niveaux d'humidité. Dans cette méthode, une partie du flux d'air entrant est refroidie directement par évaporation de l'eau, tandis qu'une autre partie est refroidie indirectement via un échangeur de chaleur. En combinant ces approches, les systèmes de refroidissement par évaporation mixtes peuvent atteindre des performances de refroidissement optimales tout en minimisant l'augmentation de l'humidité [19].

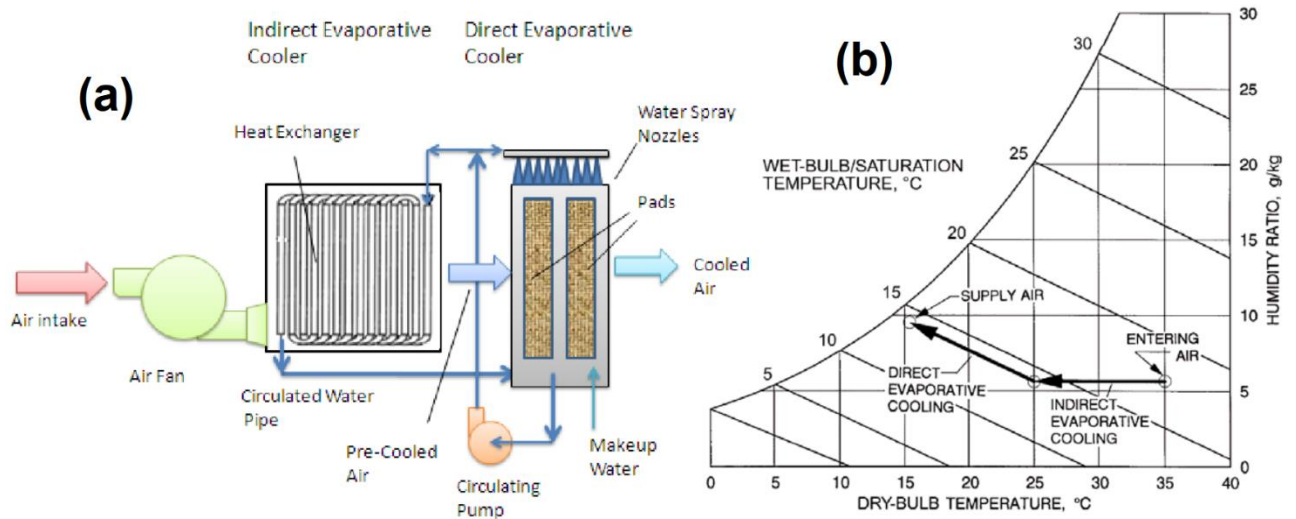


Figure I.5: Principe de fonctionnement du refroidissement par évaporation mixte :

(a) Système indirect-direct ; (b) Processus indirect-direct [23].

I-5 Importance de l'eau dans les processus de refroidissement par évaporation

Sa grande disponibilité et ses propriétés thermodynamiques remarquables font de l'eau un fluide idéal pour réaliser les transferts thermiques nécessaires au bon fonctionnement des procédés Fig. 6.

Les principaux éléments constituant un circuit fermé de recirculation sont :

- Dispositifs à refroidir : condenseurs, échangeurs de chaleur, refroidisseurs de fluides divers ;
- Les moteurs thermiques, les compresseurs et les différentes unités, dont il faut évacuer les calories (hauts fourneaux, fours, réacteurs chimiques, etc.;
- Une ou plusieurs tours de refroidissement (tours de refroidissement atmosphériques), dont le rôle est d'évacuer la chaleur transférée à l'eau, dans les appareils refroidis, par contact direct avec l'air ;
- Une ou plusieurs pompes qui prélèvent l'eau froide des réservoirs proches de la base du refroidisseur, pour l'envoyer vers l'équipement à refroidir ;
- Les tuyaux de raccordement et les dispositifs associés tels que celui pour la filtration latérale [24].

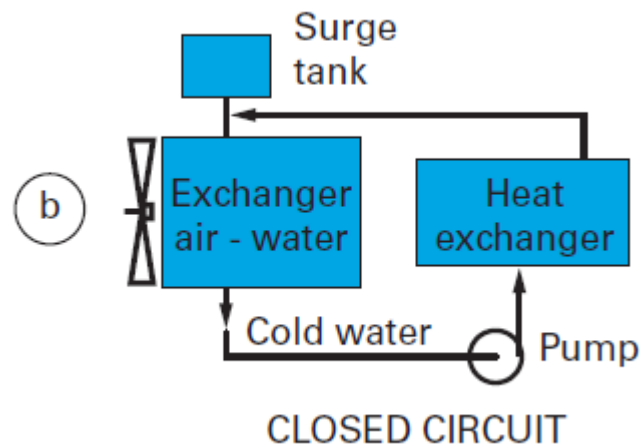


Figure I.6: circuits de refroidissement [25].

I-6 Transfert de chaleur dans le processus d'évaporation de refroidissement

I-6-1 Mécanismes de transfert de chaleur

Le processus de refroidissement par évaporation implique trois mécanismes principaux de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction se produit lorsque la chaleur est transférée à travers un matériau solide en raison d'un gradient de température. La convection implique un transfert de chaleur par le mouvement de fluides (liquides ou gaz). Le rayonnement fait référence au transfert de chaleur par les ondes électromagnétiques [26].

I-6-2 La chaleur latente de vaporisation

La chaleur latente est l'énergie thermique nécessaire pour faire passer une substance d'une phase à une autre sans altérer sa température. Dans le contexte du refroidissement par évaporation, la chaleur latente de vaporisation (LHV) est l'énergie nécessaire pour convertir un liquide à son état gazeux. Le PCI de l'eau est d'environ 2 450 kJ/kg, ce qui constitue le principal facteur responsable de l'effet de refroidissement dans les systèmes de refroidissement par évaporation [27].

- **Formules mathématiques:**

1- Équation de transfert de chaleur (loi de refroidissement de Newton):

$$Q = h \cdot A (T_{\text{surface}} - T_{\text{ambient}})$$

Où

Q représente le taux de transfert de chaleur ;

h est le coefficient de transfert de chaleur;

A est la surface ;

T_{surface} est la température de surface et **T_{ambient}** est la température ambiante.

2- Formule de chaleur latente de vaporisation:

$$Q = m.LHV$$

Où

Q est la chaleur nécessaire à la vaporisation ;

m est la masse du liquide et **LHV** est la chaleur latente de vaporisation.

3- Formules psychrométriques:

a. Enthalpie des liquides saturés (**h_{fg}**) : $h_{fg} = LHV$

b. Enthalpie des vapeurs saturées (**h_{gs}**) : $h_{gs} = h_{fg} + C_{pg}(T_{sat} - T_{ref})$

c. Capacité thermique spécifique de l'air (**C_{pa}**) : $C_{pa} = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$

d. Capacité thermique spécifique de la vapeur (**C_{pg}**) : $C_{pg} = 2,04 \text{ kJ/kg.K}$

e. Rapport d'humidité (**w**) : $w = m_{vapor} / kg_{dry_air}$

f. Pression de saturation (**e_{sat}**) : $e_{sat} = 6,11 * \exp(17,27 * T_{air} / (T_{air} + 273,3))$

g. Pression de vapeur (**e_{vapor}**) : $e_{vapor} = C_{pa} * (T_{dry_air} - T_{wet_bulb}) / LHV$

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre a offert un aperçu complet des systèmes de refroidissement, de leurs fonctionnalités et de leurs applications. De la climatisation conventionnelle aux technologies émergentes telles que le refroidissement thermoélectrique et électro calorique, en passant par les méthodes traditionnelles comme le refroidissement par évaporation, chaque approche présente ses propres caractéristiques uniques. Comprendre ces systèmes et les principes de transfert de chaleur qui les sous-tendent est essentiel pour choisir la solution de refroidissement la mieux adaptée à chaque situation. Alors que la demande de solutions de refroidissement efficaces continue de croître, ce chapitre fournit une base solide pour une exploration plus approfondie des technologies de refroidissement et de leurs applications pratiques dans un monde en évolution constante.

Chapitre II

Fibres Naturelles et Végétales et Leurs Propriétés

II.1 Introduction

Les fibres naturelles, dérivées de diverses sources végétales, font partie intégrante de la civilisation humaine depuis des millénaires. Leurs propriétés polyvalentes les rendent inestimables dans un large éventail d'applications, des textiles aux matériaux de construction. Ce chapitre examine les caractéristiques, la structure et la composition chimique des fibres végétales naturelles, en se concentrant sur leur importance dans le refroidissement par évaporation et leur utilité dans les régions arides. Grâce à une exploration de fibres telles que le coton, le palmier et le jute, nous visons à découvrir les propriétés chimiques uniques et les subtilités structurelles qui sous-tendent leurs diverses fonctionnalités. Comprendre ces aspects met non seulement en lumière la science fondamentale derrière les fibres végétales, mais offre également un aperçu de leurs applications durables dans divers contextes.

II.2 Fibres Naturelles

Depuis milleus millénaires, les fibres naturelles sont employées dans plusieurs secteurs, notamment celui des composites. En Égypte ancienne, par exemple, la paille et l'argile se mêlaient pour ériger des murs robustes. Au cours de la dernière décennie, les applications renforcées par des fibres naturelles ont suscité un intérêt croissant, tant dans le milieu académique que dans diverses industries. Une multitude de fibres naturelles s'offrent à nous pour le renforcement, l'isolation, le chauffage, le refroidissement de l'air chaud, ou encore comme charges [28].

Les fibres naturelles peuvent être issues de diverses sources telles que les végétaux (comme le lin, le chanvre, le jute et le coton), les animaux (comme la laine et la soie) et les minéraux (comme l'amiante). Les fibres naturelles végétales se trouvent dans différentes parties des plantes telles que la tige, la graine, le fruit ou son enveloppe, ainsi que les feuilles [29].

Selon le tableau (II.1) qui expose certaines caractéristiques des fibres artificielles et naturelles, ces dernières se montrent très performantes et peuvent même rivaliser avec les fibres synthétiques [28].

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles [30].

		Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Elongation (%)	Densité	Prix (\$/kg)	Prix (k\$/m ³)
	Bois	40 ¹	1000 ¹	1,5 ¹	0,4-1,4 ⁶	0,25-0,3 ³	0,1-1,8
Graines	Coton	5,5-12,6 ²	287-597 ²	2,0-10,0 ²	1,5-1,6 ²	1,8-5,1 ²	2,7-8,2
	<i>Milkweed</i>	8,2 ⁴	296 ⁴	1,6 ⁴	0,68 ⁴	1,1-10 ⁵	0,3-9,7
Liberiennes	Lin	27-80 ²	343-1035 ²	2,7-3,2 ²	1,4-1,5 ²	2,5-12,7 ²	3,6-19,1
	Kenaf	22-53 ²	295-930 ²	3,7-6,9 ²	1,2-1,4 ²	0,6-0,7 ²	0,7-0,9
	Chanvre	3-90 ²	580-1110 ²	1,3-4,7 ²	1,4-1,5 ²	0,6-1,9 ²	0,9-2,9
	Ramie	44-128 ⁷	400-938 ⁷	2,0-3,8 ⁷	1,5 ⁷	-	-
	jute	10-55 ⁷	939-800 ⁷	1,5-1,8 ⁷	1,3-1,5 ⁷	-	-

Dans certaines applications, comme par exemple dans l'emballage, l'objectif est d'obtenir un matériau suffisamment résistant sans nécessairement figurer en tête de liste des fibres les plus performantes : il s'agit d'atteindre des propriétés mécaniques acceptables tout en minimisant les coûts. C'est dans ce domaine que les fibres naturelles peuvent se révéler bien plus avantageuses que les fibres synthétiques, étant donné leur coût moindre. De plus, il est essentiel de prendre en compte les aspects environnementaux. En général, les fibres naturelles ont une empreinte carbone nettement inférieure à celle des fibres artificielles, consomment moins d'énergie, sont biodégradables et causent moins de dommages aux équipements de mise en forme que les fibres de verre ou de carbone [28].

II.2.1 Les Fibres Naturelles Végétales

Les fibres végétales naturelles font référence à des matériaux fibreux dérivés de diverses parties de plantes, telles que les tiges, les graines, les fruits ou les feuilles. Ces fibres incluent des exemples comme le coton, le lin (lin), le chanvre et le jute. Ils se caractérisent par leur composition riche en cellulose et leur intégrité structurelle, ce qui les rend adaptés à un large éventail d'applications, des textiles aux matériaux composites [31].

Les fibres végétales naturelles se trouvent dans différentes parties de la plante, comme la tige, les graines, le fruit ou sa peau, et les feuilles (Figure II-1) montrent les fibres naturelles et leurs parties.

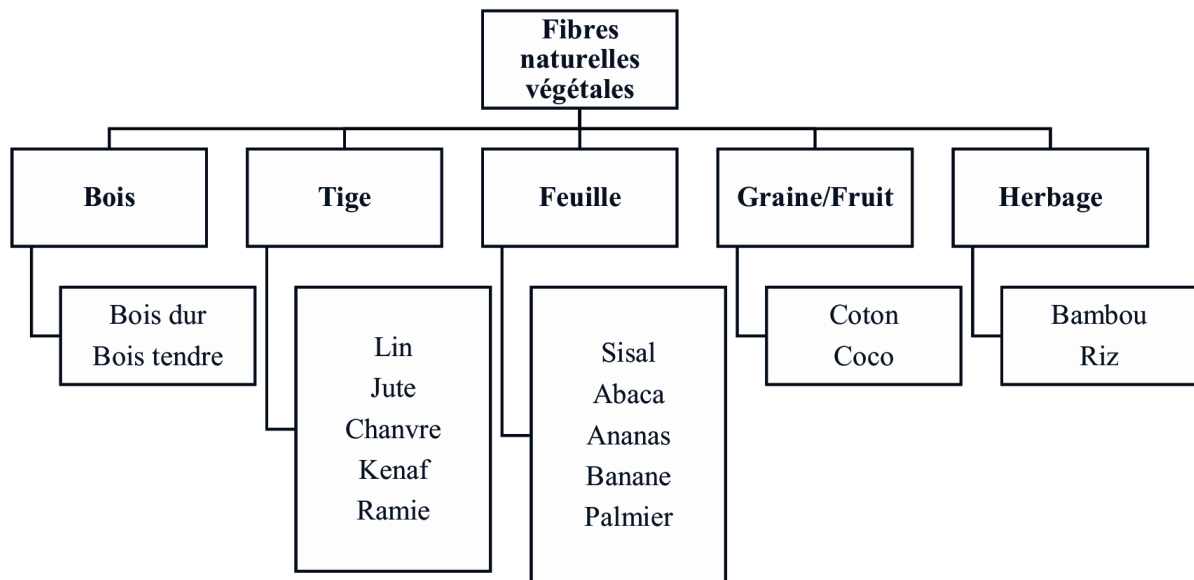


Figure II.1: Variétés de fibres naturelles végétales et leur provenance [29].

II.2.2. Classification des Fibres Végétales

La classification des fibres végétales implique une catégorisation systématique basée sur leur origine botanique, leur structure anatomique et leur composition chimique:

- ✓ **Fibres libériennes :** Dérivées du phloème ou de l'écorce interne des plantes, les fibres libériennes se caractérisent par leur nature longue, solide et flexible. Ils sont principalement composés de cellulose et peuvent également contenir de la lignine. Les exemples courants incluent le lin, le chanvre, le jute, la ramie et le kénaf [31].
- ✓ **Fibres de feuilles :** Ces fibres sont obtenues à partir des feuilles de certaines plantes et se caractérisent souvent par leur courte longueur et leur résistance modérée. Les fibres des feuilles contiennent généralement des niveaux élevés de cellulose et conviennent à des applications telles que le tissage et la vannerie. Les exemples incluent le sisal, l'abaca (chanvre de Manille) et la fibre de feuille d'ananas (piña) [33].
- ✓ **Fibres de graines :** Extraites des graines, ces fibres sont souvent enfermées dans des téguments protecteurs. Ils se caractérisent par leur courte longueur et leur résistance modérée. Les exemples courants incluent le coton et le kapok [32].
- ✓ **Fibres de fruits :** Dérivées de fruits ou de leurs enveloppes, ces fibres varient considérablement dans leur composition et leurs propriétés. Ils peuvent être utilisés à des fins telles que le textile, l'emballage et l'artisanat. Les exemples incluent la fibre de coco (issue des coques de noix de coco) et le kapok (issu des fibres des graines de kapokier) [33].

