



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétiques**

Réf. : ...

---

Présenté et soutenu par :  
**Nesserine Zoubiri**

Le : jeudi 10 septembre 2020

## **Étude de rafraîchissement de l'air par humidification dans une interface à base de fibres végétales : Luffa et palmier dattier**

---

### **Jury :**

Mr	Tarek Djoudi	Dr	Université de Biskra	Président
Mr	Foued Chabane	Dr	Université de Biskra	Examineur
Mr	Abdelhafid Moumami	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma source de bonheur :

Mes grands-parents que Dieu ait pitié d'eux

Ma mère et mon père pour leur amour, leur bonté, leur sacrifice, leur encouragements perpétuels, leur soutien. Que Dieu prolonge leur vie dans le bonheur

Mon frère Mohamed Wail et mes sœurs Maria, Douniazad

A toutes les personnes qui m'ont aidés dans mon travail

Tous mes amis de la promotion 2020.

Nesserine Zoubiri

# *Remerciement*

En premier lieu, je remercie Dieu, notre créateur, qui m'a donné la force et la persévérance pour réaliser ce modeste travail.

Mes pensée vont ensuite à mes Parents qui, depuis le début, ils m'ont témoigné leur confiance et manifesté leur soutien

J'exprime toute ma profonde gratitude au Professeur **Abdelhafid Moummi**, mon directeur de mémoire, pour m'avoir fait confiance et puis pour sa patience, son suivi constant de ce travail et ses remarques et conseils précieux durant la réalisation de ce travail.

Toute ma reconnaissance va au Docteur **Tarek Djoudi** , et au Docteur **Foued Chabane** pour l'honneur qu'ils me font de bien vouloir accepter de participer au jury.

Je remercie Mr. **Sadam Houcine SELLAM** pour sa collaboration et son aide dans la réalisation de ce travail.

Je suis extrêmement reconnaissante envers tout le groupe du Hall technologique de l'université de Biskra et de toute l'équipe de la faculté des sciences et de la technologie de me faire bénéficier de leurs expertises.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont bien conseillée, bien aidée, et à ceux qui m'ont encouragée de près ou de loin.

# Sommaire

---

## *Sommaire*

Remerciements

Dédicace

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

### **Chapitre I : Généralité et Recherche bibliographique**

I.1. Introduction..... 5

I.2. Généralités sur le rafraichissement de l'air par humidification d'eau..... 5

I.3.Principe de fonctionnement .....6

I.4 Les différents systèmes de rafraichissement.....7

I.4.1.Systèmes d'évaporation directes.....7

I.4.2.Systèmes d'évaporation indirectes.....7

I.4.3.Système mixtes.....8

I.5.Recherche bibliographique ..... 9

I.6. Conclusion .....17

### **Chapitre II : Etude théorique**

II.1.Introduction .....19

II.2.Propriétés et grandeur de l'air humide.....19

II.2.1.Température sèche en °C .....20

II.2.2.Température humide en °C.....20

II.2.3.Température adiabatique de saturation.....20

II.2.4.Température de rosée en °C.....20

II.2.5.Humidité spécifique ou humidité absolue ou teneur en vapeur.....20

II.2.6.Humidité relative .....21

# Sommaire

---

II.2.7. Volume spécifique en $\text{m}^3/\text{kg}$ d'air.....	21
II.2.8. Masse volumique en $\text{kg}/\text{m}^3$ d'air humide.....	22
II.2.9. Chaleur sensible et chaleur latente .....	22
II.2.10. Enthalpie.....	22
II.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur évaporatif .....	22
II.4. Diagramme de l'air humide .....	23
II.5. Analyse théorique du rafraichissement de l'air par effet d'évaporation .....	24
II.6. Conclusion .....	29

## Chapitre III : Description du Dispositif Expérimental

III.1. Introduction .....	31
III.2. Dispositif expérimental .....	31
III.3. Paramètres climatiques mesurés.....	37

## Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction .....	40
IV.2. Résultats expérimentaux obtenus.....	41
IV.2.1. Variation des températures en fonction du temps.....	44
IV.2.2. Variations de l'humidité relative en fonction du temps.....	46
IV.2.3. Variations de l'efficacité en fonction du temps .....	48
IV.3. Conclusion.....	48

Conclusion générale .....	50
---------------------------	----

Résumé

Références bibliographiques

# Nomenclature

---

## *Nomenclature*

Symbole	Désignation	Unités
$T_r$	Température de rosé	°C
$P_v$	La pression partielle de la vapeur d'eau	K Pa
$P_s$	La pression de la vapeur saturante qui correspond à l'état de saturation	K Pa
$\chi$	Humidité absolue	%
$m_v$	La masse de vapeur d'eau	Kg
$m_a$	La masse de vapeur d'air sec	Kg Pa
$P_a$	La pression de l'air sec	K Pa
$R_v$	Constante caractéristique de l'eau	J/Kg K
$R_a$	Constante des gaz parfaits	J/Kg K
$T$	Température de l'air au voisinage du panneau humide	°C
$\phi$	Humidité relative	%
$P_{vS}$	La pression de saturation à la température bulbe sec	K Pa
$H$	L'enthalpie de l'air humide	J/kg
$C_p$	Chaleur massique de l'air	J/Kg K
$h_{1v}$	L'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau	J/kg
$\delta Q_s$	La chaleur sensible élémentaire transférée à l'air traversant le pad	W
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et le pad	W/m <sup>2</sup> °C
$A$	Zone de la surface de transfert de chaleur mise en jeu : surface totale mouillée	m <sup>2</sup>
$N_u$	Nombre de Nusselt	[-]
$h_c$	Coefficient de transfert thermique entre l'air et le pad humide	W/m <sup>2</sup> °C
$L_c$	Le diamètre de la canalisation (tunnel)	m
$\lambda$	Conductivité thermique du fluide (air)	W/m °C

## Nomenclature

---

$R_e$	Nombre de Reynolds	[-]
$\rho$	Masse volumique de l'air traversant le pad	Kg/m <sup>3</sup>
$L$	Le diamètre de la canalisation (tunnel)	m
$V$	Vitesse moyenne du fluide (air) traversant le pad	m/s
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide (air)	Kg/m s
$P_r$	Nombre de Prandtl	[-]
$dm_v$	La masse élémentaire de vapeur	Kg
$h_m$	Coefficient de transfert de masse par convection entre le pad humide et l'air	Kg/m <sup>2</sup> s
$\delta Q_s$	La chaleur latente élémentaire	W
$h_{LVS}$	Enthalpie spécifique de vaporisation d'eau à la température de surface	J/kg
$\delta Q$	Le flux de chaleur total	W
$h_v$	Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau	J/kg
$h_{v_s}$	Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau à la température de surface du pad	J/kg
$h_{s_a}$	Enthalpie spécifique de l'air sortant	J/kg
$h_a$	Enthalpie spécifique de l'air entrant après échange avec l'eau (humidité du pad)	J/kg
$w_s$	L'humidité absolue du la fibre humide	kg <sub>w</sub> /kg <sub>air</sub>
$W$	Humidité absolue	kg <sub>w</sub> /kg <sub>air</sub>
$C_{pu}$	Chaleur spécifique de l'air humide	J/kg k
$C_{p_a}$	Chaleur spécifique à pression constante de l'air sec	J/kg k
$C_{p_v}$	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau à pression constante	J/kg k
$R_{Le}$	Le nombre de Lewis	[-]
$m_a$	Débit massique d'air	kg/s
$T_1$	La température bulbe sec de l'air entrant.	°C
$T_2$	La température bulbe sec de l'air sortant.	°C