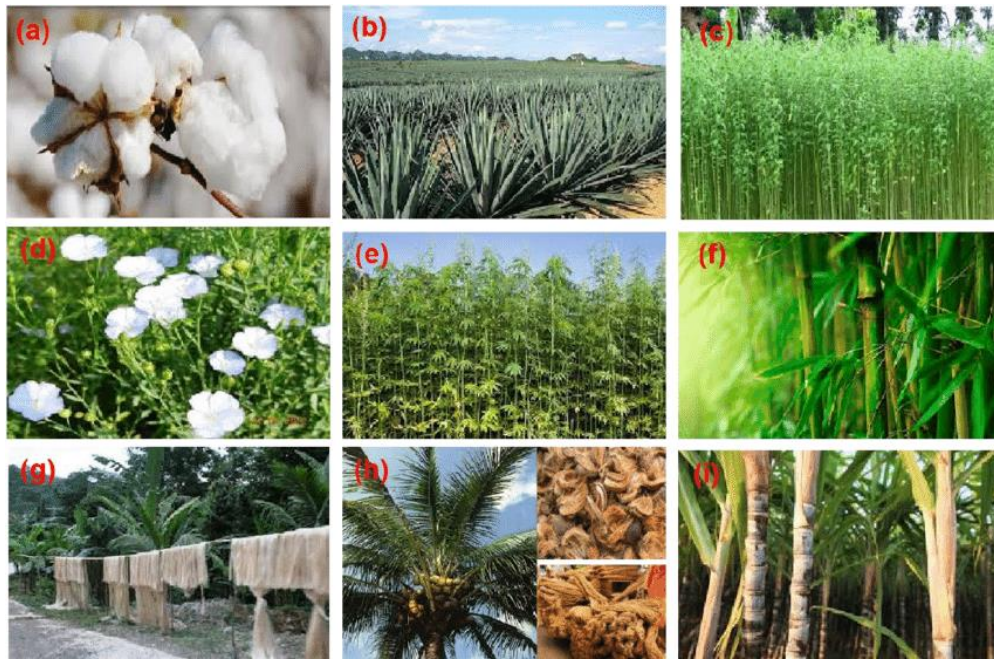
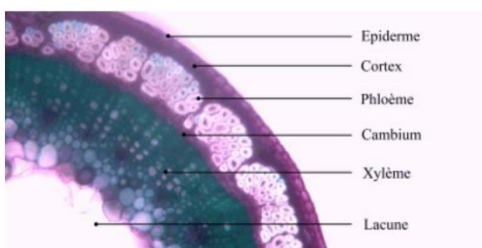


Figure II.2: Classification des fibres végétales selon leur type et leur structure [34].

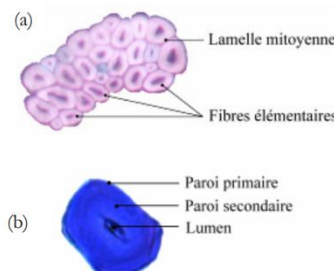
II.2.3. Structure de la fibre végétale

Les fibres végétales présentent une structure hiérarchique complexe caractérisée par des microfibrilles de cellulose intégrée dans une matrice d'hémicellulose et de lignine, formant la paroi cellulaire primaire. Cette disposition confère résistance et flexibilité aux fibres. Les fibres peuvent également posséder des parois secondaires avec des couches distinctes, fournissant un support structurel supplémentaire [32].

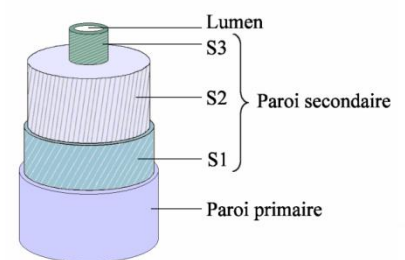
Une plante lin, utilisée pour produire des fibres naturelles, possède une tige mesurant entre 80 et 120 cm de haut et environ 2 mm de diamètre à maturité. Sa structure comprend plusieurs couches, dont l'épiderme, le cortex, le phloème, le cambium et le xylème. Les faisceaux de fibres, regroupant jusqu'à une quarantaine de fibres collées ensemble, sont composés de polysaccharides amorphes. Chaque fibre de lin est multicouche, avec une section polygonale ou elliptique, contenant une cavité appelée le lumen. La cellulose constitue la majeure partie de la fibre, avec des pourcentages d'eau, de pectines, d'hémicelluloses et de lignines variant selon la maturité de la fibre [35].



Tige
Échelle Macroscopique



Faisceau
Échelle Méso scopique
20



Fibre élémentaire
Échelle Microscopique

Figure II.3: Microstructure des fibres naturelles : tige de lin [35].

Chaque cellule se compose de deux parois distinctes : la paroi primaire et la paroi secondaire. La paroi primaire, mince et flexible, favorise la croissance cellulaire et agit comme un support pour la fibre. En revanche, la paroi secondaire, plus rigide, confère à la fibre ses propriétés mécaniques exceptionnelles. La paroi primaire est composée d'hémicellulose, de pectines, de protéines et de microfibrilles de cellulose, lui conférant une certaine souplesse. Quant à la paroi secondaire, elle est subdivisée en trois couches, S1, S2 et S3, contenant les mêmes composants mais avec une concentration plus élevée en cellulose et la présence de lignine [29].

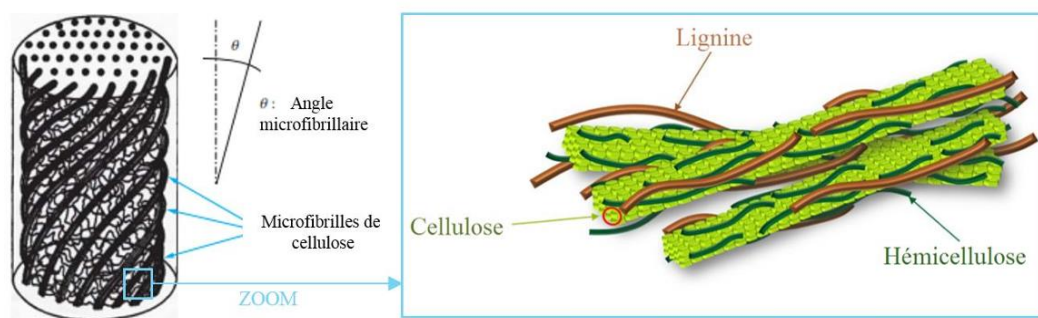


Figure II.4: Microfibrilles de cellulose dans leur matrice de lignine et d'hémicellulose et représentation de l'angle micro fibrillaire [29].

Les sous-couches S1, S2 et S3 de la paroi secondaire contiennent des microfibrilles de cellulose, comme illustré dans la Figure II.4, avec des orientations distinctes. Cette orientation est déterminée par l'angle micro fibrillaire. Dans les sous-couches S1 et S3, les microfibrilles de cellulose sont principalement disposées perpendiculairement à l'axe de la fibre, formant un grand angle micro fibrillaire, tandis que dans la sous-couche S2, elles suivent l'axe de la fibre avec un petit angle micro fibrillaire. Parmi ces trois sous-couches, la S2 est la plus épaisse, et l'orientation de ses microfibrilles contribue de manière significative à la résistance mécanique de la fibre. Chaque fibre possède également son propre lumen, c'est-à-dire un canal central [29].

II.2.3.1 Structure et Composition Chimique :

La composition chimique et la morphologie microstructurale des fibres lignocellulosiques sont très complexes en raison de l'organisation hiérarchique de leurs différents composants, chacun étant présent dans des proportions différentes. Cette complexité est influencée par des facteurs tels que la nature de la fibre, les conditions de croissance, le climat et l'âge de la fibre. Le tableau II.2 donne un

aperçu de la composition chimique des différentes fibres cellulosiques, exprimée en pourcentage par rapport à la masse sèche de la fibre [36].

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles [36].

Fibre	Cellulose (%)	Hémicelluloses (%)	Lignine (%)	Pectines (%)	Cires (%)	Cendres (%)
Lin	64.1 - 85	3.7 - 16.7	2 - 6.2	1.8-2.3	1.7	1 - 1.4
Cotton	82.7 - 90	1 - 5.7	0.7 - 1.6	<1	0.6	0.8 - 1
Chanvre	57 - 78.3	4.15 - 17	2.9 - 13	0.9	0.8	0.53 - 0.82
Bois des résineux	45 - 50	25 - 30	25 - 35	-	-	0.2 - 0.5
Bois des feuillus	45 - 50	21 - 36	18 - 30	-	-	0.4 - 0.8
Bambou	42.3 - 49.1	24.1 - 27.7	23.8 - 26.1	-	-	1.3 - 2
Bagasse	40 - 46	24.5 - 29	12.5 - 20	-	-	1.5 - 2.4
Jute	61 - 71.5	12 - 20.4	11.8 - 13	0.2	0.5	2
Kenaf	51 - 59	21.5	15 - 19	-	-	5

• La cellulose

La cellulose dont la formule chimique est $C_6H_{10}O_5$, est un polysaccharide naturel. C’est un homopolymère semi-cristallin présent en abondance dans les parois des cellules végétales [29]. Cellulose a une structure polymérique constituée d'enchaînement de monomères cellobioses liés par des liaisons (Figure II. 5) Cet homopolymère est caractérisé par un grand poids Bimoléculaire avec un degré de polymérisation qui peut dépasser 36000 dans le cas de la cellulose extraite du lin. A titre indicatif, un degré de polymérisation (OP) de 14000 est équivalent à une longueur d'environ 7 μm [36].

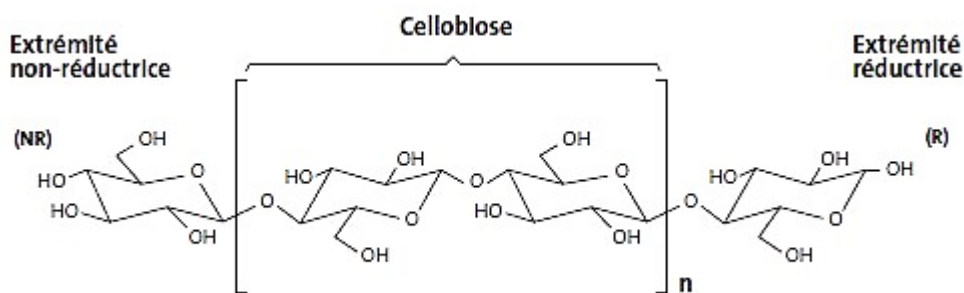


Figure II.5: Structure chimique de la cellulose [37].

- **Les hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont des polysaccharides complexes de faible poids moléculaire (degré de polymérisation moyen de 150), très hydrophiles et solubles en milieu alcalin. Qui contribuent au renforcement de la paroi cellulaire des fibres naturelles en interagissant avec les lignines et la cellulose qui les composent [36]. Leur squelette est composé de résidus β -(1,4)-D-pyranose, où l'O-4 est en position équatoriale (Figure II.6) présente la structure chimique des monomères des hémicelluloses. Les pyranoses peuvent être des glucoses, mannoses ou xylooses. Les hémicelluloses peuvent être constituées de différents sucres dont les plus communs pour les plantes à écorce sont le D-xylose, D-mannose, D-galactose, D-glucose, L'arabinose, D-4-O-acide méthyl glucuronique, D'acide galacturonique et D'acide glucuronique [29].

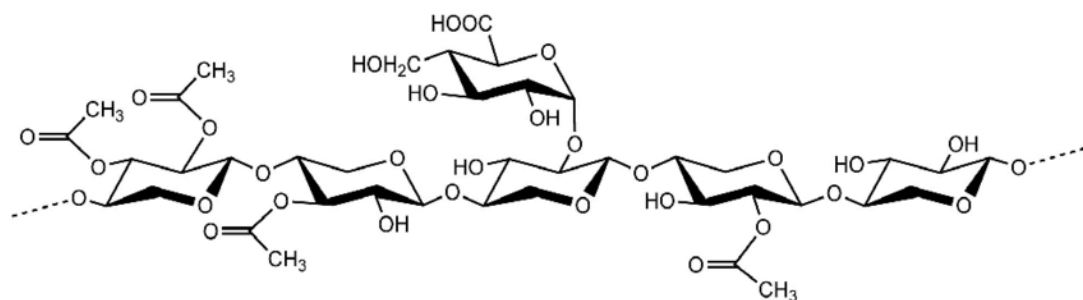


Figure II.6: Structure chimique d'une classe des hémicelluloses [38].

- **Lignine**

La lignine, composé végétal, fait partie des trois composés alcooliques : le syringyle, le gäicyl et le p-hydroxy phényle, créant une structure tridimensionnelle à liaisons diverses, ne contenant pas d'oxygène-carbone et de carbone-carbone (communément la montre la figure II.7)[29]. Ces propriétés thermoplastiques permettent une interaction efficace avec l'eau, avec des températures d'inflammation et des ramifications respectivement à 90°C et 170°C. Comme la cellulose, elle confère un aspect morphe aux biopolymères végétaux, comprenant environ 20.000 monomères et assurant rigidité et résistance aux agressions environnementales et microbiennes, protégeant contre la décomposition des plantes [36]. La lignine, insoluble dans l'eau, est également insoluble dans les solutions alcalines et à haute température, elle oblige les plantes à améliorer leur capacité d'arrosage et limite leur biodiversité [29]. Principalement situées dans la deuxième paroi cellulaire et dans les fibres naturelles, celles-ci se retrouvent également dans les Garden parties de la plante qui racontent le xylème et la peau. Cela inclut toutes sortes de légumes, ainsi que différents types de monomères dans le cycle aromatique [36].

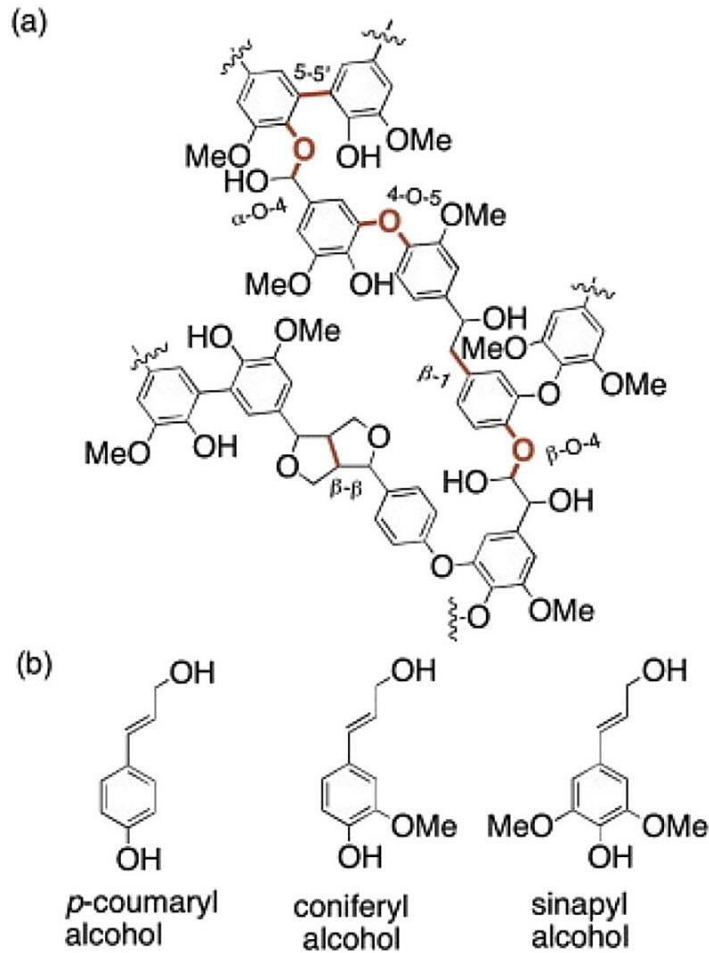


Figure II-7 : (a) Structure de la lignine proposée avec ses différents types de liaisons ;
 (b) alcools primaires (monomères) de la lignine [29].

II.2.3.2 Propriétés des Fibres Cellulosiques

Les propriétés des fibres naturelles végétales dépendent de plusieurs facteurs, notamment leur teneur en cellulose, un polymère présentant une résistance mécanique élevée, et de l'angle micro fibrillaire, qui indique l'orientation des fibrilles de cellulose dans la paroi majeure [29][36]. Un angle micro fibrillaire plus faible est associé à des propriétés de traction plus élevées. La teneur en cellulose des fibres naturelles varie généralement entre 40 et 90%, selon leur source végétale. De plus, l'angle micro fibrillaire varie considérablement selon le type de fibre. Notamment, l'allongement à la rupture augmente avec l'angle micro fibrillaire, ce qui permet un alignement des microfibrilles lors d'une traction avant la rupture. Par exemple, les fibres de coco présentent un angle de 45° avec un allongement à la rupture compris entre 15 et 40%, tandis que les fibres de lin, avec un angle de 10°, ont un allongement à la rupture de 1.6 à 5.9% [29][36].

La Table II-3 résume les propriétés en traction de différentes fibres naturelles ainsi que leur teneur en cellulose et leur angle micro fibrillaire [29].

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques de quelques fibres naturelles comparativement à la fibre de verre [29].

Fibres	Cellulose (%)	Angle microfibrillaire, θ (°)	E (GPa)	A (%)	σ_u (MPa)	ρ (g/cm ³)
Lin	64-71	10	27-91	1.6-5.9	531-3282	1.53
Ramie	83	7.5	61.4-128	1.2-3.8	400-938	1.56
Chanvre	78	6.2	35	1.6	389	1.07
Jute	61-71	8	26.5	1.5-1.8	393-773	1.44
Sisal	67-78	20	9-21	3-7	350-700	1.45
Coco	43	45	4-6	15-40	131-175	1.15
Coton	85-90	-	5.5-12.6	7.8	287-597	1.5-1.6
Verre E	-	-	72-73	3	2000-2400	2.54

- **Hygroscopie**

Les fibres lignocellulosiques sont hygroscopiques en raison des groupements hydroxyles présents dans les polymères organiques de leur paroi cellulaire. Les hémicelluloses, avec leurs courtes chaînes ramifiées et leur disposition en surface des microfibrilles, sont les principaux agents de cette hygroscopicité. Elles offrent une plus grande disponibilité des groupements OH. Malgré la richesse en OH de la cellulose, les liaisons inter et intramoléculaires à l'intérieur des microfibrilles limitent l'absorption d'humidité dans les zones cristallines de la cellulose. En revanche, la lignine est hydrophobe [36]. La présence de groupements hydroxyles libres et d'eau, surtout dans les zones amorphes, diminue l'attraction des fibres pour les polymères hydrophobes, formant une interface fragile et sensible aux sollicitations mécaniques. De plus, l'évaporation de l'eau lors du processus de fabrication des composites crée une structure poreuse sensible aux environnements humides, favorisant un vieillissement accéléré des composites [36].

- **Résistance mécanique des fibres végétales**

Les fibres cellulose peuvent rivaliser avec les fibres synthétiques en termes de résistance mécanique, une caractéristique qui dépend fortement de leur morphologie, composition chimique, cristallinité, degré de polymérisation de la cellulose et méthode d'extraction. Le Tableau II.4 présente les propriétés physiques et mécaniques des fibres naturelles couramment utilisées pour renforcer les composites polymériques [36].

La comparaison des propriétés mécaniques des fibres végétales de différentes sources nécessite des précautions, en raison des différents tests mécaniques et méthodes d'essai de traction applicables. Malgré cela, une terminologie incohérente reste un défi majeur. Les études ont révélé une grande variabilité des propriétés mécaniques des fibres issues de la même espèce, liée à des facteurs naturels et techniques tels que le procédé d'extraction et les méthodes de mesure. Cette variation demeure une préoccupation cruciale pour les industries utilisant ces fibres [36].

Tableau II.4 : Propriétés physiques et mécaniques de fibres naturelles et synthétique [36].

Fibre	Densité (g/cm ³)	Longueur (mm)	Diamètre (µm)	Taux d'humidité (%)	Module de Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)
Coton	1.5-1.6	10-40	10-30	8-25	5.5-12.6	7-8	287-597
Lin	1.4-1.5	9-70	12-177	1.2-8	45-100	2.7-3.2	345-1100
Chanvre	1.5	5-55	5-51	1.2-6.2	70	1.6	690
Jute	1.3-1.46	2-5	40-350	12.5-13.7	27.6	1.5-1.8	393-773
Ramie	1.5	60-250	50	12-17	61.4-128	3.6-3.8	400-938
Kenaf	1.45	2-6	-	6.2-12	53	1.6	930
Sisal	1.33-1.5	1-8	100-300	11	9.4-22	2-2.5	511-635
Bois résineux	1.5	-	-	-	40	4.4	1000
Fibre de verre (E)	2.5-2.55	-	<17	-	70	2.5-3.4	2000-3500
Aramide	1.44	-	11.9	-	63-67	2.5-3.7	3000-3150
Fibre de carbone	1.82	-	8.2	-	-	1.3	2550

II.3 Avantages des fibres naturelles dans le refroidissement par évaporation

- **Haute rétention d'humidité :** les fibres naturelles retiennent efficacement l'eau, assurant une évaporation soutenue et des effets de refroidissement prolongés [39].
- **Flux d'air amélioré :** la structure poreuse des fibres naturelles favorise la circulation de l'air, facilitant un échange thermique efficace et maximisant l'efficacité du refroidissement [39][40].
- **Durable et renouvelable :** dérivées de sources végétales, les fibres naturelles s'alignent sur les principes de durabilité et d'économie circulaire, minimisant ainsi l'impact environnemental [41].
- **Biodégradabilité :** à la fin de leur cycle de vie, les fibres naturelles se décomposent naturellement, réduisant ainsi les déchets mis en décharge et soutenant l'équilibre écologique [42].
- **Confort thermique :** les systèmes de refroidissement par évaporation intégrant des fibres naturelles offrent aux occupants un environnement intérieur confortable, caractérisé par des températures réduites et une qualité de l'air améliorée [41].

II.4 Fibres végétales utilisées dans les terres arides

Plant fibers such as cotton, eucalyptus leaves, palm fibers, and jute play a critical role in evaporative cooling in arid lands by absorbing and distributing water, enhancing the efficiency of heat dissipation through evaporation, and contributing to the overall effectiveness and sustainability of cooling systems [43].

II.4.1 Cotton

Le coton, dérivé du genre végétal *Gossypium*, est réputé pour sa grande capacité d'absorption de l'humidité et sa respirabilité. Dans les applications de refroidissement par évaporation, les fibres de coton agissent comme des réservoirs d'eau, retenant efficacement l'humidité et facilitant l'évaporation progressive. Ce processus abaisse non seulement la température de l'air ambiant mais améliore également le confort des occupants [44].

II.4.1.1 Propriétés chimiques du coton

Les fibres de coton sont principalement composées d'alpha-cellulose (88,0 à 96,5%), avec des composants non celluloses tels que les protéines, les cires, les pectines, les substances inorganiques, et autres. La composition chimique spécifique des fibres de coton varie selon les variétés, les environnements de croissance et le stade de maturité. Les parois cellulaires primaires des fibres de coton contiennent moins de 30% de cellulose, tandis que la paroi cellulaire secondaire est presque entièrement composée de cellulose. Les composants non celluloses évoluent pendant l'allongement des fibres et la transition vers la paroi secondaire, avec des techniques analytiques telles que FTIR/ATR, DSC, TGA et pyrolyse-GC/MS permettant leur identification [45]. La figure II-8 montre les propriétés chimiques du coton :

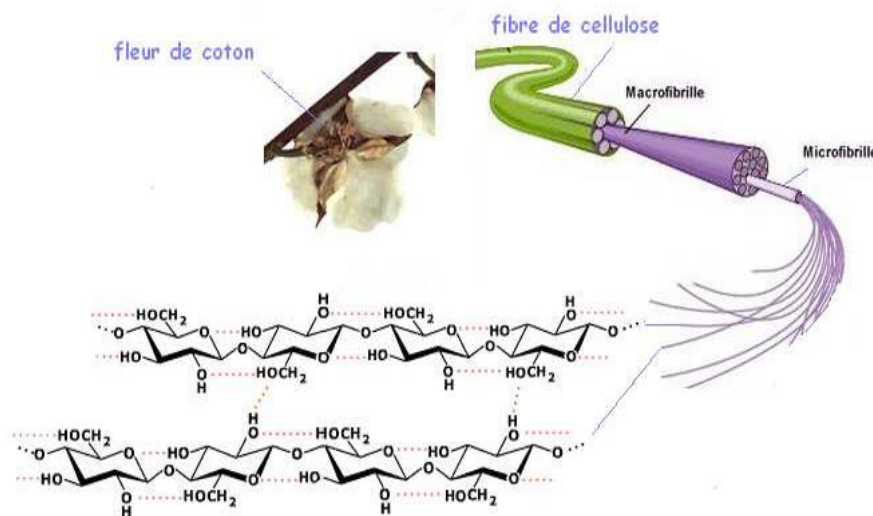


Figure II-8 : Propriétés chimiques du coton [49].

II.4.1.2 Composition de la paroi cellulaire du coton

1. Microfibrilles de cellulose : Composant prédominant de la paroi cellulaire du coton, les microfibrilles de cellulose sont des polymères linéaires composés d'unités de glucose liées par des liaisons β -1,4-glycosidiques [50]. Ces microfibrilles forment l'échafaudage de la paroi cellulaire, apportant rigidité et résistance à la traction [51].

2. Hémicellulose : Intercalées parmi les microfibrilles de cellulose, les molécules d'hémicellulose servent d'agents de réticulation, liant les microfibrilles adjacentes entre elles et contribuant à la cohésion et à la stabilité globales de la paroi cellulaire [51].

3. Lignine : Polymère phénolique complexe, la lignine agit comme un matériau de ciment, remplissant les espaces entre les fibres de cellulose et fournissant un soutien et une résistance supplémentaires à la compression [53].

II.4.1.3 Structure de la paroi cellulaire du coton

La paroi cellulaire du coton présente une organisation hiérarchique, comprenant des couches primaires et secondaires ayant des propriétés et des fonctions distinctes.

- 1. Paroi cellulaire primaire** : couche la plus externe de la paroi cellulaire du coton, la paroi primaire se caractérise par sa flexibilité et son extensibilité, permettant l'élongation et l'expansion des cellules pendant la croissance [55]. Il se compose principalement de microfibrilles de cellulose enrobée dans une matrice d'hémicellulose et de pectine [52].
- 2. Paroi cellulaire secondaire** : sous la paroi primaire se trouve la paroi cellulaire secondaire, qui se forme après la fin de l'élongation cellulaire. La paroi secondaire est plus épaisse et plus rigide que la paroi primaire, en raison d'une teneur plus élevée en cellulose et du dépôt supplémentaire de lignine [56]. Cette couche fournit un support structural et détermine les propriétés mécaniques de la fibre de coton mature [57] [54].

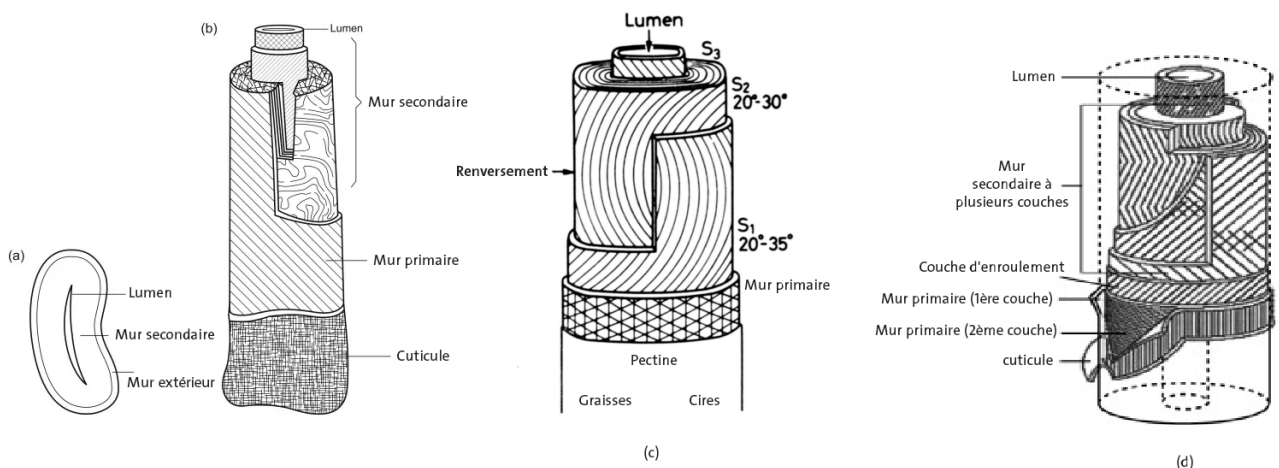


Figure II-9 : Structure physique de la fibre de coton, (a) Coupe transversale du coton, (b) section verticale du coton. (c) Structure morphologique de la fibre de coton, (d) représentation schématique de la fibre de coton montrant ses différentes couches [58].

La paroi cellulaire de base du coton représente une merveille d'ingénierie naturelle, avec sa composition complexe et sa structure hiérarchique conférant résistance, flexibilité et pouvoir absorbant à la fibre.

II.4.2 Fibres de palme

Les fibres de palmier, dérivées de diverses espèces de palmiers répandues dans les régions arides, présentent d'excellentes propriétés d'évacuation de l'humidité et une excellente résistance structurelle.

Lorsqu'elles sont incorporées dans des coussins ou des tapis de refroidissement par évaporation, les fibres de palme facilitent la répartition uniforme de l'eau, optimisant ainsi le processus d'évaporation. De plus, la résilience naturelle des fibres de palme garantit la longévité et la durabilité du système de refroidissement [47].

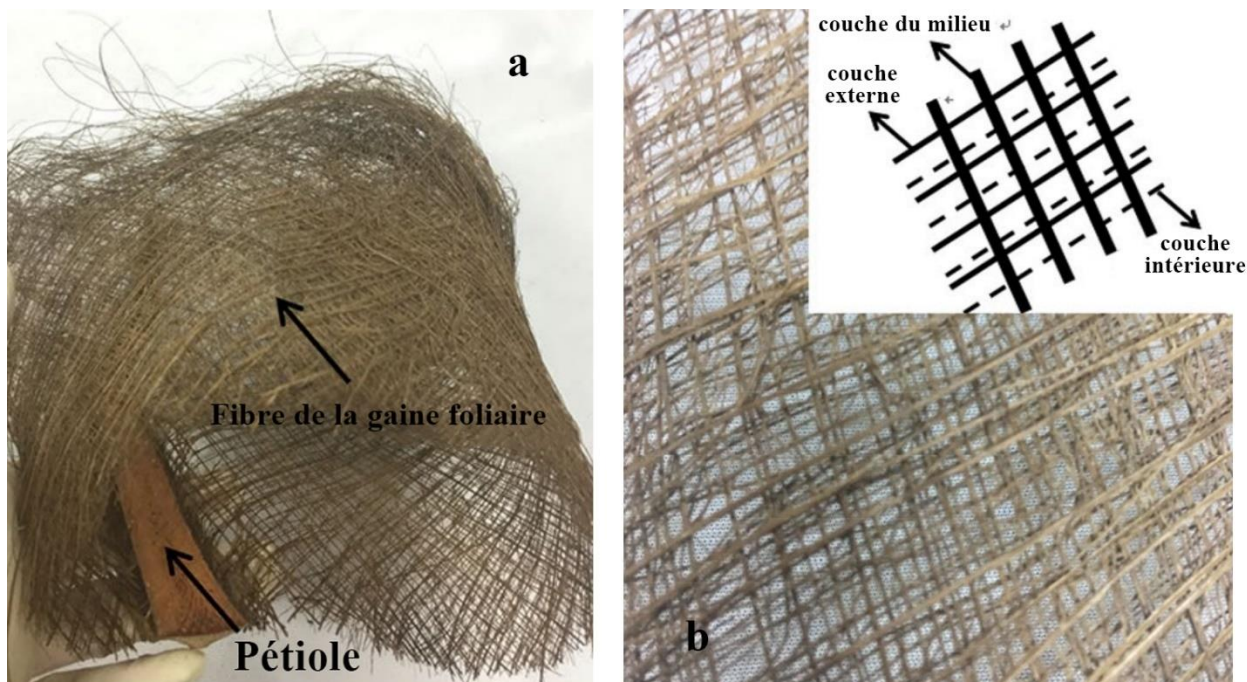


Figure II-10 : Une fibre de palmier avec sa gaine et un petit morceau de gaine foliaire montrant la disposition des différentes couches d'un faisceau de fibres, avec des photographies en médaillon montrant une vue schématique de la disposition des fibres [61].

II.4.2.1 Propriétés chimiques des fibres de palmier

Les propriétés chimiques des fibres de palme font référence aux caractéristiques et aux comportements chimiques des composants qui constituent ces fibres, notamment la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, ainsi que d'autres composants mineurs tels que les protéines et les cires. Ces propriétés comprennent la résistance aux produits chimiques, la réactivité chimique, la compatibilité avec les polymères, la dégradation chimique et la réactivité à la teinture [59].

Les fibres de palmier ont une concentration élevée de cellulose de 28 à 53 %, ce qui explique la longue chaîne de fibres [60]. Le tableau II.5 présente les résultats de l'analyse chimique des fibres de palme.

Tableau II.5 : Propriétés chimiques des fibres de palmier [60].

Fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Wax (%)
Fruit de palme	53	12	21	0.8
Pétiole du palmier	30	14	28	-

Gaine en feuille de palmier	28	25	45	-
Tige de feuille de palmier	40-52	42-43	-	-

La figure II-11 montre les propriétés chimiques des fibres de palmier :

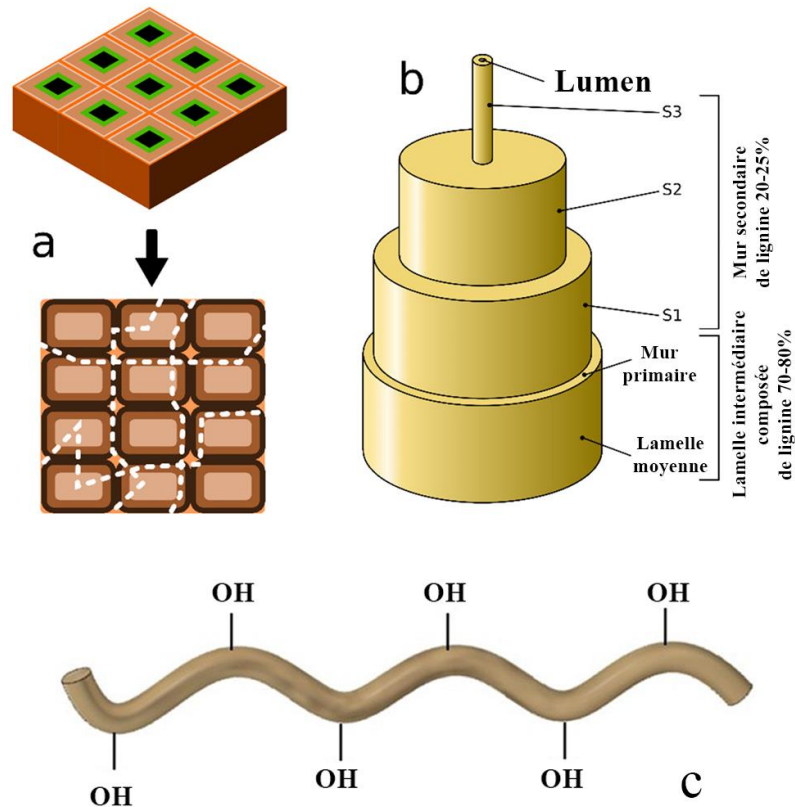


Figure II-11 : (a) Le mécanisme par lequel les fibres sont séparées lors de la fibrillation mécanique et (b) un diagramme de la structure des fibres naturelles, (c) une fibre de palme avec des liaisons chimiques [62].

II.4.2.2 Composition de la paroi cellulaire des fibres de palme

- 1. Microfibrilles de cellulose :** Semblables à d'autres fibres végétales, les microfibrilles de cellulose constituent la structure fondamentale des parois cellulaires des fibres de palmier. Composées de chaînes linéaires de molécules de glucose liées par des liaisons β -1,4-glycosidiques, les microfibrilles de cellulose offrent une résistance à la traction et une intégrité structurelle [63].
- 2. Hémicellulose :** Intercalées parmi les microfibrilles de cellulose, les molécules d'hémicellulose agissent comme des agents de réticulation, liant les microfibrilles adjacentes entre elles et améliorant la cohésion et la flexibilité de la paroi cellulaire [63].
- 3. Lignine :** Bien que les fibres de palmier contiennent généralement une teneur en lignine inférieure à celle des fibres de bois dur, la lignine joue toujours un rôle crucial en offrant une résistance à la compression et en améliorant la rigidité globale de la paroi cellulaire [64].