## Nomenclature

---

$T_s$	La température bulbe humide de l'air entrant	°C
$V_{air}$	Vitesse de l'air soufflé	m/s
$T_e$	Température de l'air extérieur (ambiante)	°C
$T_i$	Température de l'air intérieur (entrée)	°C
$T_h$	Température humide de l'air (sortie)	°C
$T_{sh}$	Température de la surface humide	°C
$\varphi_e$	Humidité relative de l'air à l'entrée du tunnel.	%
$\varphi_s$	Humidité relative de l'air à la sortie du tunnel.	%
$T_{eau}$	Température de l'eau dans le banc	°C
$V_{air}$	Vitesse de l'air soufflé	m/s
$\varepsilon$	efficacité du dispositif de rafraîchissement	%

# *Liste des figures*

## Chapitre I

<b>Figure I.1 :</b> Exemple de rafraichissement de l'air par évaporation d'eau obtenu par la végétation.....	6
<b>Figure I.1 :</b> principe de fonctionnement de rafraichissement par humidification d'eau.....	6
<b>Figure I.3 :</b> Système de rafraichissement direct.....	7
<b>Figure I.4 :</b> Système de rafraichissement indirect.....	8
<b>Figure I.5 :</b> Systèmes de rafraichissement mixtes.....	8
<b>Figure I.6 :</b> Banc d'essai expérimental avec ventilateur de soufflage de l'air.....	10
<b>Figure.7:</b> Enceinte d'humidification en bois contenant des fibres végétales de palmier dattier local . .....	10
<b>Figure I.8:</b> Anémomètre à hélice de type KIMO LV 110.....	10
<b>Figure I.9 :</b> Variation de la température de l'air intérieur en fonction du temps pour trois épaisseurs différentes de l'interface.....	11
<b>Figure I.10 :</b> variation de la différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur.....	11
<b>Figure I.11 :</b> Variation de la de température de l'air extérieur et l'air intérieur.....	11
<b>Figure I.12 :</b> Variation de l'humidité relative de l'air extérieur.....	12
<b>Figure I.13 :</b> Variation de l'humidité relative de l'air intérieur.....	12
<b>Figure I.14 :</b> Description du dispositif expérimental.....	13
<b>Figure I.15 :</b> Evolution de l'efficacité en fonction du temps et de l'épaisseur de l'interface des fibres (a) 3 cm, (b) 2 cm.....	14

## Liste des figures

---

<b>Figure I.16</b> : Evolution de l'écart de température en fonction du temps et de l'épaisseur de l'interface des fibres (a) 3 cm, (b) 2 cm.....	14
<b>Figure I.17</b> : Banc d'essai expérimental.....	15
<b>Figure I.18</b> : Fibre de palmier dattier de la région de Biskra.....	15
<b>Figure I.19</b> : Couches hybride constituées de fibres de luffa et de palmier dattier.....	15
<b>Figure I.20</b> : Evolution de l'écart de température en fonction du temps et du débit d'air pour une épaisseur de 02 cm de pad hybride (luffa + palmier dattier) avec un débit d'eau comparatif de 0,4 l/min.....	16
<b>Figure I.21</b> : Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau.....	17

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : principe de rafraichissement par évaporation directe.....	23
<b>Figure II.2</b> : Diagramme de l'air humide.....	24
<b>Figure II.3</b> : Schématisation des bilans énergétiques dans un volume de contrôle dans l'enceinte d'humidification par évaporation d'eau.....	25

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Banc d'essai expérimental.....	31
<b>Figure III.2</b> : Ventilateur d'air réglable dont le débit est ajusté avec un potentiomètre .....	32
<b>Figure III.3</b> : Photographie du matériau végétal fibreux « le Luffa » utilisé comme interface humide dans le procédé de rafraichissement d'air.....	32
<b>Figure III.4</b> : Fibre de palmier dattier de la région de Biskra.....	33
<b>Figure III.5</b> : Pad en fibres de luffa recouvertes d'une toile en plastique perforée.....	33
<b>Figure III.6</b> : Pad constitué de fibres de luffa.....	33
<b>Figure III.7</b> : pad de luffa avec fibres de palmier de palmier dattier fixées verticalement....	34

## Liste des figures

---

<b>Figure III.8 :</b> pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement.....	34
<b>Figure III.9:</b> circuit de drainage d'eau comportant des buses ajustables.....	35
<b>Figure III.10:</b> buses réglables permettant d'assurer un débit d'eau en goutte à goutte.....	35
<b>Figure III.11:</b> réservoir d'eau gradué avec une pompe à eau d'alimentation et humidification du pad.....	35
<b>Figure III.12 :</b> Débitmètre à flotteur muni d'une vanne d'alimentation pour ajuster le débit.....	35
<b>Figure III.13 :</b> Système de distribution d'eau.....	36
<b>Figure III.14 :</b> Anémomètre à hélice de type KIMO LV 110.....	36
<b>Figure III.15 :</b> Hygromètre de type Testo 625.....	37
<b>Figure III.16 :</b> Capteurs de température avec afficheurs électroniques.....	37

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1 :</b> Variations des températures d'entrée et sortie pour le pad de Luffa.....	44
<b>Figure IV.2 :</b> Variation des températures d'entrée et sortie pour un pad de luffa avec rangées de fibres de palmier dattier fixées verticalement.....	45
<b>Figure IV.3 :</b> Variation des températures d'entrée et sortie pour un pad de luffa avec rangées de fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement.....	45
<b>Figure IV.4 :</b> Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa.....	46
<b>Figure IV.5 :</b> Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement.....	47
<b>Figure IV.6 :</b> Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement.....	47
<b>Figure IV.7:</b> Variation de l'efficacité en fonction du temps pour trois types de pad étudiées (luffa, luffa +fibres verticales, luffa + fibres verticales et horizontales).....	48

### *Liste des tableaux*

<b>Tableau III.1</b> : Exemple d'un tableau des relevées expérimentales.....	38
<b>Tableau IV.1</b> : paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de Luffa d'épaisseur $e=03$ cm.....	41
<b>Tableau IV.2</b> : paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de luffa d'épaisseur 03 cm et de fibres de palmier dattier fixées verticalement.....	42
<b>Tableau IV.3</b> : paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de luffa d'épaisseur 03 cm et de fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement....	43

## *Introduction générale*

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Le confort thermique est l'un des soucis majeurs de l'homme, c'est pour cela qu'il a inventé des systèmes de chauffage, de climatisation et de rafraîchissement...etc.

Dans ce travail on s'intéresse au rafraîchissement d'air par humidification d'eau, cette technique représente le traitement de l'air en utilisant l'effet d'évaporation par de l'eau, ceci dans le but de rafraîchir l'air ambiant qui est chaud d'une façon directe ou indirecte.

Ce système représente une alternative à la climatisation traditionnelle dans les zones arides et semi-arides, qui se caractérisent avec leurs climats chauds et par de longues périodes d'été. Ce système profite à la fois aux humains, aux bétails et est également utilisé dans les usines, il se caractérise comme étant économique et non polluant pour l'environnement.

Le principal objectif du rafraîchissement est la diminution de la température de l'air avec augmentation du taux d'humidité, tout ceci se réalise à travers le phénomène de transfert de chaleur et de masse entre l'air et l'eau dans une chambre de vaporisation

L'objectif principal de notre étude théorique et expérimentale repose sur la technique de rafraîchissement de l'air par effet d'évaporation d'eau, en utilisant une matière biologique locale comme milieu humide conçue de fibres végétales localement disponibles telle que le Luffa et la fibre de palmier dattier.