Figure II-12 Schéma de la composition chimique de la surface des fibres de palme :

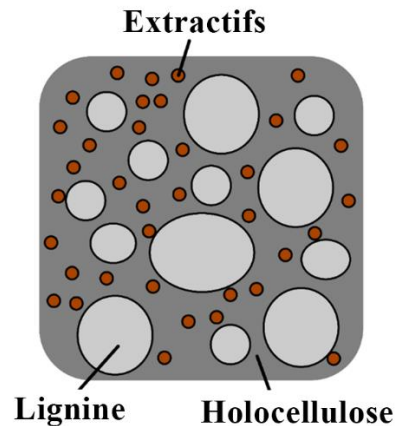


Figure II-12 : Schéma de composition chimique de la surface des fibres de palme [62].

II.4.2.3 Structure de la paroi cellulaire des fibres de palme

Les fibres de palme tirent leur résistance de la cellulose, formant des microfibrilles disposées en parallèle. Les hémicelluloses, moins ordonnées, agissent comme une matrice amorphe, conférant flexibilité et cohésion. La lignine agit comme un ciment entre les cellules végétales, augmentant la rigidité et la durabilité, tandis que les pectines favorisent la cohésion cellulaire. Enfin, les protéines et les cires, en quantités variables, peuvent influencer l'adhérence et la réactivité chimique de la paroi cellulaire [63] :

- 1. Paroi cellulaire primaire** : Couche la plus externe des parois cellulaires des fibres de palmier, la paroi primaire se caractérise par sa flexibilité et son extensibilité, permettant l'élongation et l'expansion des cellules pendant la croissance [65]. Il se compose principalement de microfibrilles de cellulose enrobée dans une matrice d'hémicellulose et de pectine [64].
- 2. Paroi cellulaire secondaire** : Sous la paroi primaire se trouve la paroi cellulaire secondaire, qui se forme après la fin de l'élongation cellulaire. La paroi secondaire est plus épaisse et plus rigide que la paroi primaire, en raison d'une teneur plus élevée en cellulose et du dépôt supplémentaire de lignine. Cette couche fournit un support structurel et détermine les propriétés mécaniques de la fibre de palmier mature [66].

II.4.3 Jute

Le jute, une fibre naturelle polyvalente dérivée du genre végétal *Corchorus*, possède une structure poreuse et une grande capacité d'absorption de l'humidité. Dans les applications de refroidissement par évaporation, les fibres de jute servent de mèches efficaces, puisant l'eau des réservoirs et la distribuant uniformément sur les surfaces de refroidissement. Cela favorise une évaporation efficace et garantit des performances de refroidissement constantes [48].

II.4.3.1 Propriétés chimiques du Jute

Les propriétés chimiques des fibres de jute font référence aux caractéristiques et aux comportements chimiques des composants qui constituent ces fibres, notamment la cellulose, les hémicelluloses, la lignine et d'autres composants mineurs tels que les protéines et les cires. Ces propriétés comprennent la réactivité chimique, la compatibilité avec les polymères, la résistance aux produits chimiques et la dégradation chimique [63].

- Les fibres de jute sont de nature polaire et hydrophile en raison de la présence d'hydroxyles et d'autres groupes contenant de l'oxygène [67].
- La nature hydrophile de la fibre de jute est due à la présence de cellulose. La fibre de jute a une teneur en humidité comprise entre 5 et 13.% [67].
- Les dimensions de la fibre de jute changent avec le changement de l'humidité contenue. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les polymères de la paroi cellulaire contiennent –OH et d'autres groupes oxygène qui attirent l'humidité par liaison hydrogène [67].
- La dégradation thermique des fibres est un processus en deux étapes : la dégradation de l'hémicellulose (220-280°C) et la dégradation associée à la lignine (280-300°C). À une température de traitement plus élevée (au-dessus de 250°C), la fibre de jute ne risque pas de se dégrader [67].
- Le renforcement des fibres cellulosiques et thermoplastiques provoque une mauvaise dispersion des fibres en raison des liaisons hydrogène entre fibres responsables du maintien des fibres ensemble [67].

Le tableau II.6 présente les propriétés chimiques et mécaniques de la fibre de jute :

Tableau II.6 : Propriétés chimiques et mécaniques de la fibre de jute [67].

Propriétés	Fibre de jute
Cellulose (%)	64.4
Hémicellulose (%)	12
Lignine (%)	11.8
Pectine (%)	0.2
Wax (%)	0.5

La figure II-13 montre les propriétés et structure d'une plante de jute et fibre de jute :

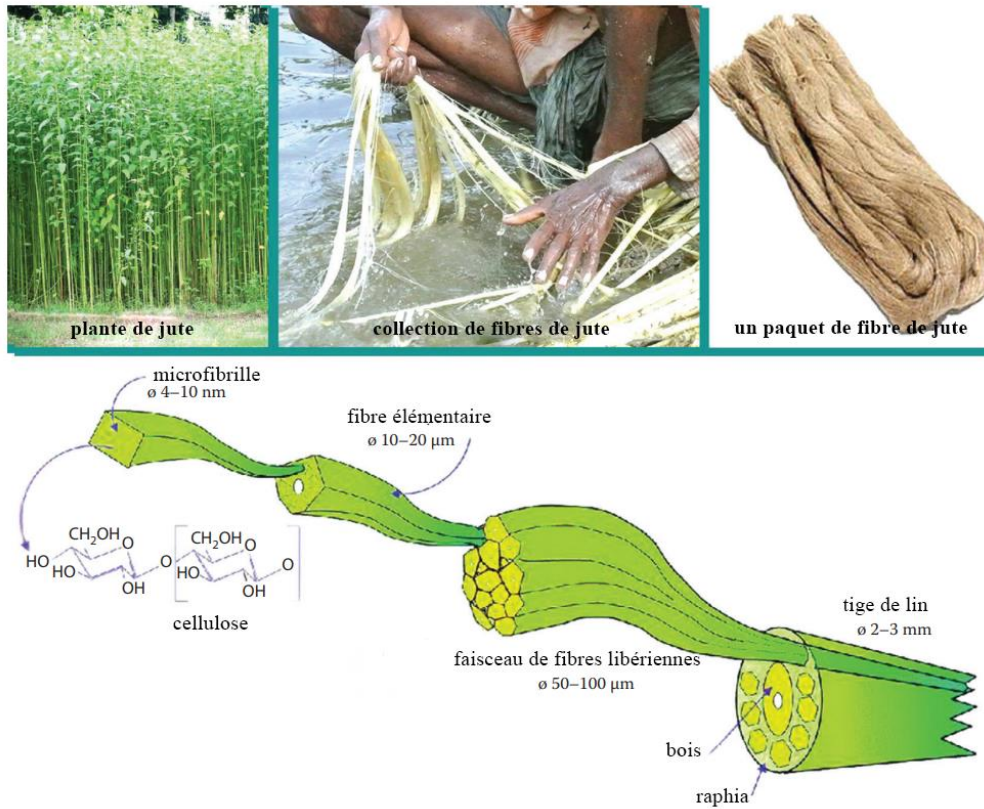


Figure II-13 : Les propriétés et structure d'une plante de jute et fibre de jute [68].

II.4.3.2 Composition de la paroi cellulaire du jute

1. **Microfibrilles de cellulose** : Le principal constituant des parois cellulaires des fibres de jute est la cellulose, disposée sous forme de microfibrilles. Les microfibrilles de cellulose confèrent résistance et rigidité à la fibre, formant l'épine dorsale structurelle de la paroi cellulaire [57].

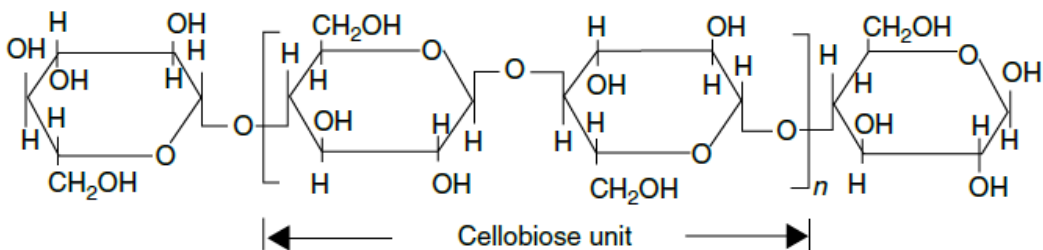


Figure II-14 : Structure chimique de l'alpha cellulose [69].

2. **Hémicellulose** : Mélangées aux microfibrilles de cellulose, les molécules d'hémicellulose agissent comme des agents de réticulation, améliorant la cohésion et la flexibilité de la paroi cellulaire. L'hémicellulose contribue à l'intégrité globale de la fibre de jute[57]. Dans la figure II-15, ravis en revue la composition chimique des fibres de jute hémicellulosique :

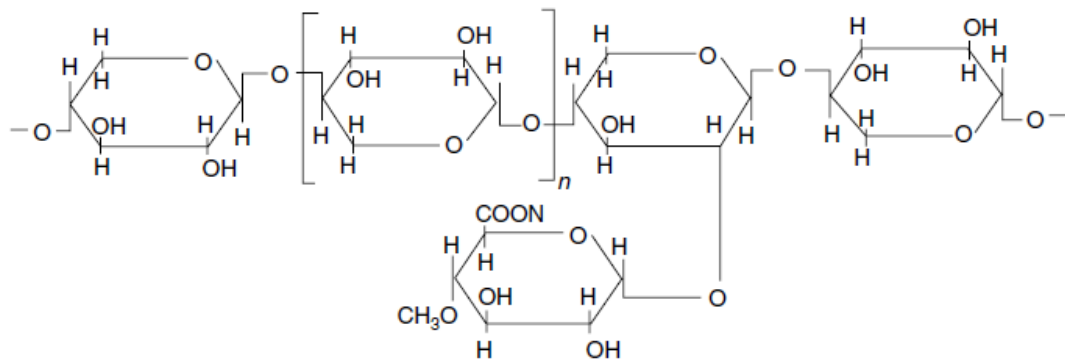


Figure II-15 : Structure chimique de l'hémicellulose [69].

- Lignine :** Bien que présente en plus petites quantités que les fibres de bois, la lignine se trouve également dans les parois cellulaires des fibres de jute. La lignine sert à fournir un support structurel supplémentaire et une résistance à la compression [57].

II.4.3.3 Structure de la paroi cellulaire du jute

La fibre de jute est une fibre multicellulaire. Il est formé comme une gaine cylindrique constituée de fibres simples reliées entre elles par un réseau tridimensionnel de haut en bas de la vapeur.

- Paroi cellulaire primaire :** La couche la plus externe de la paroi cellulaire en fibre de jute est la paroi primaire, caractérisée par sa flexibilité et son extensibilité. Il se compose principalement de microfibrilles de cellulose enrobée dans une matrice d'hémicellulose et de pectine. La paroi primaire permet l'élongation et l'expansion cellulaire au cours de la croissance [57].
- Paroi cellulaire secondaire :** Sous la paroi primaire se trouve la paroi cellulaire secondaire, qui se forme après la fin de l'élongation cellulaire. La paroi secondaire est plus épaisse et plus rigide que la paroi primaire, permettant une teneur plus élevée en cellulose et le dépôt de lignine supplémentaire. Cette couche fournit un support structurel et détermine les propriétés mécaniques de la fibre de jute mature [57].

A travers les figures II-16-17 nous illustrons la structure morphologique des fibres de jute :

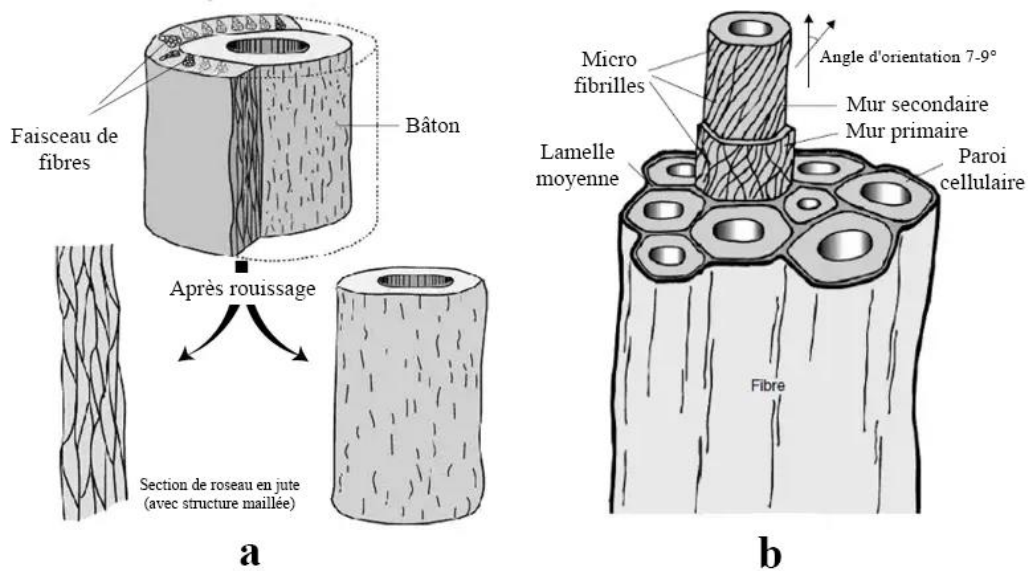


Figure II-16 : (a) Désintégration d'une tige de jute en un roseau de jute
 (b) Morphologie des fibres de jute : microstructure [70] [71].

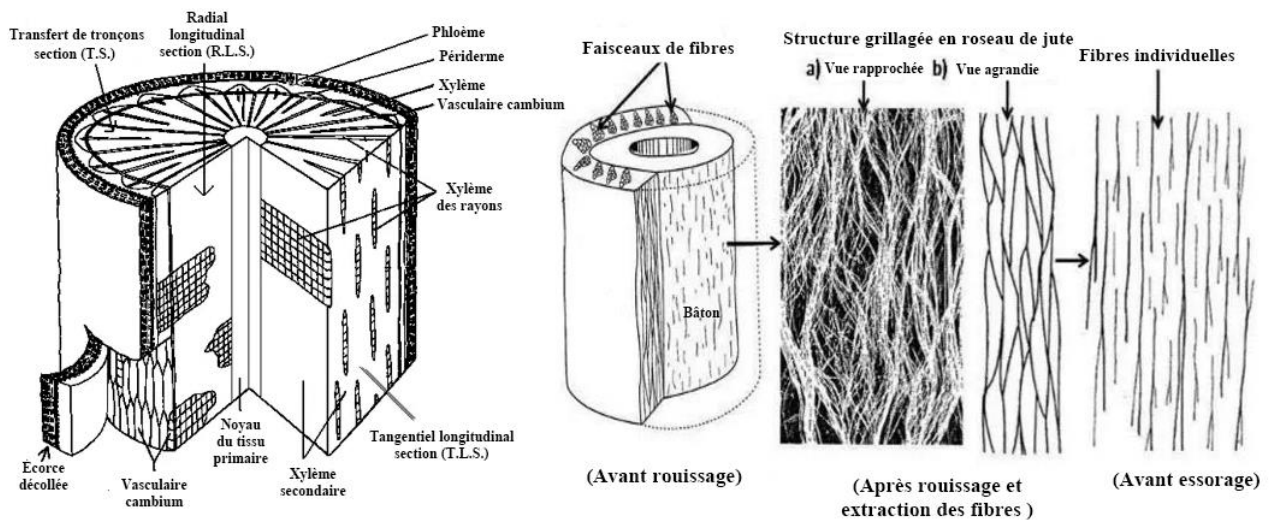


Figure II-17 : microscopique (coupe transversale et longitudinale) de la fibre de jute [72].

Les deux figures montrent la structure macroscopique et micro structurale des fibres de jute. Macroscopiquement, les fibres de jute sont multicellulaires, constituées d'une écologie de 5 à 15 cellules de ciment maintenues ensemble par des matériaux intercellulaires, principalement non celluloses [72]. Chaque cellule possède une sous-cellule plate et un éclairage central, avec une structure en forme de valve et une section transversale polygonale. Dans un microscope, la partie cellulaire de chaque cellule primaire est constituée d'un filament primaire externe et d'une partie secondaire interne de microfilaments ultrafins. Dans la brouette I, les microfibrilles sont disposées en quinconce, tandis que dans le brouette II, elles sont disposées parallèlement en hélices droites [71].

II.5 Conclusion

L'exploration des fibres végétales naturelles révèle une riche tapisserie de propriétés chimiques et de complexités structurelles qui contribuent à leurs diverses fonctionnalités. De la composition riche en cellulose du coton à la structure lignocellulosique des fibres de palmier et à la nature multicellulaire du jute, chaque fibre présente des caractéristiques uniques qui la rendent adaptée à des applications spécifiques. Les avantages des fibres naturelles dans le refroidissement par évaporation et leur utilité dans les régions arides soulignent leur importance dans les efforts de développement durable. En exploitant les propriétés inhérentes de ces fibres, nous pouvons non seulement améliorer les pratiques traditionnelles, mais également innover de nouvelles solutions qui répondent aux défis contemporains tout en favorisant la durabilité environnementale. Ainsi, l'étude des fibres végétales offre non seulement des connaissances scientifiques, mais également des pistes pratiques pour faire progresser les programmes de développement durable dans le monde entier.