Dans notre cas on s'est intéressé à deux types de pad, où on a considéré trois cas :

- ❖ Pad de luffa sans fibres de palmier dattier.
- ❖ Pad de luffa muni de fibres de palmier dattier fixés de façon verticale.
- ❖ Pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés de façon verticale et horizontale

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, des généralités sur le rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau sont présentés, où on a essayé de montrer le principe de fonctionnement ainsi que les différents systèmes de rafraîchissement par évaporation d'eau existants, ensuite une recherche bibliographique à travers laquelle on a essayé de citer et d'analyser quelques travaux théoriques et expérimentaux réalisés qu'on a rencontré dans la littérature.

Dans le deuxième chapitre quelques concepts théoriques sont cités, il s'agit des équations et modèles théoriques qui décrivent le phénomène de transfert de chaleur et de

## Introduction générale

---

masse à travers des interfaces poreuses. Ces approches théoriques permettent d'évaluer les paramètres de performances, telles que ; l'efficacité de rafraîchissement du système, ainsi que d'autres paramètres importants qui caractérisent le transfert de chaleur et de masse dans un humidificateur par évaporation directe.

Dans le troisième chapitre, une étude expérimentale qui introduit le dispositif expérimental et ses différentes compositions ainsi que l'outillage de mesure nécessaire pour l'acquisition des résultats. La description de l'expérimentation a été abordée afin de comprendre les différentes étapes de l'étude expérimentale.

Le dernier chapitre, intitulé résultats et discussions, est consacré à la présentation et l'interprétation des courbes qui montrent l'évolution des paramètres de performances, les températures, l'humidité relative et l'efficacité en fonction de temps.

Enfin, une conclusion générale qui résume l'essentiel des principaux résultats obtenus.

*Chapitre I*  
*Généralités et Recherche Bibliographique*

**I.1.Introduction**

Le rafraîchissement de l'air par humidification est un processus de traitement de l'air qui utilise l'évaporation de l'eau pour refroidir l'air chaud directement ou indirectement. Ce procédé de conditionnement de l'air comme alternatif à la climatisation conventionnelle dans les régions à climat chaud, arides ou semi-arides caractérisés par une période estivale assez prolongée soit pour l'habitat, l'industrie ou l'élevage. Le rafraîchissement évaporatif de l'air se manifeste par un abaissement de la température et une augmentation de l'humidité par un phénomène de transfert de masse et de chaleur entre l'air et l'eau dans l'enceinte d'évaporation. Cette technique est très économique et ne manifeste aucun rejet polluant pour l'environnement. [1]

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude du rafraîchissement de l'air par humidification d'eau en utilisant la fibre de palmier dattier et luffa dans de la région de Biskra comme moyen et interface pour la réalisation de ce procédé.

**I.2.Généralités sur le rafraîchissement de l'air par humidification d'eau :**

Le rafraîchissement d'air est un processus qui a pour but d'augmenter l'humidité de l'air à l'intérieur de l'habitat et de diminuer sa température, cela pour provoquer une sensation de fraîcheur dans la saison estivale. [2]

Ce procédé de traitement d'air est très adaptable aux régions arides et semi-arides qui sont caractérisés par un climat sec et chaud en période d'été. D'autre part, ce procédé est très économique, simple à réaliser comparativement aux autres procédés conventionnels qui fonctionnent suivant des évolutions thermodynamiques coûteuses, en raison d'une consommation électrique très élevée.

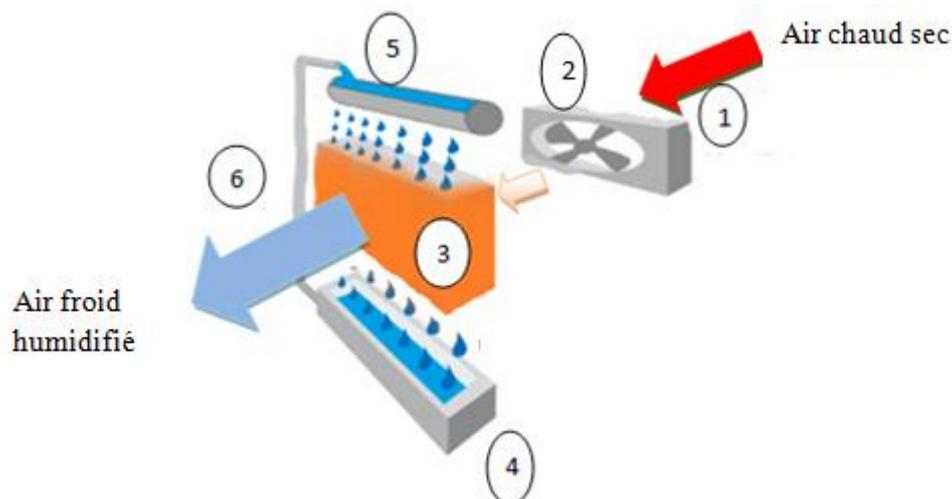
Dans ce procédé, l'humidification de l'air est obtenue par le biais d'une interface végétale à base de fibres de palmiers dattiers, où l'air en provenance de l'extérieur, après une filtration se trouve en contact direct avec les parois intérieures humides de l'enceinte humide, se refroidi, en cédant de la chaleur à l'eau qui s'évapore, ce qui permet de refroidir l'air de manière assez efficace, le rend agréable et confortable. Le rafraîchissement par effet d'évaporation de l'air se traduit par un abaissement de la température et une augmentation de l'humidité par un phénomène de transfert de masse et de la chaleur entre l'air et l'eau. [3]



**Figure (I.1):** Exemple de rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau obtenu par la végétation. [3]

### I.3.Principe de fonctionnement :

Le rafraîchissement par évaporation est un processus adiabatique. Il consiste à diminuer la chaleur perçue ou chaleur sensible par ventilation (chaleur latente). C'est un processus qui ne demande pas de variation de chaleur. On fait circuler à basse vitesse à l'aide d'un ventilateur à travers un panneau hygroscopique irrigué par une pompe un débit d'air à une certaine température et une certaine hygrométrie relativement faible. Par ce processus, l'air évapore une partie de l'eau en transformant une partie de sa chaleur sensible en chaleur latente, sans aucune variation de l'enthalpie ou de la chaleur totale. A la sortie, la température de l'air diminue et son hygrométrie augmente. [4]



**Figure (I.2) :** principe de fonctionnement de rafraîchissement par humidification d'eau. [5]

01 : Air chaud sec.    03 : Tampon absorbant (fibres végétales)    05 : Dépôt d'eau  
 02 : Ventilateur    04 : Réservoir d'eau    06 : Air froid humidifié

#### I.4 Les différents systèmes de rafraîchissement :

Le rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau est un processus de traitement de l'air qui utilise l'humidification d'eau pour refroidir l'air chaud directement ou indirectement. On distingue trois types de système de rafraîchissement d'air par évaporation d'eau.