Chapitre III

Montage Expérimental et Formulation Mathématique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'expérience de mise en œuvre d'un système d'évaporation directe (DEC) dans une pièce d'une superficie de 1 m^3 . L'objectif de cette expérience est de mesurer et d'analyser les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du système DEC, ce qui permet de mieux comprendre les performances et l'efficacité du système en matière de refroidissement.

III.2 Description du système

La conception schématique du système proposé est illustrée à la figure III.1 qui consiste en un système direct

Le refroidisseur évaporatif (DEC) étudié dans cette étude.

Comme le montre la figure ci-dessous, l'air chaud entre par le ventilateur pour passer par le refroidissement humide.

Des tampons de certaines des fibres utilisées dans l'expérience sont insérés dans le DEC et sont maintenus humides en faisant constamment couler de l'eau sur leurs bords supérieurs.

En échangeant de la chaleur et de la masse entre l'air chauffé et les coussinets humides, la température de l'air baisse à nouveau tandis que l'humidité relative augmente. Après ce processus d'évaporation, de l'air frais pénètre dans la pièce. L'eau qui mouille les coussinets du DEC circule en boucle fermée, le réservoir d'eau est supposé isolé et le transfert de chaleur entre celui-ci et le milieu environnant est négligeable.

L'étude actuelle analyse et évalue les performances du système de refroidissement par évaporation directe.

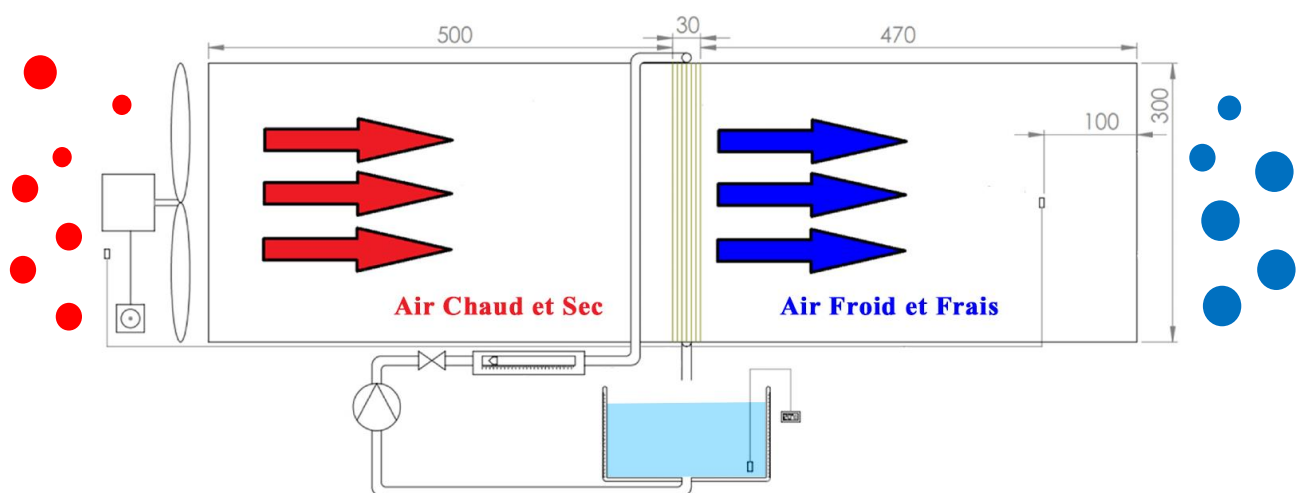


Figure III-1 : Schéma de la configuration expérimentale DEC [13].

III.3 Description du montage expérimental

Un dispositif expérimental a été réalisé dans un laboratoire d'innovation Spatiale, Département de Automatique et d'Electromécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Ghardaïa, pour poursuivre nos études et expérimentations.

Cette configuration expérimentale consiste en un canal maillé rectangulaire avec une section carrée de 0,09 (m²) et une longueur totale de refroidisseur par évaporation directe (DEC) de 1 m. Une couche de polystyrène de 20 (mm) d'épaisseur est utilisée comme isolant pour réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur.

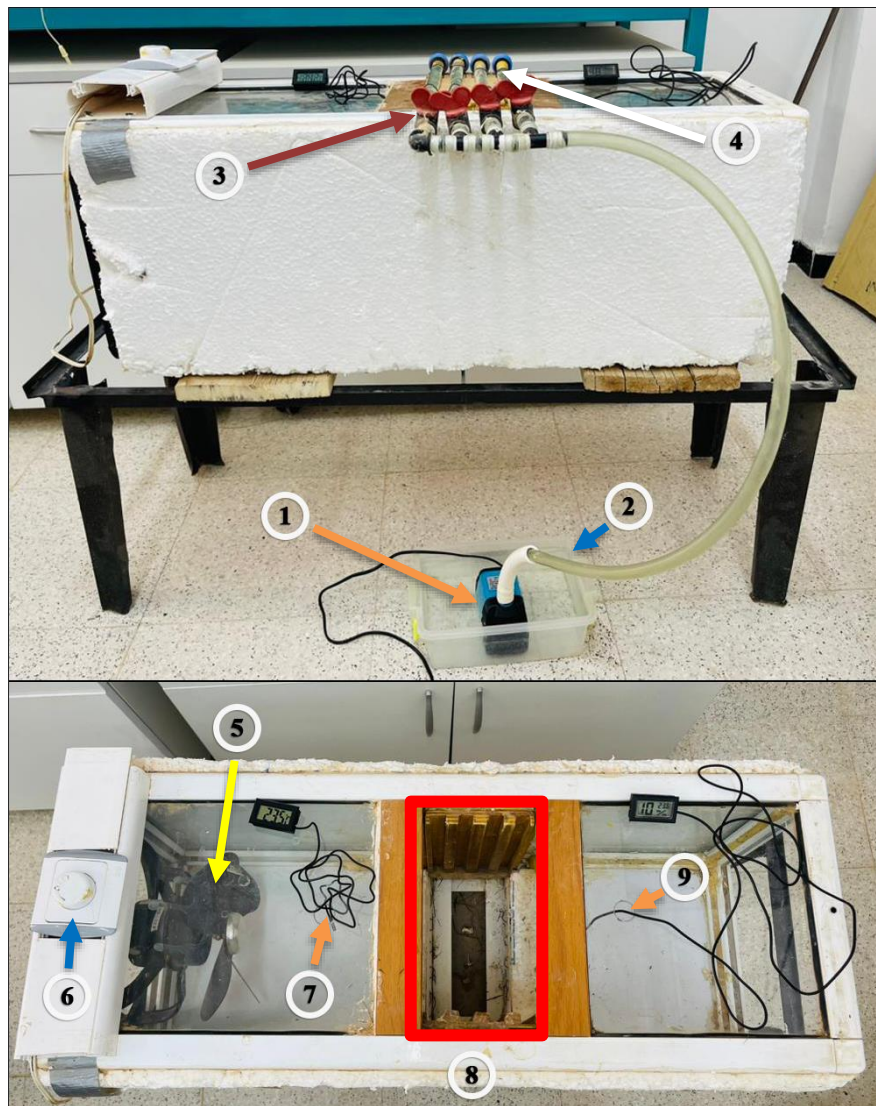


Figure III-2 : Une image de la plateforme du système DEC et de ses composants réalisés au laboratoire de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Ghardaïa.

La plate-forme d'essai de refroidissement par évaporation directe comprend tous les composants qui composent ce système qui fonctionne en faisant couler de l'eau avec le système d'irrigation. Dans le tableau III.1, nous montrons les composants qui composent ce système utilisé lors de notre expérience.

Tableau III.1 : Composants de la plate-forme du système d'évaporation directe DEC utilisée dans notre essai.

1	Pompe	6	Régulateur
2	Réservoir	7	Capteur de température (intérieur)
3	Vannes	8	Les unités d'oreiller utilisées dans quelle les fibres
4	Système de pulvérisation d'eau	9	Capteur de température (extérieur)
5	Ventilateur		

Grâce à cette expérience, les unités d'oreiller utilisées dans cette étude ont été placées à une distance de 45 cm de l'entrée du canal DEC. Elles sont composées de couches de fibres de palmier, de toile de jute et de coton, avec différentes épaisseurs de 30 (mm); Pour obtenir une épaisseur de 30 (mm), un de chaque tampon est inséré dans des épaisseurs de 30 (mm) ; Avec des dimensions de 0,26 x 0,17 (m). La principale raison du choix des matériaux ci-dessus est qu'il s'agit de fibres naturelles locales, mais aussi pour leur disponibilité, leur durabilité et leur recyclabilité, en plus de leur forte absorption d'eau et de leur forte capacité de rétention d'eau, et enfin de leur faible prix.

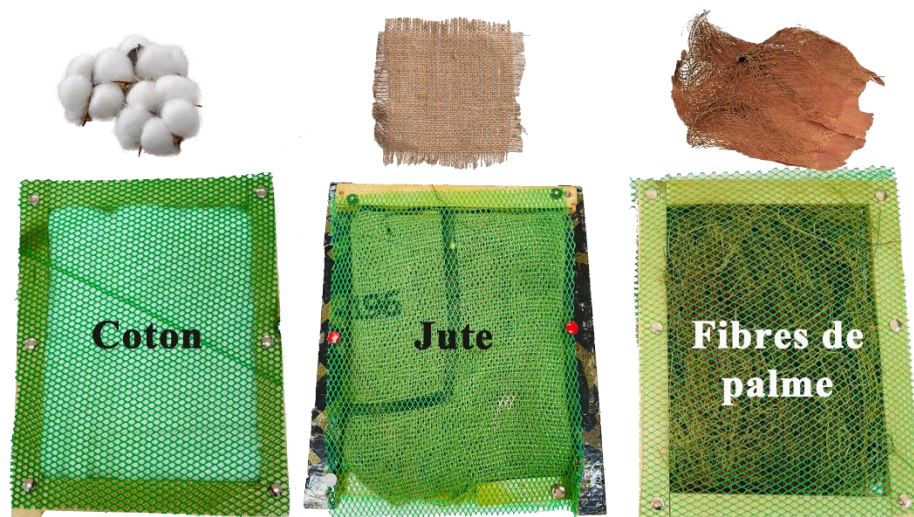


Figure III-3 : Matériaux utilisés dans les modules de coussinets : coton, fibres de palmier dattier, tissu de jute.

Cette expérience a été menée au laboratoire d'innovation Spatiale, département d'automatique et Electromécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Ghardaïa. Les tampons sont testés et placés à 50 cm de l'entrée du canal.

Le flux d'air ambiant est aspiré dans le canal rectangulaire par un ventilateur soufflant. Ce ventilateur est contrôlé par un potentiomètre gradué pour donner une plage de débit massique d'air d'admission comprise entre 0,236 et 0,410 kg/sec .

L'arrosage des pads a été réalisé de manière uniforme à l'aide d'un tube collecteur, pour faire circuler de l'eau à température ambiante. Le processus se fait en prélevant l'eau du réservoir au moyen d'une pompe et en la remontant vers le haut. L'eau qui a été évacuée dans le même réservoir est récupérée .

Les différents paramètres mesurés et calculés sont : l'humidité relative d'entrée l'humidité, relative de sortie, la température à l'entrée, la température de sortie, le débit massique d'air, la consommation d'énergie et la quantité d'eau évaporée .

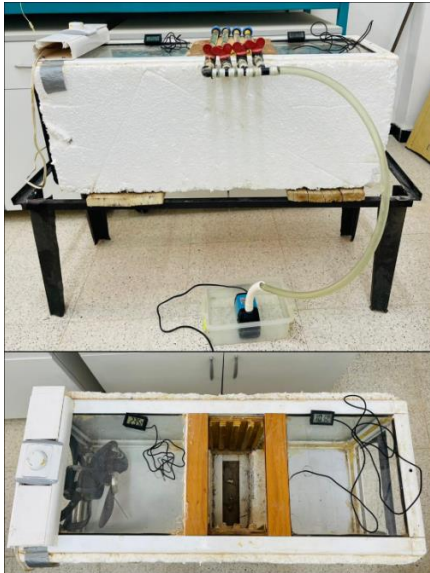
Un anémomètre est utilisé pour mesurer les vitesses moyennes du flux d'air. Le réservoir de collecte d'eau est gradué pour mesurer les quantités d'eau évaporée .



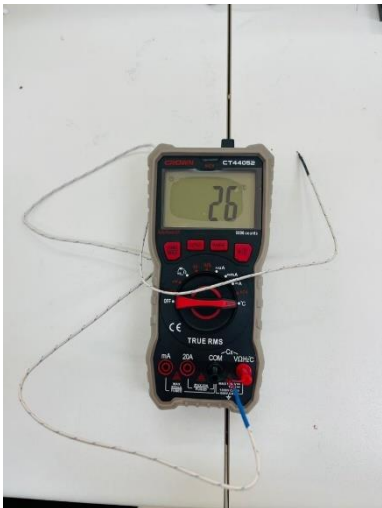
Le tableau III.2 présente les caractéristiques techniques des instruments de mesure utilisés dans la configuration expérimentale du DEC.




III.4 Instrumentation


Spécifications techniques des éléments et instruments de mesure utilisés sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Spécifications techniques des éléments et instruments de mesure utilisés.

Les Éléments	Spécifications techniques	Les Images des éléments
<p>Refroidisseur par évaporation directe - DEC</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Configuration: Tunnel rectangulaire horizontal. • Matériau du tunnel : ✓ Plexiglas (épaisseur 0,004 m). ✓ Polystyrène (épaisseur 0,02 m). ✓ Longueur du tunnel rectangulaire : 0,8 (m). ✓ Largeur du tunnel rectangulaire 0,3 (m). ✓ Hauteur du tunnel rectangulaire 0,3 m ✓ Dimensions du tampon (fibres) : (0,3 x 0,3) m² 	

<p>Ventilateur pour l'extraction d'air (Air évacué)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modèle : L300 ✓ Tension : 220 V ✓ Puissance : 130 W ✓ Vitesse de rotation : 1400 r/min ✓ Fréquence : 50 Hz ✓ Dimensions : 0,3x0,3 (m²). 	
<p>Pompe pour faire circuler L'eau</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Marque : Asaman, Modèle : AS-1020 ✓ Tension : 220 V ✓ Fréquence : 50Hz ✓ Puissance : 25 W ✓ Courant : 0,25 A ✓ Qmax : 1000 L/h ✓ Hmax : 1.8 m 	
<p>Multimètre Digital 1000v</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modèle : Multimètre Digital 1000v CT44052 – CROWN ✓ Tension AC : volt max 750V ✓ Tension AC : résolution maximale 0,1mV ✓ Tension DC : volt max 1000V ✓ Tension DC : résolution maximale : 0,1mV ✓ AC actuel : ampères max : 20A ✓ AC actuel : résolution maximale :0,1μA ✓ Courant DC : ampères max : 20A ✓ DC actuel : résolution maximale 01,μA ✓ Résistance : résistance maximale 60MΩ ✓ Résistance : résolution maximale 0,1Ω ✓ Capacité : capacité maximale : 100mF ✓ Capacité : résolution maximale 0,001nF ✓ Fréquence : fréquence max : 10MHz ✓ Fréquence : résolution maximale 0,001Hz ✓ Écart de température -20 °C à +1000 °C ✓ Dimension du pack : 22 x 14 x 7 cm 	

<p>Thermomètre Digital</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Model : TPM-10 LCD thermomètre numérique hygromètre température humidité capteur mètre voiture incubateur Aqua Station météo testeur ✓ Plage de température : $-50^{\circ}\sim+110^{\circ}$ ✓ Précision de mesure : $\pm 1\sim 2^{\circ}$ environ ✓ Résolution : $0,1^{\circ}$ ✓ Temps de mise à jour de la température : environ 2 secondes ✓ Dimension : 48 x 28 x 15 mm ✓ Taille du trou intégré : 46 x 27 x 14 mm ✓ Environnement : température : $0^{\circ}\sim+60^{\circ}$ ✓ Humidité : 5 % à 80 % 	
<p>L'hygromètre numérique mesure l'humidité (panneau thermomètre air relatif)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Model : Thermomètre hygromètre numérique LCD de 10 % à 99 % d'humidité relative à la température et au pyromètre - Contrôleur d'humidité - Capteur de transit - Mesure de la météo ✓ Plage de température : $-50^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ ✓ Précision de la température : $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ✓ Mesure de l'humidité : 10 % RH-99 % RH ✓ Résolution de l'humidité : 1 % RH ✓ Précision de l'humidité : $\pm 5\%$ 	
<p>Un thermomètre pour mesurer la température de l'eau</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Thermomètre de cuisine digital à sonde ✓ Affichage $^{\circ}\text{C}$ et $^{\circ}\text{F}$ ✓ Amplitude : $-50+200^{\circ}\text{C} / -58+392^{\circ}\text{F}$ ✓ Longueur sonde : 125 mm ✓ Diamètre sonde : 3.5 mm ✓ Résolution affichage : 0.1° 	

Interrupteur de contrôle de la vitesse du ventilateur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tension d'entrée : 220 V . ✓ Tension de sortie : AC0-220V ✓ Puissance maximale : 4000W ✓ Taille : 10,1 x 9,6 x 4,5 cm ; 80 grammes ✓ Poids : 80 g 	
---	---	---

III.5 Modélisation mathématique du DEC

Le modèle mathématique suivant se concentre sur le transfert de chaleur et de masse du DEC dans lequel les coussinets de refroidissement sont constitués de fibres naturelles locales. Pour clarifier le processus de transfert de chaleur et de masse, les hypothèses suivantes ont été prises en considération:

- ✓ La température de l'interface eau-air est supposée uniforme et constante.
- ✓ Le transfert de chaleur par convection (h_c) de l'air humide à la surface du film d'eau est constant.
- ✓ Le matériau du tampon est entièrement et continuellement mouillé.
- ✓ L'air à proximité de l'interface eau-air est saturé, sa température est supposée égale à celle de l'eau qui s'égoutte.
- ✓ Les propriétés thermiques de l'eau et de l'air sont constantes.
- ✓ Les transferts de flux thermiques environnants sont négligés.
- ✓ La température de l'air ne change que dans le sens d'écoulement indiqué par les cercles de couleur bleue sur la figure III.1.