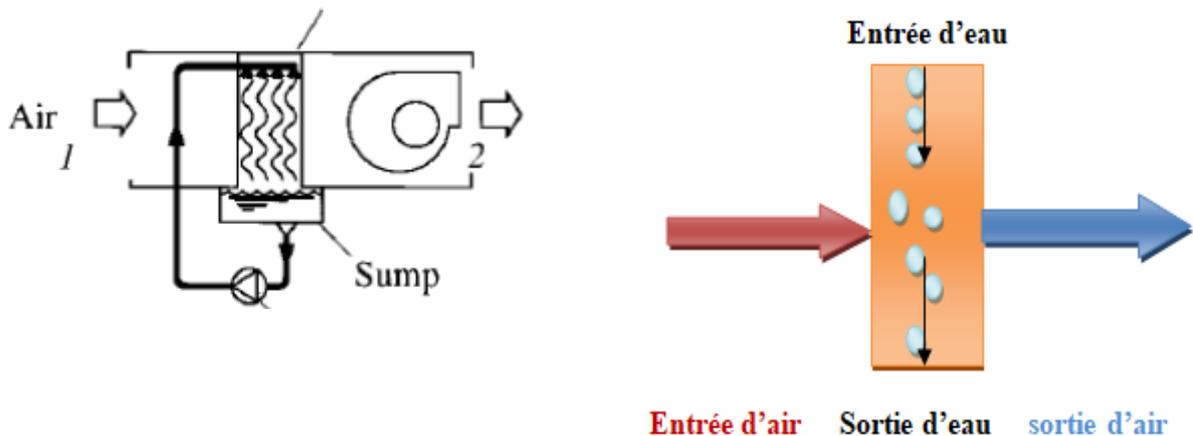
- système d'évaporation directe
- système d'évaporation indirecte
- systèmes mixtes.

##### I.4.1. Systèmes d'évaporation directes :

C'est le procédé le plus simple, dans lequel l'air extérieur est alimenté par un ventilateur, cet air passe ensuite dans une pièce où il entre en contact avec l'eau. Celle-ci est fournie soit par un asperseur, sous forme de fines gouttelettes d'eau, soit par un milieu poreux humidifié.

Durant le contact avec l'air chaud l'eau s'évapore, ce qui abaisse sa température et augmente sa teneur en humidité. Pour des raisons pratiques, on a un intérêt à ce que l'air ne soit pas saturé entièrement à 100%.

Généralement, ce procédé est également appelé « refroidissement adiabatique » par les fabricants, par le fait qu'il n'y a pas d'échange de chaleur autre qu'entre l'air et l'eau avec laquelle il est en contact. [6]



Figure(I.3) : Système de rafraîchissement direct [7]

##### I.4.2. Systèmes d'évaporation indirectes :

L'air destiné à refroidir la pièce passe par un échangeur de chaleur qui est lui-même placé dans une enceinte refroidie par évaporation. Puisque la quantité de vapeur d'eau dans cet air n'est pas augmentée, l'humidité relative augmente moins que lors du refroidissement direct

avec un abaissement de la température réalisée est obtenue grâce à un échangeur de chaleur, mais légèrement inférieur qu'avec le refroidissement direct. [6]

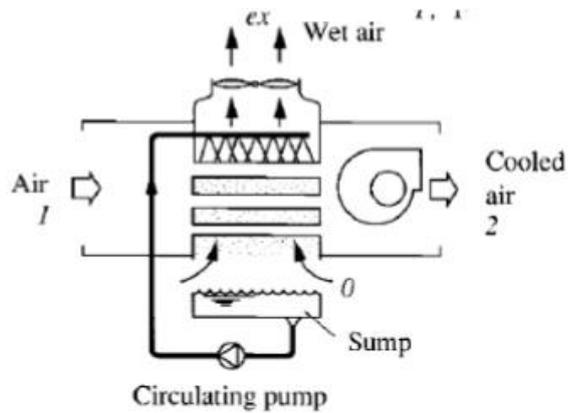
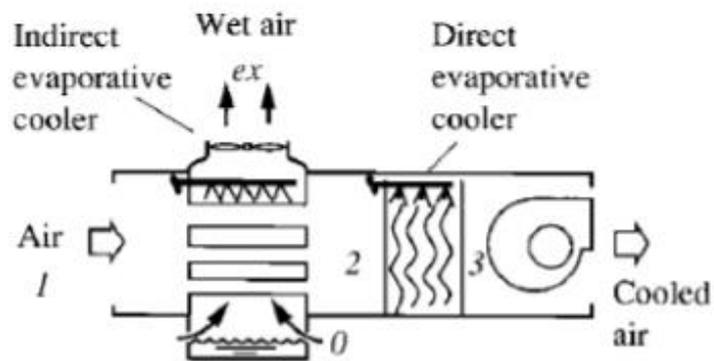


Figure (I.4) : Système de rafraîchissement indirect. [7]

I.4.3. Système mixtes :

Il s'agit d'un système de rafraîchissements d'air par évaporation combiné à deux étapes indirecte-directe. Quand l'air frais obtenu à la sortie d'un système de rafraîchissement par effet d'évaporation avec une température de 21 °C et une humidité relative de plus de 60 % à 80% , il est intéressant d'en ajouter un système de rafraîchissement d'air dans le but d'abaisser la température de l'air frais initial et une augmentation de l'humidité relative. L'humidité relative élevée d'un air frais soufflé peut être acceptable pour une température élevée. [7]



Figure(I.5) : Systèmes de rafraîchissement mixtes. [7]

**I.5. Recherche bibliographique :**

Notre étude est basée sur un système de rafraîchissement d'air par humidification d'eau de type direct, donc on va se concentrer sur les études faites pour avoir une meilleure idée sur cette application thermique.

En 2012 **Djamel Benaoune [7]** au département de génie mécanique à Biskra en Algérie a réalisé une étude expérimentale pour le rafraîchissement de l'air par effet évaporation d'eau. Un banc d'essai a été réalisé, son étude a porté sur un type de fibre de palmier dattier de la région de Biskra qui constitue l'interface d'humidification, 03 épaisseurs ont été considérées respectivement 01, 02 et 03 cm.

Il a commencé ses expériences durant les mois de Novembre Décembre et Janvier 2010, les manipulations ont été réalisées dans le Hall technologique du département génie mécanique. Le protocole expérimental est constitué d'un conduit en forme de tunnel. La chambre comprend un conduit creux rectangulaire de dimension (0,3mx 0,3m) d'une longueur de 1,50 m en feuilles de Plexy-glass transparent d'épaisseur 0,04m, un ventilateur de soufflage est installé à l'extrémité avant du tunnel afin d'assurer un débit d'air constant réglable au moyen d'un potentiomètre.

Le ventilateur est conçu pour fournir un courant d'air sans la présence de la surface mouillée et en respectant la vitesse de confort. L'enceinte en fibre de palmier dattier est faite de bois avec un grillage en plastique qui permet l'air de passer à travers la fibre disposée à l'intérieur. Une conduite de distribution d'eau reliée à une pompe, est montée sur le haut de la boîte de fibres pour assurer une distribution uniforme de l'eau tout au long de l'enceinte, des trous de drainage au fond de la boîte assurent la récupération de l'eau. Pour la quantification des paramètres, un anémomètre à hélice est utilisé pour mesurer la vitesse de l'air et d'un psychromètre pour mesurer l'humidité relative, et des thermomètres placées respectivement à l'entrée et à la sortie de l'enceinte d'humidification pour mesurer la température de l'air, également un troisième thermomètre est placé dans le bac d'alimentation d'eau pour mettre en évidence l'effet de sa température sur les performances du système.

Pour mesurer la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air il a utilisé des instruments de mesures à affichage digitale de type KIMO fig.(I.8), il s'agit d'un anémomètre à hélice KIMO LV 110 pour mesurer la vitesse de l'air et d'un hygro-thermomètre pour mesurer l'humidité relative et la température de l'air avant et après la boîte constituant l'enceinte d'évaporation de type KIMO HD 100.