III.5.1 Analyse des performances du DEC

1. Configuration expérimentale et paramètres

Avant de plonger dans les équations, nous nous sommes assurés de mesurer et d'enregistrer les paramètres suivants pendant l'expérience:

- ✓ Températures initiales et finales de l'air et de l'eau.
- ✓ Humidité de l'air (initiale et finale).
- ✓ Débit d'air à travers le système.
- ✓ Surface de fibres naturelles utilisées.
- ✓ Volume d'eau évaporée.
- ✓ La période de temps de l'expérience.
- ✓ Capacités thermiques spécifiques de l'air et de l'eau.
- ✓ Conditions ambiantes (température et humidité).

2. Équations et concepts clés

- **Calculs de transfert de chaleur**

Chaleur absorbée par l'air :

$$Q_{air} = m_{air} \times c_{air} \times \Delta T_{air} (T_{int} - T_{ext}) \times t \quad \text{III.1}$$

Dans lequel :

- Q_{air} : C'est la chaleur absorbée par l'air (Joules).
- m_{air} : est la masse de l'air (peut être dérivée du débit d'air et de la densité de l'air) (kg).
- c_{air} : est la capacité thermique spécifique de l'air.
- ΔT_{air} : est le changement de température de l'air (C°).

Chaleur nécessaire pour évaporer l'eau :

$$Q_{evap} = m_{eau} \times L_v \quad \text{III.2}$$

Dans lequel :

- Q_{evap} : est la chaleur nécessaire à l'évaporation (Joules).
- m_{eau} : est la masse d'eau évaporée (kg).
- L_v : est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).

- **Taux d'évaporation**

La vitesse à laquelle l'eau s'évapore peut-être déterminée par :

$$\dot{m}_{evap} = \frac{m_{eau}}{t} \quad \text{III.3}$$

Dans lequel :

- \dot{m}_{evap} : est le taux d'évaporation (L/min) .
- t : est la durée de l'expérience (min).
- **Capacité de refroidissement sensible du DEC**

$$Q_s = \dot{m}_{air} \times C_{p_{air}} \times (T_{int} - T_{ext}) \quad \text{III.4}$$

Avec :

\dot{m}_{air} : Est le débit massique de l'air d'admission (Kg/s)

$C_{p_{air}}$: Est la chaleur spécifique de l'air d'admission (KJ/Kg °C)

Débit massique d'air : $\dot{m}_{air} = \rho_{air} \times \dot{V}_{air} \times S \quad \text{III.5}$

Dans lequel :

- \dot{m}_{air} : est le débit massique de l'air (Kg/s).
- ρ_{air} : est la densité de l'air (kg/m³).
- \dot{V}_{air} : est le débit volumétrique de l'air (m/s).
- S : Surface (m²).

$$V = \sqrt{2 \times \frac{\Delta P}{\rho}} \quad \text{III.6}$$

- ΔP : Différence de pression [Pas].

3. Mesures d'efficacité et de performance

- **Efficacité de refroidissement**

L'efficacité de refroidissement du système peut être définie comme :

$$\eta_{refroid} = \frac{Q_{air}}{Q_{evap}} \times 100\% \quad \text{III.7}$$

- **Efficacité du système de refroidissement**

L'efficacité peut être calculée en utilisant la chute de température obtenue par rapport à la chute de température maximale possible (c'est-à-dire la différence de température du bulbe humide) :

$$\epsilon = \frac{T_{int} - T_{ext}}{T_{int} - Th} \quad \text{III.8}$$

Dans lequel :

- T_{int} : est la température de l'air d'entrée °C.
- T_{ext} : est la température de l'air de sortie °C.
- Th : Température humide de l'air °C.
- **L'efficacité énergétique**

$$EER = \frac{Q_s}{W_f \times W_p} \quad \text{III.9}$$

Avec :

W_f : est la puissance du ventilateur (W).

W_p : est la puissance de la pompe (W).

III.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale du refroidisseur par évaporation directe et son étude de modélisation numérique. Le but est de prédire la température à la sortie DEC .

Par conséquent, compte tenu des expériences qui ont été menées et de ce qui a été tiré des équations du système mentionnées plus tôt dans ce chapitre, les principaux critères sur lesquels il

convient de se concentrer et qui affectent les performances globales du système proposé sont la température ambiante externe, la vitesse de l'air, et le type de matériau utilisé dans l'unité de panneau, et son épaisseur. Enfin, le prochain chapitre sera consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus à partir de ce chapitre.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et analyses des expériences menées à l'aide de la plateforme de tests du système DEC, qui ont été menées dans le cadre de cette thèse au Laboratoire Espace d'innovation, Département d'automatique et Electromécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Ghardaïa. Les résultats ont été discutés afin de clarifier l'effet de certains facteurs (type et efficacité des fibres, débit d'air, épaisseur du tampon, etc.) sur les performances thermiques du système étudié dans les régions chaudes et arides, qui a été réalisé dans la région de Ghardaïa, qui connaît un climat chaud et sec (région aride), avec possibilité d'application. Ce système sera développé dans ces zones à l'avenir.

IV.2 Procédures et mesures expérimentales

Tous les instruments de mesure ont été correctement calibrés et préparés avant le début des expériences menées dans la salle du laboratoire de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Ghardaïa .

Les trois tampons de fibres utilisés dans ce travail : fibre de palme (F_P), toile de jute (F_J) et coton (F_C) (voir tableaux IV.1 et IV.2) ont été préparés au même endroit ; Chaque tampon de fibres a été trempé dans l'eau pour garantir qu'il était complètement humide avant de le placer sur le banc d'essai . L'humidité relative avant et après, la température de l'air sec à l'entrée et à la sortie de la plateforme, la température de l'eau, le débit massique d'air et la quantité d'eau évaporée ont été mesurés et enregistrés .

Des expériences ont été menées au Laboratoire Espace d'innovation, dans la période du 22 au 23 mai 2024 pour trois débits massiques d'air (0,236, 0,334, 0,410 kg/s) indiqués dans les tableaux IV.1 et IV.2 avec les lettres (V_1 , V_2 , V_3), respectivement. Les mesures ont été effectuées pendant une heure pour chaque débit d'air de fibre et épaisseur de fibre (30 mm). Les températures de l'air et de l'eau, l'humidité relative de l'air et les quantités d'eau évaporée sont mesurées toutes les 10 minutes .

Le tableau IV.1 montre les mesures expérimentales de la température de l'air, de l'humidité relative à l'entrée de la plate-forme et de la température de l'eau. Les mesures expérimentales des températures de l'air et de l'humidité relative à la sortie de la plateforme ainsi que des quantités d'eau évaporée sont données dans le tableau IV.2.

Le tableau IV. 3. représente l'Influence des conditions ambiantes et de la température de l'eau sur les différents paramètres mesurés du nouveau DEC avec les mêmes paramètres de fonctionnement.

Tableau IV.1 : Paramètres mesurés au début de l'expérience d'entrée.

Débit d'air Kg/s		V ₁			V ₂			V ₃		
		0.236			0.334			0.410		
Fibres		F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P
	Temps (min)									
T _{int} [°C]	00 :06	31.8	29.4	28.8	30.6	30	29.6	31.7	31.1	29
	00 :12	31.8	28.3	29	31.3	30.2	29	31.6	30.6	28.7
	00 :18	31.8	28.8	29.1	30.4	30.1	29.9	31.8	31.6	28.2
	00 :24	31.9	28.8	29	30.2	30	29.7	32.3	31.3	28.9
	00 :30	31.7	28.7	29.3	30.8	29.7	29.7	31.8	31.8	28.5
	00 :36	31.6	29	29.4	31.1	30.8	29.6	32.1	31.6	27.7
	00 :42	31.8	29.1	29.6	31.2	30.6	29.9	31.9	31.4	28.6
	00 :48	31.8	29.6	28.8	31.3	29.8	29.8	31.8	31.8	28.9
	00 :54	31.7	29.7	29.1	31.8	30.2	30.1	31.6	32.2	28.9
	01 :00	31.8	29.9	29.3	31.6	29.9	29.9	32	31.8	29.3
RH _{int} [%]	00 :06	25	30	32	32	30	33	33	24	31
	00 :12	27	31	30	34	35	30	33	28	32
	00 :18	28	29	28	32	30	30	32	28	34
	00 :24	30	32	30	30	31	31	30	25	34
	00 :30	28	34	31	33	30	30	32	27	34
	00 :36	29	32	27	35	31	30	31	29	35
	00 :42	28	33	29	33	26	29	30	29	33
	00 :48	30	33	30	31	30	29	31	30	30
	00 :54	29	30	32	34	30	30	33	29	29
	01 :00	29	33	35	33	31	31	31	29	31

Nous avons calibré une quantité spécifique d'eau (4 litres) pour évaluer la quantité d'eau évaporée après avoir terminé chaque processus, et régler la température de l'eau utilisée à l'entrée à (32.9 °C) et humidité 26 %.

Tableau IV.2 : Paramètres disponibles à la fin de l'expérience Enregistrer les données en sortie.

Débit d'air Kg/s		V ₁			V ₂			V ₃		
		0.236			0.334			0.410		
Fibres		F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P
	Temps (min)									
T _{ext} [°C]	00 :06	26.7	22.6	25.4	25.3	22.1	22.3	26.6	22.3	23.1
	00 :12	26	20.4	21.2	24	21.2	22.1	26.7	22.9	21.9
	00 :18	25.3	20.8	21	24.5	21.4	20.7	26.4	23.9	20.1
	00 :24	25.1	23.1	20.3	25	21	20.3	26.2	25.5	20.6
	00 :30	25	20.8	20.1	25.5	19.8	20.9	26	24.8	20.4
	00 :36	25.1	20	19.8	25.3	24.9	20.6	26.1	24.3	20.7
	00 :42	24.8	20.4	21.6	25.6	20.6	21.2	26.1	24.2	20.2
	00 :48	24.9	23.2	21	26	19.9	21	26.2	24.5	21.9
	00 :54	24.8	21	20.8	26.4	19.6	21.5	26.1	24.4	20
	01 :00	25	21.5	20.5	26.6	20.1	21.9	25.9	24.4	20.4
RH _{ext} [%]	00 :06	41	58	53	41	57	43	36	54	44
	00 :12	43	65	62	49	51	42	38	60	58
	00 :18	44	62	53	48	56	48	40	48	59
	00 :24	44	52	55	44	55	44	39	36	64
	00 :30	45	60	45	41	57	44	40	42	60
	00 :36	44	52	49	42	47	39	39	45	68
	00 :42	44	52	42	40	53	41	39	41	64
	00 :48	45	48	40	42	54	39	39	39	58
	00 :54	44	49	45	40	55	38	39	40	68
	01 :00	44	51	43	38	52	40	40	40	63
T _{eau} [°C]	00 :06	25.2	22.3	26.5	23.5	21.8	21.3	21.6	23.3	24.4
	00 :12	24.6	20.9	23.6	22.4	20.3	20.4	21.3	21.5	22
	00 :18	23.5	23.3	22.3	22.1	19.6	20.6	20.9	21.2	21.3
	00 :24	22.9	21.2	21.3	21.9	19.3	19.4	20.7	20.6	20.5
	00 :30	22.7	20.4	20.5	21.4	19.2	18.9	20.6	20	20
	00 :36	22.9	19.8	20.2	21	20.1	18.8	20.4	21	19.8
	00 :42	22.5	19.5	19.7	20.7	19.4	19	20.2	20.2	19.6
	00 :48	22.4	19.2	19.5	20.4	18.9	18.8	20	19.9	19.9

	00 :54	22.1	19.1	19.8	20.1	18.7	18.7	19.7	19.5	19.7
	01 :00	21.6	18.9	19.4	20	18.5	18.9	19.4	19.2	19.5
<i>m_{evapo}</i> [kg]	00 :06	0.35	0.36	0.45	0.25	0.5	0.3	0.05	0.65	0.4
	00 :12	0.05	0.8	0.15	0.15	0.12	0.4	0.04	0.04	0.58
	00 :18	0.12	0.9	0.1	0.20	0.18	0.09	0.15	0.12	0.42
	00 :24	0.03	0.25	0.15	0.04	0.1	0.36	0.025	0.06	0.16
	00 :30	0.025	0.07	0.11	0.05	0.15	0.03	0.015	0.5	0.33
	00 :36	0.02	0.2	0.02	0.06	0.05	0.12	0.01	0.12	0.12
	00 :42	0.06	0.16	0.02	0.05	0.25	0.05	0.025	0.06	0.39
	00 :48	0.02	0.075	0.2	0.04	0.05	0.13	0.035	0.07	0.17
	00 :54	0.07	0.165	0.05	0.05	0.1	0.12	0.015	0.05	0.84
	01 :00	0.05	0.23	0.1	0.02	0.15	0.1	0.04	0.06	0.3
<i>T_h</i> [°C]	00 :06	30.4	27.9	29	29.8	28.5	28.9	30.5	26.8	28.5
	00 :12	30	28.2	28.7	28.3	28.6	28	30.8	29.6	28.2
	00 :18	29.8	28.1	28.9	28.2	26.6	28	30	29.3	28.1
	00 :24	29.5	27.4	28.7	28.6	27.2	28.7	29.9	29.7	27.8
	00 :30	29.5	27.9	28.9	29.2	26.8	28.9	29.8	28.8	27.2
	00 :36	30	27.6	28.7	29	28.4	29.1	29.8	29.2	27.7
	00 :42	29.8	27.5	28.6	29.1	27.2	28.9	29.7	29.6	26
	00 :48	29.8	27.3	28.8	29.4	28.5	28.8	29.7	29.7	26.3
	00 :54	29.7	27.5	28.5	29.8	28.3	29	29.8	29.3	26.5
	01 :00	29.7	27.4	28.9	30.2	27.9	28.8	29.5	29.2	26.2

IV.3 Analyser et Calculer Les résultats

Après avoir recueilli toutes les données nécessaires de l'expérience : températures initiales et finales, humidité, débit d'air, volume d'eau évaporée et durée, nous abordons les étapes de calcul:

- ✓ Calcul de la masse de l'air passant à travers le système en utilisant le débit d'air et la densité de l'air ;
- ✓ Détermination du changement de température de l'air et calcul de la chaleur absorbée par l'air ;
- ✓ Calcul de la masse d'eau évaporée et de la chaleur nécessaire à l'évaporation ;
- ✓ Évaluer le taux d'évaporation et le débit massique de l'air ;
- ✓ Calculez l'efficacité du refroidissement en utilisant les formules respectives.

Dans le tableau IV.3 nous examinons les résultats pour chaque fibre naturelle et pour chaque débit d'air et l'heure exacte de l'expérience

Tableau IV.3 : Données de calcul des paramètres d'efficacité, de puissance et de taux d'évaporation.

Débit d'air		V ₁			V ₂			V ₃		
Kg/s		0.236			0.334			0.410		
Fibres		F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P	F _C	F _J	F _P
	Temp s (min)									
Q _{air} [J]	00 :06	435,46	580,61	290,30	640,45	954,64	882,14	756,52	1305,37	875,19
	00 :12	495,23	674,5	666	882,14	1087,57	833,80	726,85	1142,20	1008,69
	00 :18	555	683,07	691,61	712,96	1051,31	1111,73	801,02	1142,20	1201,53
	00 :24	580,61	486,69	742,84	628,37	1087,57	1135,90	904,86	860,36	1231,20
	00 :30	572,07	674,53	785,54	640,45	1196,32	1063,40	860,36	1038,3	1201,53
	00 :36	555	768,46	819,69	700,87	712,96	1087,57	890,02	1082,86	1038,36
	00 :42	597,69	742,84	683,07	676,71	1208,41	1051,31	860,36	1068,03	1246,03
	00 :48	589,15	546,46	666	640,45	1196,32	1063,40	830,69	1082,86	1038,36
	00 :54	589,15	742,84	708,69	652,54	1280,91	1039,23	815,85	1157,03	1320,2
	01 :00	580,61	717,23	751,38	604,20	1184,24	966,72	904,86	1097,70	1320,2
Q _s [W]	00 :06	1209,61	1612,82	806,41	1779,05	2651,79	2450,39	2101,45	3626,04	2431,09
	00 :12	1375,64	1873,72	1850	2450,39	3021,03	2316,12	2019,04	3172,78	2801,94
	00 :18	1541,67	1897,44	1921,15	1980,45	2920,32	3088,16	2225,07	3172,78	3337,6
	00 :24	1612,82	1351,92	2063,46	1745,48	3021,03	3155,29	2513,5	2389,89	3420
	00 :30	1589,10	1873,72	2182,05	1779,05	3323,13	2953,89	2389,89	2884,35	3337,6
	00 :36	1541,67	2134,62	2276,92	1946,88	1980,45	3021,03	2472,3	3007,96	2884,35
	00 :42	1660,26	2063,46	1897,44	1879,75	3356,7	2920,32	2389,89	2966,76	3461,22
	00 :48	1636,54	1517,95	1850	1779,05	3323,13	2953,89	2307,48	3007,96	2884,35
	00 :54	1636,54	2063,46	1968,59	1812,61	3558,10	2886,76	2266,27	3213,99	3667,24
	01 :00	1612,82	1992,31	2087,18	1678,35	3289,56	2685,36	2513,5	3049,17	3667,24
Q _{evap} [KJ]	00 :06	791	813,6	1017	565	1130	678	113	1469	904
	00 :12	113	1808	339	339	271,2	904	90,4	90,4	1310,8
	00 :18	271,2	2034	226	452	406,8	203,4	339	271,2	949,2
	00 :24	67,8	565	339	90,4	226	813,6	56,5	135,6	361,6
	00 :30	56,5	158,2	248,6	113	339	67,8	33,9	1130	745,8

	00 :36	45,2	452	45,2	135,6	113	271,2	22,6	271,2	271,2
	00 :42	135,6	361,6	45,2	113	565	113	56,5	135,6	881,4
	00 :48	45,2	169,5	452	90,4	113	293,8	79,1	158,2	384,2
	00 :54	158,2	372,9	113	113	226	271,2	33,9	113	1898,4
	01 :00	113	519,8	226	45,2	339	226	90,4	135,6	678
$\eta_{refroid}$ [%]	00 :06	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :12	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :18	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :24	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :30	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :36	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :42	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :48	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	00 :54	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
	01 :00	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678	35,999678
ϵ	00 :06	3,64	4,53	4,25	6,625	5,26	10,42	4,25	2,04	11,8
	00 :12	3,22	12.20	12.6	2,43	5,62	6,9	6,12	7,7	13,6
	00 :18	3,25	11,42	14,5	2,681	2,48	4,84	3	3,347	18.1
	00 :24	2,83	4,071	16.20	3,25	3,21	9,4	2,54	3,625	7,54
	00 :30	3,045	9,8	13.30	3,312	3,41	11	2,9	2,33	6,23
	00 :36	4,062	6,428	13,71	2,761	2,45	18	2,60	3,04	7
	00 :42	3,5	5,43	8	2,66	2,94	8,7	2,63	4	3,23
	00 :48	3,45	2,782	7.8	2,789	7,61	8,8	2,66	3,47	2,69
	00 :54	3,45	3,954	13,83	2,7	5,57	7,81	3,055	2,68	3,708
	01 :00	3,238	3,36	12.64	3,57	4,9	7,27	2,44	2,84	2,870

IV.3.1 Analyse comparative de la réduction de température

L'analyse comparative de la réduction de température examine l'efficacité de trois fibres naturelles (le coton, le jute et les fibres de palmier) lorsqu'elles sont utilisées dans un système de refroidissement par évaporation d'eau. Les résultats sont présentés sous forme de graphes pour visualiser les performances de chaque fibre.

Dans la figure IV.1, nous montrons les performances des trois fibres naturelles mentionnées et leur effet sur la température initiale :

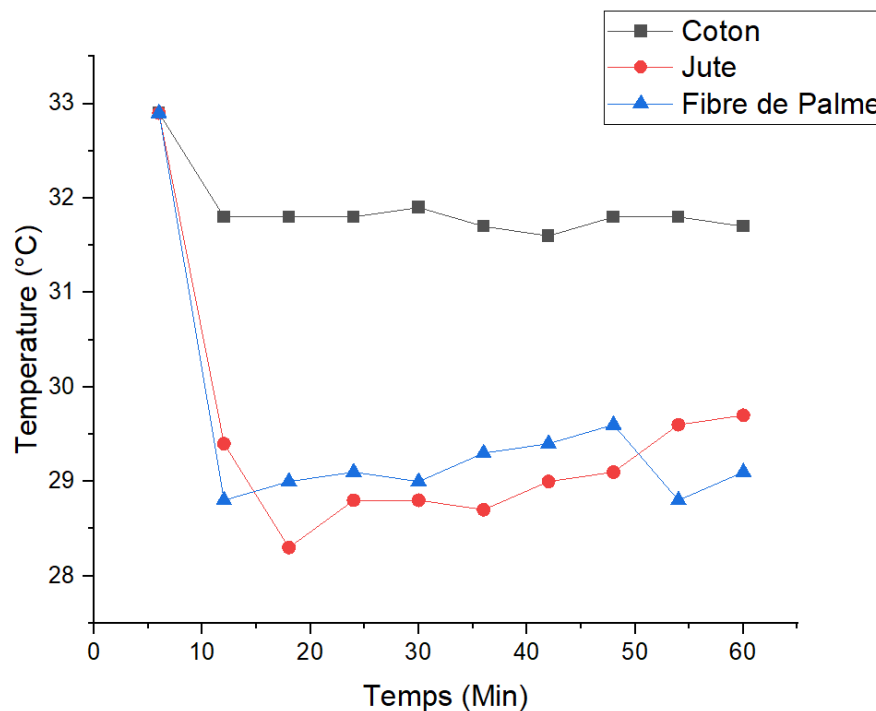


Figure IV.1 : Réduire la température grâce aux trois fibres naturelles (coton, jute, fibre de palme).

Sur le graph figure IV.1, nous remarquons que L'analyse comparative démontre que chaque fibre naturelle a des avantages uniques en termes de réduction de température par évaporation d'eau. Le choix de la fibre dépendra des exigences spécifiques de l'application de refroidissement, telles que la rapidité, la durée et la consistance de la réduction de température.

✓ **Performance du Coton:**

La température a diminué rapidement au début puis a atteint un plateau. Le coton a montré une réduction de température significative dans les premières minutes.

La haute capacité d'absorption du coton permet une évaporation efficace, conduisant à une réduction légère de la température.

✓ **Performance du Jute:**

La réduction de température a été rapide et continue sur Jusqu'à ce qu'il modère une période plus longue.

Le jute a une structure plus rugueuse et peut retenir l'eau plus longtemps, ce qui entraîne une évaporation plus lente mais soutenue. Il a une grande quantité d'humidité, ce qui lui permet d'absorber l'eau et de s'évaporer assez peu.

✓ **Performance des Fibres de Palmier**

Les fibres de palmier ont montré une réduction de température modérée, avec des variations plus importantes au cours du temps.

Les fibres de palmier, bien que moins absorbantes que le coton, offrent une structure unique qui peut influencer le taux d'évaporation de manière non linéaire.

IV.3.2 Analyse comparative des taux d'évaporation

Dans la figure IV.2, nous montrons les performances des trois fibres naturelles mentionnées et leur effet sur l'évaporation d'eau :

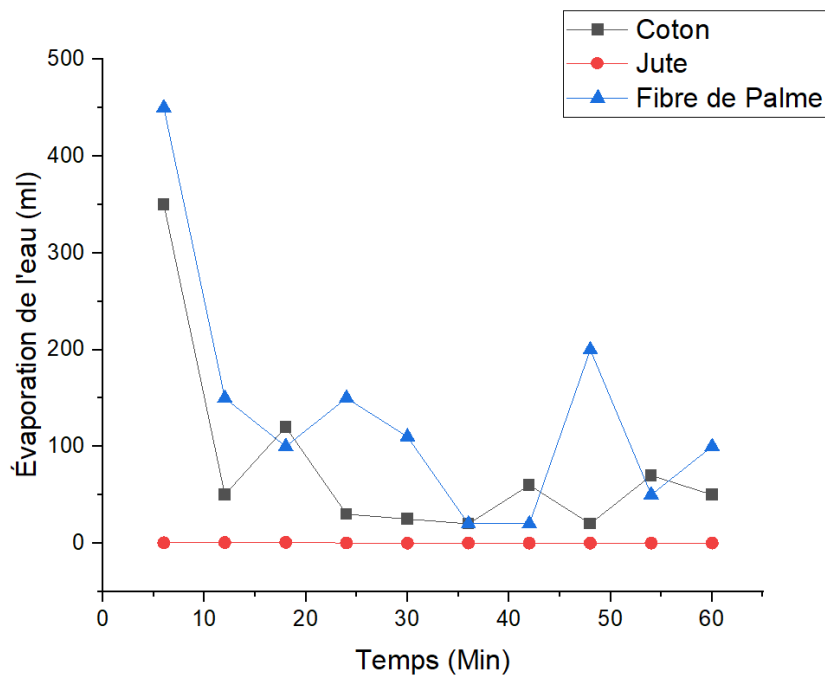


Figure IV.2 : Quantité d'eau évaporée dans chaque expérience avec le temps nécessaire au processus d'évaporation.

À travers la courbe, nous concluons que :

✓ Performance du Coton:

Le coton a montré un taux d'évaporation élevé au début, puis a progressivement diminué. Il montre que le coton a une capacité d'absorption d'eau par rapport à la fibre de palme qui a une valeur élevée d'évaporation.

Le coton, avec sa haute capacité d'absorption et sa surface poreuse, permet une évaporation rapide initiale. Cependant, à mesure que l'eau disponible diminue, le taux d'évaporation ralentit.

✓ Performance du Jute:

Le jute a montré un taux d'évaporation modéré et constant pendant la période de mesure.

La structure fibreuse du jute permet de retenir l'eau et de la libérer progressivement, ce qui explique la constance du taux d'évaporation.

✓ Performance des Fibres de Palmier

Les fibres de palmier ont montré des variations plus importantes dans le taux d'évaporation, avec des périodes de hausse et de baisse.

Les fibres de palmier, avec une capacité d'absorption moyenne, montrent une évaporation moins prévisible. Les variations peuvent être dues à la structure irrégulière des fibres.

Sur le graph figure IV.2, nous remarquons que L'analyse comparative des taux d'évaporation démontre que chaque fibre naturelle présente des caractéristiques distinctes qui influencent son efficacité dans un système de refroidissement par évaporation. Le choix de la fibre dépendra des besoins spécifiques de l'application en termes de rapidité et de constance de l'évaporation.

IV.4 Effet du type de matériau du tampon sur la performance thermique

La figure IV.3 montre la variation de la capacité de refroidissement Q_s des trois fibres utilisé (fibre de palme, coton et jute). D'après les résultats de la figure IV.3, la capacité de refroidissement des fibres de palmier (3667,24 W) est la plus élevée.

A travers notre expérience et les résultats de la courbe, nous avons remarqué qu'un air chaud avec une faible teneur en vapeur d'eau et une basse température de point de rosée possède une plus grande capacité de rétention d'eau que l'air froid et humide, ce qui favorise le transfert de chaleur et de masse au niveau du tampon de fibres de palmier. Cela permet ainsi d'augmenter l'écart de température entre l'entrée et la sortie. De plus, il est à noter que la capacité de refroidissement des fibres de palmier est toujours nettement supérieure à celle du coton (Fc) ou du jute (Fj), en raison de leur capacité à absorber une grande quantité d'eau.

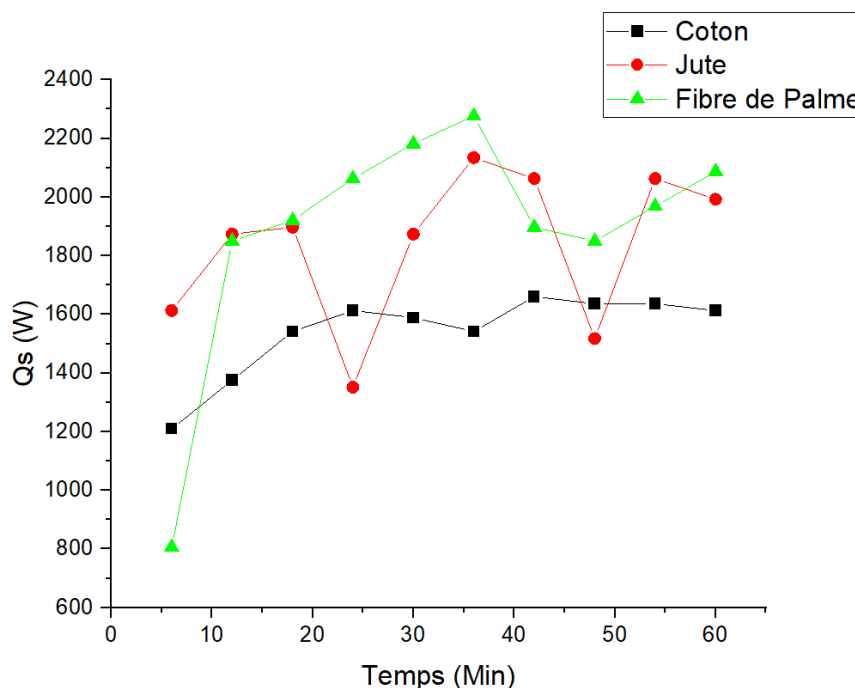


Figure IV.3 : L'effet des fibres naturelles sur les performances thermiques Capacité de refroidissement sensible du DEC.

IV.5 Effet du débit d'air sur la performance thermique

La figure IV.4 représente l'effet du débit massique sur les performances thermiques des fibres de palmier (voir tableau IV.3). Il a été observé que la capacité de refroidissement augmente avec l'augmentation du débit massique de l'air et atteint sa valeur maximale 3667,24 W pour le débit de 0,410 kg/s. La raison est qu'avec l'augmentation du débit massique, la différence de température entre l'entrée et la sortie du DEC augmente ce qui améliore le transfert thermique entre l'air et l'eau. En plus, l'augmentation du débit provoque une augmentation du coefficient de transfert thermique et ainsi la quantité de chaleur échangée.

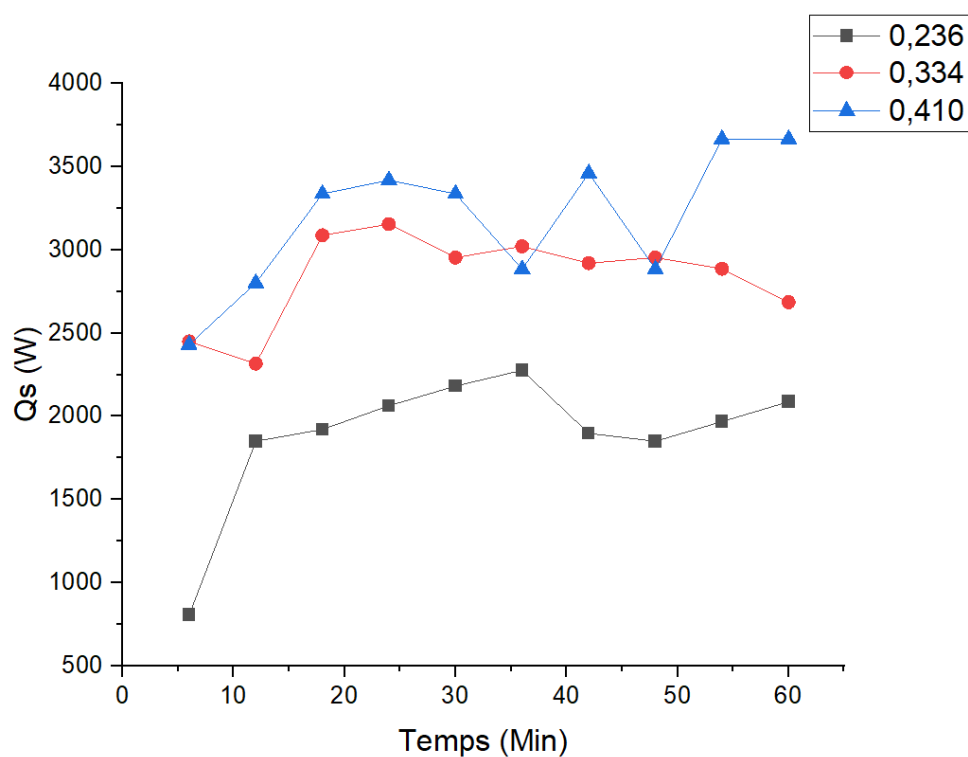


Figure IV.4 : Effet du débit d'air sur la capacité de refroidissement des fibres de palmier.

IV.6 Chaleur absorbée par l'air pendant le processus DEC

Les résultats de l'expérience illustrés par la figure IV.5 Chaleur Absorbée par l'Air au Cours du Temps, montrent une analyse comparative de trois fibres naturelles en termes de leur capacité à absorber la chaleur. Parmi les fibres étudiées, la fibre de palmier se distingue nettement comme étant la plus absorbante. Au fil du temps, la courbe de la fibre de palmier affiche une augmentation significative et constante de la chaleur absorbée, surpassant les autres fibres naturelles testées (1320,2J). Les deux autres fibres (coton et jute, bien qu'elles présentent également une absorption de chaleur, montrent des valeurs nettement inférieures et une progression moins marquée. Ces résultats

suggèrent que la fibre de palmier possède des propriétés thermiques supérieures, ce qui en fait un matériau particulièrement efficace pour des applications nécessitant une haute capacité d'absorption de chaleur.