**Figure (I.6) :** Banc d'essai expérimental avec ventilateur de soufflage de l'air.[7]



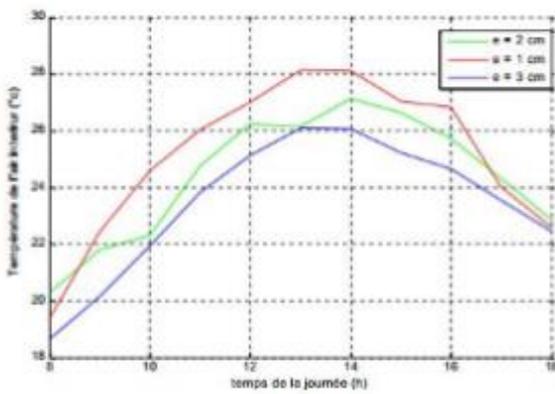
**Figure(I.7) :** Enceinte d'humidification en bois contenant des fibres végétales de palmier dattiers local.[7]



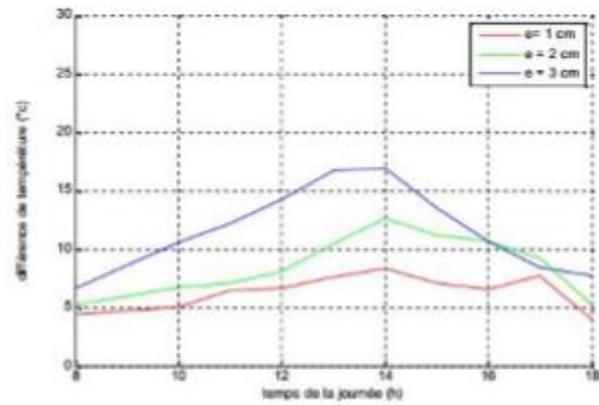
**Figure(I.8) :** Anémomètre à hélice de type KIMO LV 110.[7]

A travers les résultats expérimentaux il a été observé que la température de l'air interne augmente avec le degré d'air extérieur. La différence entre la température externe et interne augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne un maximum au environ de 14 H et diminue par la suite fig(I-09) et (I-10).

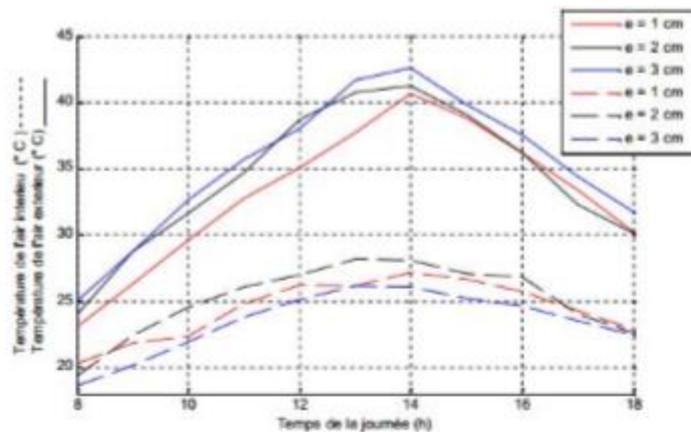
L'évolution de la température de l'air intérieur telle que représenté par la figure (I-09), montre que pour une épaisseur des fibres correspondant à 01cm, la valeur de la température maximale est atteinte au point culminant de 28,27 °C, alors qu'elle est de 29,13 pour l'épaisseur de 02cm, tandis que pour l'épaisseur de 03cm la température atteinte est 27 ,07°C. Quand à la différence de température, elle atteint son maximum à 14H de l'ordre de 8,8 °C pour 01 cm d'épaisseur de la fibre de palmier, 12,55 °C pour une épaisseur de 02 cm, alors pour l'épaisseur de 03 cm elle est de 16,34 °C.



**Figure (I.9) :** Variation de la température de l'air intérieur en fonction du temps pour 03 épaisseurs différentes de l'interface. [7]

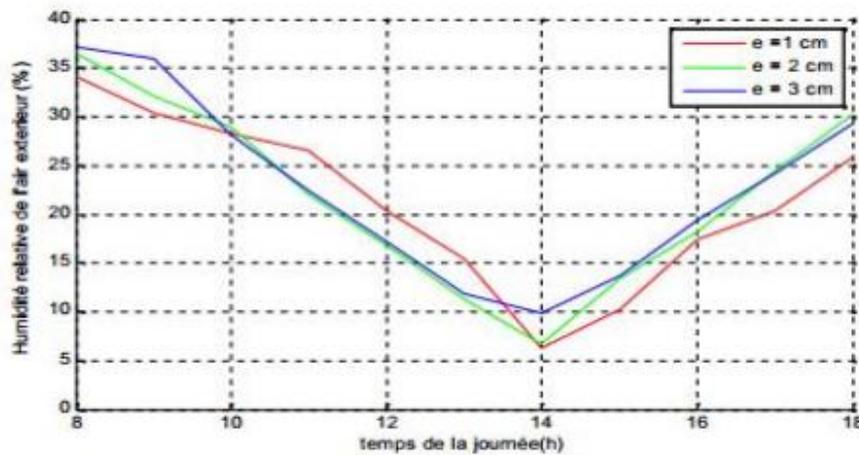


**Figure (I.10) :** variation de la différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur. [7]



**Figure(I.11) :** Variation de la de température de l'air extérieur et l'air intérieur. [7]

Pour l'humidité, son évolution durant la journée montre qu'elle est inversement proportionnelle à la température d'après figure (I.12), où l'humidité de l'air extérieur diminue jusqu'à atteindre un minimum de 06 % quand la température atteint sa valeur maximale pour la première journée d'essai, alors qu'elle est de 7% pour la deuxième journée et 10% pour la troisième journée. De même, pour l'humidité de l'air intérieur, qui diminue jusqu'à atteindre un minimum quand la température est minimale pour l'épaisseur de 01cm de l'ordre de 30%, alors que pour l'épaisseur de 02 cm, elle est de 36 %, finalement au environ de 43 % pour l'épaisseur de 03 cm Figure (I.13).



Figure(I.12) : Variation de l'humidité relative de l'air extérieur. [7]