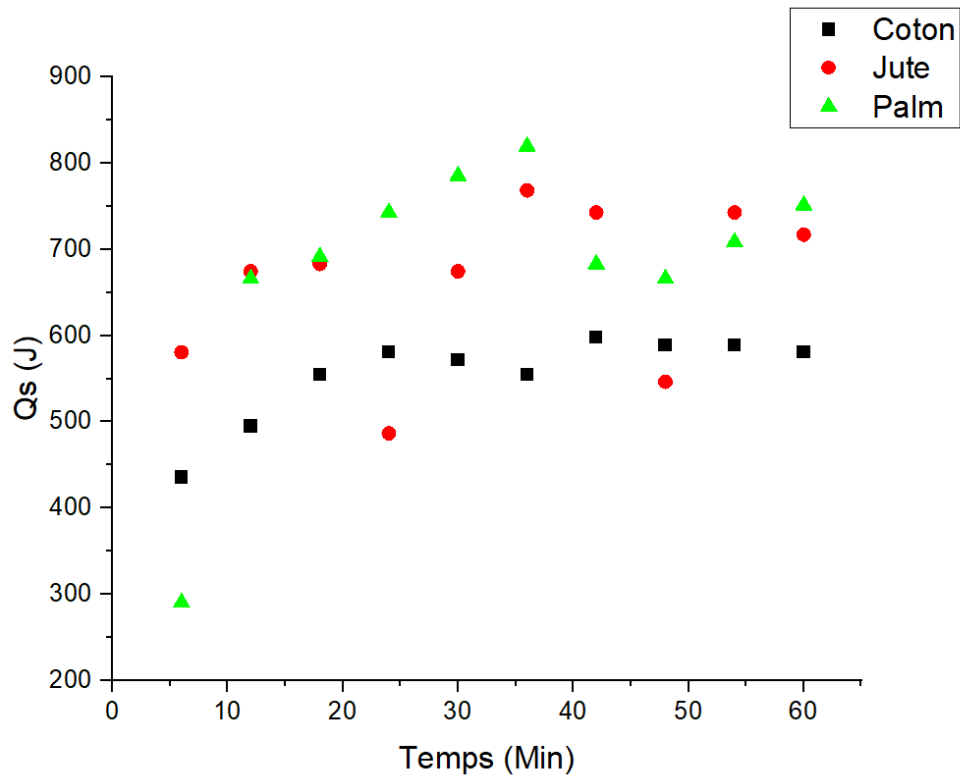


Figure IV.5 : Évolution de la Chaleur Absorbée par l'Air au Cours du Temps.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre et sur la base des analyses et des résultats que nous avons obtenus dans les conditions vitales des régions chaudes et sèches, notamment dans la région de Ghardaïa, nous sommes parvenus à des résultats très positifs qui nous ont donné une bonne impression de la possibilité d'appliquer le système de refroidissement par évaporation proposé dans notre région, compte tenu de toutes les conditions environnementales. Parmi les résultats obtenus nous citons :

Les fibres de palmier dattier sont considérées comme l'un des matériaux les plus efficaces pour le refroidissement par évaporation dans les régions arides en raison de leurs propriétés qui aident à absorber la chaleur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude sur l'évaluation de la performance du système de réfrigération par vaporisation d'eau dans les zones arides en utilisant des fibres naturelles telles que le coton, le jute et la fibre de palme a démontré le potentiel significatif de ces matériaux pour améliorer l'efficacité de refroidissement. Les fibres naturelles ont prouvé leur capacité à absorber et évaporer l'eau efficacement, offrant ainsi une alternative écologique et durable aux méthodes de refroidissement conventionnelles.

Les résultats obtenus montrent que chaque type de fibre possède des caractéristiques distinctes qui peuvent être exploitées en fonction des besoins spécifiques de la réfrigération. Le coton, avec sa grande capacité d'absorption, est particulièrement adapté aux environnements où une humidification rapide est nécessaire. Le jute, grâce à sa durabilité et sa résistance, est idéal pour les applications nécessitant une longue durée de vie. Enfin, la fibre de palme, avec sa perméabilité élevée à l'air, est parfaitement appropriée pour les zones nécessitant une circulation d'air optimisée.

Recommandations

- 1 .Optimisation des Matériaux :** Poursuivre la recherche pour améliorer les propriétés des fibres naturelles, telles que leur capacité d'absorption et leur durabilité, afin d'optimiser leur performance dans les systèmes de réfrigération par évaporation.
- 2 .Applications Pratiques :** Encourager l'intégration de ces fibres naturelles dans les systèmes de réfrigération existants et développer de nouveaux prototypes spécifiques aux conditions des zones arides.
- 3 .Études à Long Terme :** Effectuer des études à long terme pour évaluer la performance des fibres naturelles dans des conditions réelles et diverses, afin de valider leur efficacité et leur fiabilité sur le terrain.
- 4 .Sensibilisation et Formation :** Promouvoir la sensibilisation et la formation des communautés locales sur les avantages et l'utilisation des systèmes de réfrigération par vaporisation utilisant des fibres naturelles, pour favoriser leur adoption à grande échelle.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Perspectives

Les perspectives de cette étude sont prometteuses pour le développement de technologies de refroidissement durable dans les zones arides. La recherche future pourrait se concentrer sur l'hybridation des fibres naturelles avec d'autres matériaux écologiques pour créer des composites encore plus performants. De plus, l'extension de cette technologie à d'autres applications, telles que la conservation des aliments et la climatisation des habitations, pourrait offrir des solutions écologiques et économiques pour améliorer la qualité de vie dans les régions les plus chaudes du monde.

L'utilisation de fibres naturelles dans les systèmes de réfrigération par vaporisation d'eau représente une avancée significative vers des solutions de refroidissement durables et respectueuses de l'environnement, particulièrement adaptées aux défis climatiques des zones arides.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] Bergman, Theodore L. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Cengel, Yunus, John Cimbala, and Robert Turner. EBOOK: Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences (SI units). McGraw Hill, 2012.
- [3] Silberstein, Eugene, et al. Refrigeration and Air Conditioning Technology. Cengage Learning, 2020.
- [4] Kuehn, Thomas H., James W. Ramsey, and James L. Threlkeld. "Thermal environmental engineering." (No Title) (1998).
- [5] Correia, T., and Q. Zhang. "Electrocaloric materials: new generation of coolers." (2014).
- [6] Tušek, Jaka, and Andrej Kitanovski. "Magnetocaloric energy conversion: From theory to applications." Heidelberg ua: Springer (2015).
- [7] AFFOUN, Maissa et Sabrina LIMAME. Etude d'un système de refroidissement hybride combinant un refroidisseur à évaporation directe et un échangeur thermique terre-air . Insulter .
- [8] BOUTOUTAOU, D., H. ZEGGANE et S. SAGGAI. "Évaporation de la surface de l'eau des lacs et réservoirs de la zone aride de la Méditerranée : cas de l'Algérie." Journal LARHYSS P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 43 (2020) : 91-101.
- [9] Aboubakr Seddik Hachani, Nour El Imane Moummi. "Etude expérimentale d'un système de refroidissement par évaporation de l'eau."
- [10] Aribi, Yacine. "Etude De Performance Des Fibres De Palmiers Dattiers Utilisees Dans Un Systeme De Refraichissement De L'air Chaud Dans Différents Conditions." (2019).
- [11] Benaoune, Djamel. Etude expérimentale du rafraichissement de l'air par évaporation d'eau. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [12] BOUALI, Bochra. "Dimensionnement d'un échangeur à effet d'évaporation d'eau à base de fibres végétales".
- [13] Sellam, Sadam-Houcine, et al. "Experimental performance evaluation of date palm fibers for a direct evaporative cooler operating in hot and arid climate." Case Studies in Thermal Engineering 35 (2022): 102119.
- [14] Naveenprabhu, Venkateswaran, and Mariappan Suresh. "Performance studies on a water chiller equipped with natural fiber cooling pad based evaporative condenser." Industrial Crops and Products 201 (2023): 116923.
- [15] Alfraidi, Sultan, et al. "Experimental investigation of thermal performance of three configurations evaporative cooling systems (ECS) using synthetic grass wet media materials." Energy and Buildings 306 (2024): 113956.
- [16] Lei, Yue, et al. "Experimental comparison on the performance of radiative, reflective and evaporative cooling in extremely hot climate: A case study in Chongqing, China." Sustainable Cities and Society 100 (2024): 105023.

Références Bibliographique

- [17] Sofia, Evi, Nandy Putra, and Engkos A. Kosasih. "Development of indirect evaporative cooler based on a finned heat pipe with a natural-fiber cooling pad." *Heliyon* 8.12 (2022).
- [18] Duan, Zhiyin, Jiawei Kang, and Junjun Li. "Experimental Study of a Solar Driven Water Harvesting System for Fabric Evaporation Roof." 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). IEEE, 2022.
- [15] Howell, Ronald Hunter, Harry J. Sauer, and William J. Coad. Principles of heating, ventilating, and air conditioning. Atlanta, Ga.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.
- [16] <https://www.andrewsclimatlocation.fr/blog/rafraichisseurs-a-evaporation-definition-et-fonctionnement> (Visité le 29 avril 2024)
- [17] Sugarman, Samuel C. HVAC fundamentals. River Publishers, 2020.
- [18] Lin, Jie, and Kian Jon Chua. "Indirect Dew-Point Evaporative Cooling: Principles and Applications." (2023).
- [19] Amerine, M., H. Berg, and William V. Cruess. "American Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE handbook." *Guide to Sources for Agricultural and Biological Research* 462 (2021).
- [20] Roger, W., and P. E. Haines. *HVAC systems design handbook*. McGraw-Hill, New York, 2010.
- [23] Hui, Sam CM et WY Cheung. "Systèmes de refroidissement par évaporation à deux étages dans un climat chaud et humide." Actes du Symposium conjoint Tianjin-Hong Kong 2009, 29-30 juin 2009, Tianjin, Chine . Institution des ingénieurs de Hong Kong, Division des services du bâtiment., 2009 .
- [24] Habbart, Laurent. *Traitement des eaux de refroidissement* . Springer Science & Business Médias, 2009 .
- [25] <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/what-water-should-we-treat-and-why/industrial-water/cooling-circuits> (Visité le 30 avril 2024)
- [26] Moran, Michael J. et George Tsatsaronis. "Ingénierie de la thermodynamique." Manuel CRC de génie thermique . Presse CRC, 2017. 1-112.
- [27] El-Genk, Mohamed S. et Hamed H. Saber. "Limite d'inondation dans les thermosiphons à flux diphasique fermés." *Revue internationale de transfert de chaleur et de masse* 40.9 (1997) : 2147-2164.
- [28] Bensaid, Kaoutar. Développement d'un non-tissé structurel à base de fibres naturelles. Diss. École de technologie supérieure, 2016.
- [29] Bayart, Marie. Élaboration et caractérisation de biocomposites à base d'acide polylactique et de fibres de lin: compatibilisation interfaciale par dépôt de revêtements à base d'époxy, de

Références Bibliographique

- dioxyde de titane, de lignine ou de tanin. Diss. Thèse de doctorat, Université De Sherbrooke).
<https://www.researchgate.net/publication/336603986>, 2019.
- [30] Ovlaque, Pierre. Valorisation de la Fibre D'asclépiade pour le Renforcement de Matrices Organiques. Diss. Université de Sherbrooke, 2019.
- [31] THULE, Alma et Robert Shanks, éd. Composites de fibres naturelles : matériaux, procédés et propriétés . Éditions Woodhead, 2014 .
- [32] Kozlowski, Ryszard M. et Maria Mackiewicz-Talarczyk, éd. Manuel des fibres naturelles : volume 1 : types, propriétés et facteurs affectant l'élevage et la culture . Éditions Woodhead, 2020 .
- [33] Mohanty, Amar K., Manjusri Misra et Lawrence T. Drzal, éd. Fibres naturelles, biopolymères et biocomposites . Presse CRC, 2005 .
- [34] Syduzzaman, Md, et al. "Composites renforcés de fibres naturelles à base de plantes : une revue de la fabrication, des propriétés et des applications." *Revêtements* 10.10 (2020) : 973 .
- [35] Charlet, Karine. Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin: relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques. Diss. Université de Caen/Basse-Normandie, 2008.
- [36] El Boustani, Meriem. Modification des fibres végétales par un procédé écologique: effets sur la microstructure et la compatibilité avec les matrices polymériques. Diss. Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [37] https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_282 (Visité le 05 Mai 2024)
- [38] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure-of-hemicellulose.png?uselang=fr> (Visité le 05 Mai 2024)
- [39] Baskar, S., et coll. "Études expérimentales sur les caractéristiques de débit et de transfert de chaleur des nanofluides CNT à base de réfrigérant secondaire pour les applications de refroidissement." *Journal international de l'énergie ambiante* 41.3 (2020) : 285-288.
- [40] Eichhorn, Stephen et coll., éd. "Manuel de structure des fibres textiles : Volume 1 : fondamentaux et fibres polymères manufacturées." (2009).
- [41] Saouab, Abdelghani, Abdellatif Imad et Khubab Shaker. «Processus, propriétés et structures des fibres naturelles aux composites». (2023).
- [42] Gupta, VB et VK Kothari, éd. Technologie des fibres manufacturées . Springer Science & Business Médias, 2012.
- [43] Sapuan, SM "Composites de fibres naturelles tropicales : propriétés, fabrication et applications." Springer, Singapour. est ce que je 10.9780857099228.3 (2014): 365 .

Références Bibliographique

- [44] Nawab, Yasir et coll. « Des fibres naturelles aux composites ».
- [45] Hsieh, You-Lo. "Structure chimique et propriétés du coton." *Coton: Science et technologie* (2007): 3-34.
- [46] Silva, A., et al. (2020). "Antimicrobial activity of essential oils from Eucalyptus species and their use in evaporative cooling systems." *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 93, 130-138.
- [47] Wang, Q., et al. (2018). "Enhanced evaporative cooling performance of palm fibers in a packed bed evaporative cooler." *Energy Conversion and Management*, 174, 612-620.
- [48] Sharma, A., et al. (2019). "Experimental investigation on performance of jute based evaporative cooling pad in a greenhouse." *Renewable Energy*, 133, 146-156.
- [49] <http://t71spc.free.fr/1STI2D/Vetements/Seq1/act1/polymnat.html> (Visité le 05 Mai 2024).
- [50] Cosgrove, Daniel J. "Croissance diffuse des parois cellulaires végétales." *Physiologie végétale* 176.1 (2018) : 16-27.
- [51] McCann, Maureen C. et Nicholas C. Carpita. "Concevoir la déconstruction des parois cellulaires végétales." *Opinion actuelle en biologie végétale* 11.3 (2008) : 314-320.
- [53] Gavrilas, Simona et Ryszard M. Kozlowski. "Matière Première Lignocellulosique Naturelle Comme Source De Fibres Nanocellulosiques." *Fibres Naturelles* : 135.
- [54] Eichhorn, Stephen, J. W. S. Hearle, M. Jaffe, and T. Kikutani. *Handbook of Textile Fibre Structure*. 1st ed., Woodhead Publishing, 2011.
- [56] Datta, S. et Bhattacharya, S. *Manuel des fibres textiles*. Boca Raton, Floride: CRC Press, 2019.
- [57] Ghosh, T. K., & Kar, N. C. *Introduction to Natural Fibers*. Singapore : Springer, 2017.
- [58] <https://textilelearner.net/structure-of-cotton-fiber/> (Visité le 05 Mai 2024).
- [59] Flory, Paul J. *Principes de la chimie des polymères*. Presse universitaire de Cornell, 1953.
- [60] Raja Dhas, J. Edwin et coll. "Effet du renforcement des nanopoudres de coquille de noix de coco dans le développement de composites de fibres de palme." *Frontières des matériaux* 9 (2022) : 986011.
- [61] Li, Jing et coll. "Caractérisation structurelle, chimique et mécanique à plusieurs échelles des déchets de fibres de palmiers éoliens (*Trachycarpus fortunei*)." *Journal de la science du bois* 66 (2020) : 1-9.
- [62] Belgacem, C., Q. Tarrés et F. Espinach. "Fibres lignocellulosiques à haut rendement issues de la biomasse de palmier dattier comme renfort dans les composites en polypropylène : effet du traitement des fibres sur les propriétés des composites." *Polymères* 12 : 1423." (2020).
- [63] Lewin, Ménahe. *Manuel de chimie des fibres*. Presse Crc, 2006.
- [64] Chen, H. et He, C. « Manuel de production textile durable ». Boca Raton, Floride : CRC Press, 2019.

Références Bibliographique

- [65] Pauly, Markus et coll. "L'adéquation des hôtes orthogonaux pour étudier la biosynthèse de la paroi cellulaire végétale." *Plantes* 8.11 (2019) : 516 .
- [66] Reddy, N., Yang, Y. et Yang, Y. « Fibres biodégradables et durables ». Amsterdam, Pays-Bas : Elsevier, 2018.
- [67] Gupta, MK, RK Srivastava et Himanshu Bisaria. "Potentiel des composites polymères renforcés de fibres de jute : une revue." *Int. J. Texte fibreux. Résolution* 5.3 (2015) : 30-38.
- [68] Khan, Moubarak A. et al. "Modification des fibres de jute par copolymérisation par greffage radio-induite et leurs applications." *Copolymères greffés à base de cellulose : structure et chimie ; Thakur, VK, éd.* (2015) : 209-235.
- [69] <https://textilestudycenter.com/jute-fibre-properties-and-end-uses/> (Visité le 08 Mai 2024)
- [70] <https://www.onlineclothingstudy.com/2023/02/jute-fabric-structure-composition.html> (Visité le 08 Mai 2024)
- [71] Roy, S. et Latifa Binte Lutfar. "Fibres libériennes : jute." *Manuel des fibres naturelles . Éditions Woodhead*, 2012. 24-46.
- [72] Islam, Md Redwanul, et al. "Design and Fabrication of an Instrument for Splitted Jute Fiber Length Measurement." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E* 104.2 (2023): 201-214.

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département automatique et électromécanique



جامعة غرداية

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الآلية والكهروميكانيك

الرقم : / /

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): بن قايد عبد النور

2. الطالب (ة): بن دهينة عثمان

تخصص : طاقات متجددة في الميكانيك

نمنح نحن الأستاذ (ة) :

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
أ. د. باحمد داودي	Pr- Univ ghardaia	مصصح (1)	
د. عبد الحاكم بلاغيت	MCB - Univ ghardaia	مصصح (2)	
د. عمر بوعرشة	MCA - Univ ghardaia	مصصح (2)	
د. فارس عيساوي	MCA - Univ ghardaia	مؤطر	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Évaluation des Performances d'un Système De Refroidissement

par Evaporation d'Eau dans les Régions Arides Utilisant des Fibres Naturelles

إمضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهروميكانيك