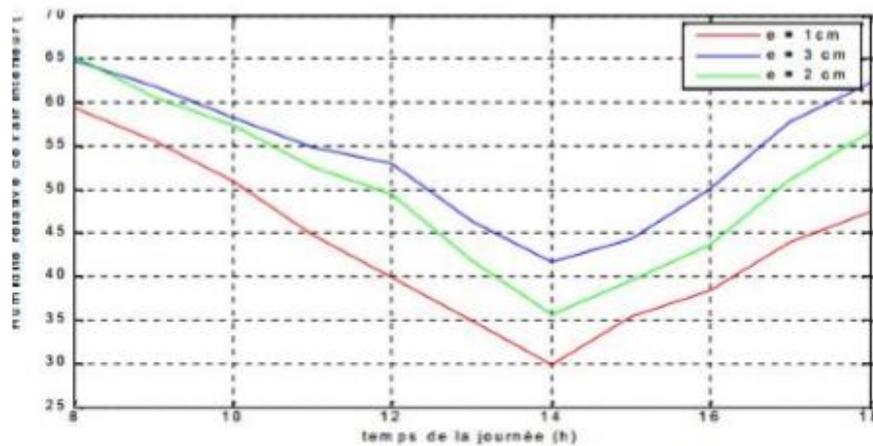
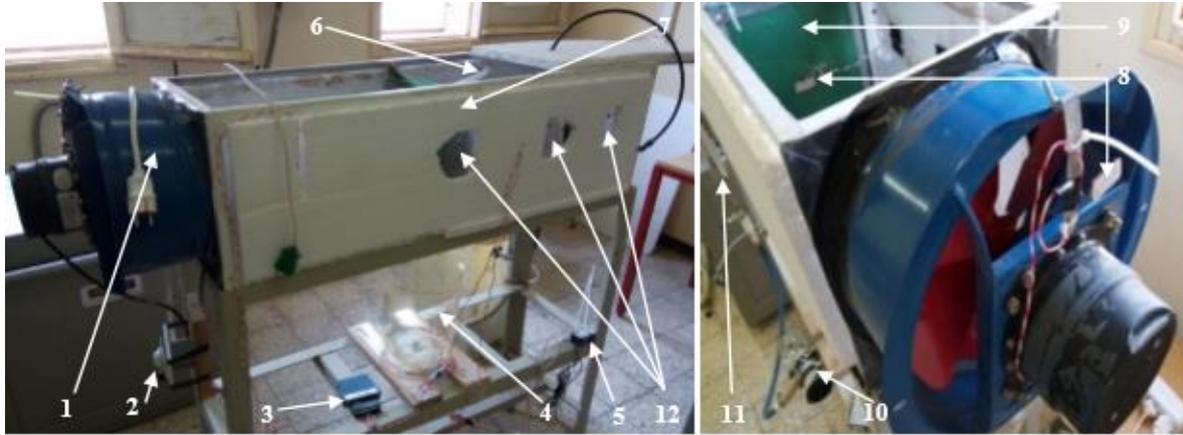


Figure (I.13) : Variation de l'humidité relative de l'air intérieur. [7]

En décembre 2017, **Sadam hocine sellam et all** [1], au laboratoire de génie mécanique à l'université de Biskra a réalisé une étude expérimentale pour évaluer l'efficacité énergétique et la performance thermique du système de rafraichissement de l'air par évaporation d'eau dans la région de Biskra à climat chaud et aride. Le but du travail était d'obtenir les conditions optimales de température, d'humidité relative et de la vitesse de l'air d'entrée. Une série de

mesures expérimentales ont été faites pour évaluer l'effet de rafraîchissement de l'air avec humidification par le phénomène de transfert de chaleur et de masse par contact direct entre l'air pénétrant et l'eau à travers les fibres de palmier dattier.



Description du banc d'essai			
1	Ventilateur	7	Tunnel d'air
2	Variateur de vitesse de l'air entrant	8	Thermocouples
3	Carte acquisition	9	Interface humide contenant des fibres de palmier
4	Réservoir d'eau gradué	10	Pompe d'eau
5	Sonde de température de l'eau	11	Débitmètre
6	Circuit d'arrosage	12	Orifices de mesure de l'humidité

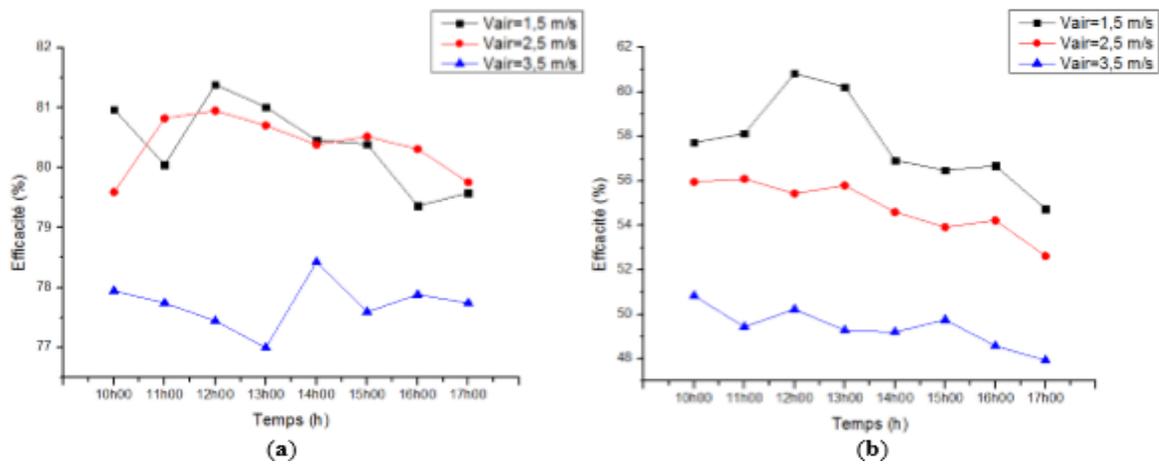
Figure(I.14) : Description du dispositif expérimental.[1]

Le rendement de ce système est défini par le rapport entre l'abaissement réel de la température de bulbe sec de l'air et l'abaissement de température théorique maximale, si le rendement était à 100 et l'air soufflé était saturé [4]. Pour évaluer la performance de rafraîchissement de l'air, ils utilisent le concept d'efficacité énergétique, exprimé par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_s)} \tag{I.1}$$

Où  $T_1$  est la température bulbe sec de l'air entrant,  $T_s$  est la température bulbe humide de l'air entrant, et  $T_2$  est la température bulbe sec de l'air sortant.

Les figures suivantes indiquent l'effet de l'épaisseur sur l'efficacité des interfaces humides, il peut voir que pour chaque épaisseur (2 et 3 cm), l'efficacité diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air d'entrée de 1.5 à 3.5 m/s, la raison est qu'avec une augmentation de la vitesse de l'air d'entrée, le temps de transfert de chaleur et de masse entre l'eau et l'air est réduit. De plus, avec l'augmentation de l'épaisseur, L'efficacité augmente. Cela signifie qu'il existe une épaisseur optimale de l'interface humide en fonction de l'efficacité nécessaire.



Figure(I.15) : Evolution de l'efficacité en fonction du temps et de l'épaisseur de l'interface des fibres (a) 3 cm, (b) 2 cm.[1]

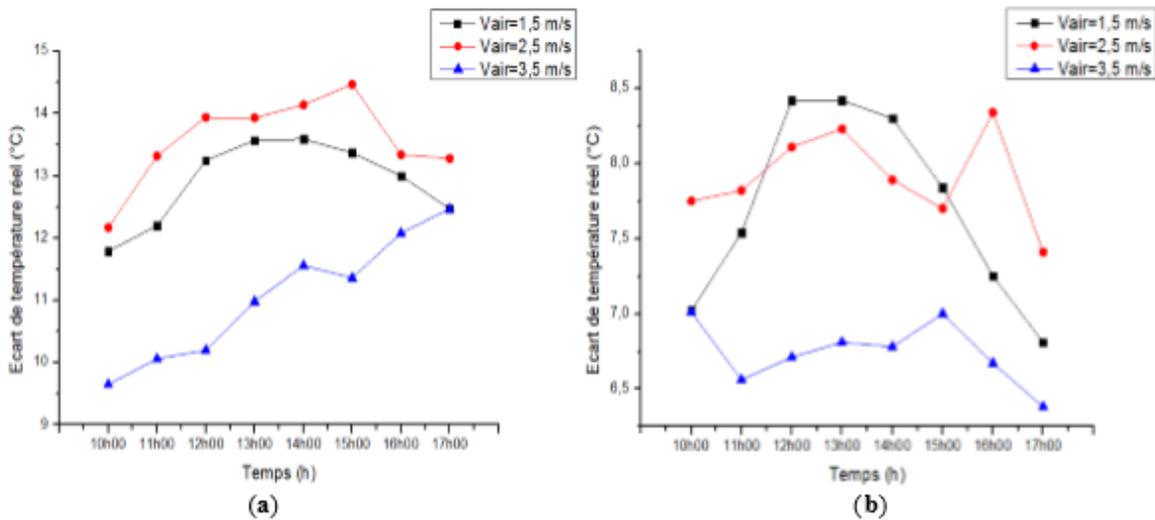


Figure (I.16) : Evolution de l'écart de température en fonction du temps et de l'épaisseur de l'interface des fibres (a) 3 cm, (b) 2 cm. [1]

En 2018, **Zohra Lahlouhi** [3], a réalisé une étude expérimentale pour le rafraîchissement de l'air par effet évaporation d'eau, au département de génie mécanique de l'université de Biskra. Dont le principal objectif est d'étudié expérimentalement les performances de deux types de fibres végétales de palmier dattier et de luffa, sous les conditions climatiques des zones arides et semi-arides, cas de la région de Biskra.

Pour cela une campagne de mesure a été entamée pour mesurer différentes paramètres, telles que l'humidité relative, la température et le débit d'air, la température et le débit d'eau par le

biais de différents outils de mesure afin d'obtenir les données nécessaires. Les expériences réalisées sur le dispositif de rafraîchissement ont été menées durant le mois de mai 2018.



**Figure (I.17) :** Banc d'essai expérimental.[3]

Dans ce travail deux types de fibres végétales sont testées, la fibre de luffa et le palmier dattier de la région de Biskra Fig (I.22), où ils ont associées en deuxième lieu en un seul pad d'une épaisseur de 03 cm deux types de fibres pour obtenir un pad hybride, tel que représenté par la figure(I.23)

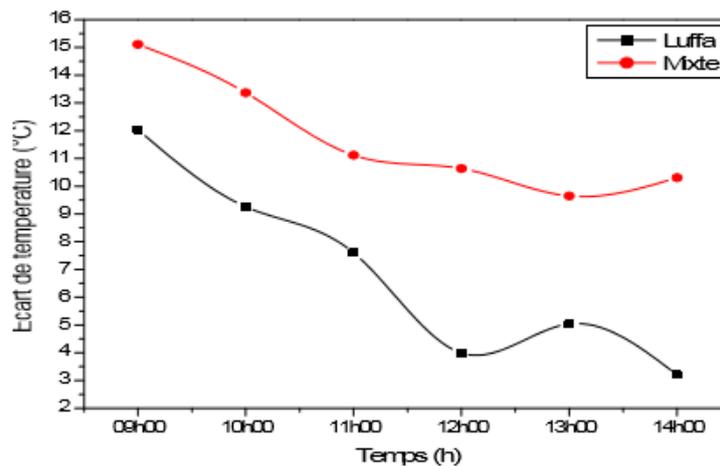


**Figure(I.18) :** Fibre de palmier dattier de la région de Biskra [3]



**Figure(I.19) :** Couches hybride constituées de fibres de luffa et de palmier dattier [3]

Concernant la variations des écarts de température en fonction du temps pour deux types d'interfaces humides d'épaisseur 02 cm respectivement Figure (I.24), en fibres de Luffa et mixte contenant fibres de luffa et palmier dattier, pour un débit d'eau comparatif de 0,4 l/min, on remarque que c'est en présence de l'interface hybride que l'écart de température est le plus important, d'autre part l'efficacité diminue lorsque le débit d'air acheminer augmente à travers le tunnel.



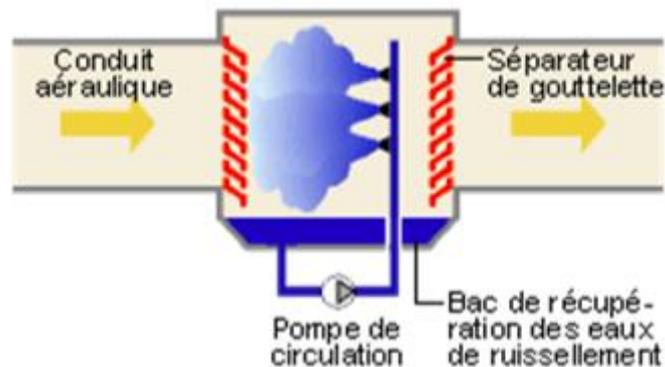
**Figure(I.20)** : Evolution de l'écart de température en fonction du temps et du débit d'air pour une épaisseur de 02 cm de pad hybride (luffa + palmier dattier) avec un débit d'eau comparatif de 0,4 l/min. [3]

En 2013, **EL HAMZAoui Narimane** [8], a réalisé une étude théorique et expérimentale sur l'humidification de l'air d'un local par pulvérisation d'eau dans un milieu saharien, Un système d'humification est conçu et expérimenté au sein de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar durant la période chaude d'été (Juillet-Aout). Le système porte sur l'humification d'un local en préfabriqué pour voir l'évolution de son état psychrométrique avant et après humification. Dont le principal objectif est de faire le point sur le conditionnement de l'air dans le milieu saharien par pulvérisation d'eau et l'étude des charges et du confort thermique dans un local.

Les systèmes à pulvérisation sont des processus à enthalpie pratiquement constante. La température sèche diminue au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'humidité.

Le principe commun à tous les systèmes à pulvérisation est de créer un brouillard formé par des microgouttelettes d'eau froide en suspension très fines Figure (I.24). Le mélange eau - air

doit être intime de telle sorte que l'évaporation de l'eau puisse se faire le plus rapidement possible



**Figure (1.21) :** Principe de fonctionnement des humidificateurs à pulvérisation d'eau [8]

En 2008, **José Rui Camargo [9]**, a étudié trois méthodes pour évaluer les performances d'un système de rafraîchissement par évaporation d'eau dans différentes régions du Brésil, caractérisés par des climats très variés. Dans une première étape, il présente le principe de base pour un système de rafraîchissement par évaporation d'eau directe et indirecte, où il détermine le coefficient de performance du système, ensuite il évalue parmi les trois méthodes lequel des systèmes est le plus efficace. Il conclut que le système de rafraîchissement par évaporation d'eau, a un grand potentiel dans le confort thermique et peut être utilisé comme alternatif aux systèmes conventionnels dans les régions où la température de bulbe humide est inférieure à 24 °C.

## I.6. Conclusion :

A travers cette étude bibliographique on essayé de donner une idée générale sur les différentes expériences et les travaux de recherches effectués sur le rafraîchissement par humidification d'air. On peut conclure que le rafraîchissement d'air par évaporation d'eau est l'une des meilleures techniques d'énergie renouvelables utilisée dans la climatisation l'habitat passif ou bien dans l'industrie, mais pour cela il adopter le bon type de matériau à travers les différentes critères principales afin d'assurer le bon fonctionnement du système.

*Chapitre II*  
*Etude théorique*

### II.1.Introduction :

Afin de mieux comprendre le comportement de l'air dans un processus de conditionnement d'air, une étude théorique doit s'adopter, ce qui impose une étude psychométrique de l'air et les propriétés thermodynamiques de l'air humide.

Il existe deux types principaux d'air :

- **Air sec :**

L'air sec est un mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, du gaz carbonique et en faibles quantités un certain nombre d'autres gaz tels que l'hélium, krypton, hydrogène, Argon,...etc. [10]

- **Air humide :**

L'air humide est un mélange gazeux d'air sec et de vapeur d'eau, la caractérisation de l'état thermodynamique de ce dernier nécessite la connaissance de la température, la pression et d'un troisième paramètre qui peut être l'une des grandeurs utilisées pour définir l'humidité (rapport de mélange, humidité relative, température de rosée, température humide, etc.), cela afin de déterminer tous les autres grandeurs telles que la masse volumique, le volume massique, l'enthalpie, etc.[10]

En appliquant la loi de Dalton à l'air humide, tel que : [ 10]

$$P_{at} = P_a + P_v \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$P_{at}$  : Pression de l'air humide (Pa)

$P_{as}$  : Pression de l'air sec (Pa)

$P_v$  : Pression de la vapeur d'eau (Pa)

### II.2.Propriétés et grandeur de l'air humide :

L'air humide est caractérisé par plusieurs grandeurs dont on gardera traditionnellement:

- ❖ La température (dite température sèche)
- ❖ La température humide ou température de thermomètre humide
- ❖ La température de rosée ou point de rosée

- ❖ L'humidité absolue ou teneur en eau
- ❖ L'humidité relative
- ❖ L'enthalpie

### II.2.1. Température sèche en °C :

C'est la température réelle de l'air humide observée à l'aide d'un thermomètre ou d'un capteur de température, elle est indiquée par un thermomètre non affecté par l'humidité de l'air.

### II.2.2. Température humide en °C :

C'est la température enregistrée par un thermomètre où le bulbe est recouvert d'une mèche imprégnée d'eau. Les températures humides sont toujours inférieures aux températures sèches, le seul cas, où elles sont identiques est avec une humidité relative à 100 %. [7]

### II.2.3. Température adiabatique de saturation:

C'est la température à laquelle l'air humide peut être apporté à saturation adiabatique par l'évaporation d'eau, c'est à dire à la température humide, aucun gain ou perte de la chaleur aux environnements. [7]

### II.2.4. Température de rosée en °C:

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide commence à se condenser au contact d'une surface froide. Au cours d'un refroidissement, l'humidité spécifique et la pression partielle de la vapeur d'eau restent constantes. [7]

### II.2.5. Humidité spécifique ou humidité absolue ou teneur en vapeur :

C'est la masse d'eau sous forme liquide, solide ou vapeur contenue dans 01 kg d'air sec. Ce poids d'eau reste constant lorsque la température ambiante varie sous réserve qu'elle ne tombe pas en dessous de la température de rosée. Si la température tombe en dessous du point de rosée, une partie de cette masse d'eau va se condenser sous forme de gouttelettes sur les parois les plus froides. [7]

$$\chi = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{II.2})$$

Où :  $m_v$  et  $m_a$  sont respectivement les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume  $V$  d'air humide, autrement  $(1+n)$  kg d'air humide contient donc 1 kg d'air sec et  $n$  kg de vapeur d'eau.

$$\chi = \frac{(P_v V / r_v T)}{(P_a V / r_a T)} \quad (\text{II.2}).a$$

Avec,  $P V = m R T$

$P_v$  et  $P_a$  : sont la pression partielle de la vapeur d'eau et la pression de l'air sec (Pa).

$r_v$  et  $r_a$  : sont les constantes spécifiques de l'eau et de l'air sec (J/Kg K).

T : Température (°K)

Où, P étant la pression totale de l'air humide exprimée par la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau et celle de l'air sec tel que : [7]

$$P = P_v + P_a \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $r_v = 461.5 \text{ J/Kg.K}$

$$r_a = 287 \text{ J/Kg.K}$$

Par conséquent l'expression de la teneur en humidité devient :

$$\chi = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{II.4}).b$$

### II.2.6. Humidité relative :

C'est la quantité d'eau sous forme de vapeur que contient un environnement d'air humide. C'est une valeur comprise entre 0 et 100 % qui indique le degré de saturation. Le brouillard apparaît à partir de la valeur  $\Phi = 100\%$  [11]. L'humidité relative est exprimée par le rapport :

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{vS}} \quad (\text{II.5})$$

Avec ,

$P_v$  : étant la pression partielle de vapeur d'eau.

$P_{vS}$  : la pression de la vapeur saturante qui correspond à l'état de saturation [7]

### II.2.7. Volume spécifique en m<sup>3</sup>/kg d'air:

Noté V ou  $V_s$  , C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air sec dans un ensemble des conditions spécifiques [7].

$$V = \frac{V_{ah}}{m_{as}} \quad (\text{II. 6})$$

Où:  $V_{ah}$  : est le volume d'air humide considéré ( $\text{m}^3$ )

$m_{as}$  : est la masse d'air sec contenu dans ce volume d'air humide (kg)

### II.2.8.Masse volumique en $\text{kg}/\text{m}^3$ d'air humide :

C'est la masse d'un d'air humide à la pression du mélange (air sec + vapeur d'eau) est égale la somme des pressions qu'aurait chacun des constituants s'il était seul à occuper le volume de l'ensemble. Donc dans un  $\text{m}^3$  d'air humide, on retrouve la somme des masses de constituants, c'est la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et températures désignées. [7]

### II.2.9.Chaleur sensible et chaleur latente :

La chaleur sensible est la quantité de chaleur dans l'air du à la température d'air. La chaleur latente est la chaleur dans l'air du à l'humidité d'air. Après ceci, l'air avec la même quantité d'énergie peut être de l'air chaud sec (chaleur sensible élevée) ou de l'air humide rafraîchis [7].

### II.2.10.Enthalpie :

L'enthalpie de l'air humide décrit l'état thermodynamique de son contenu énergétique. C'est la somme de deux composantes, air sec et vapeur d'eau. [11]

$$H = C_p T + \chi h_{1v} \quad (\text{II.7})$$

Avec,

$C_p$  : Chaleur massique de l'air ( $\text{J}/\text{Kg K}$ )

$\chi$  : Humidité absolue.

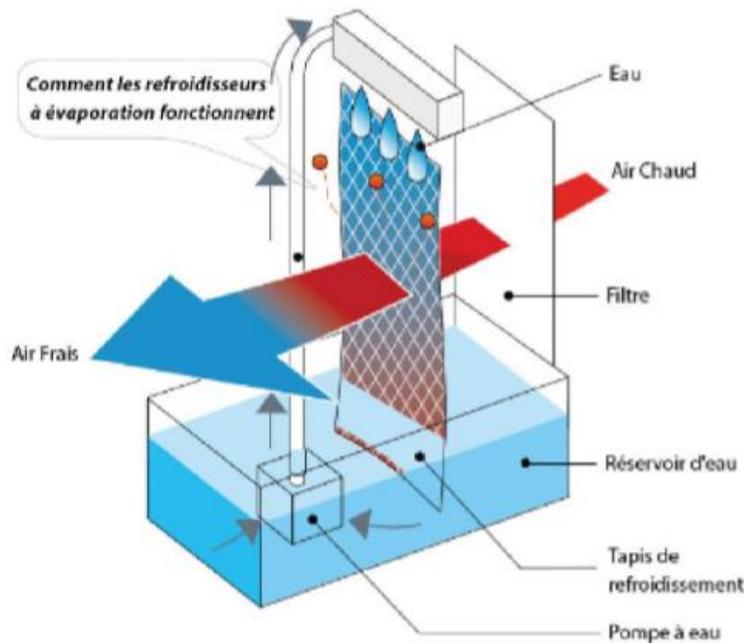
$h_{1v}$  : est l'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau.

### II.3.Principe de fonctionnement d'un échangeur évaporatif :

Le principe de fonctionnement dans un système de rafraîchissement d'air par évaporation d'est est tout simplement la conversion de la chaleur sensible en chaleur latente, ceci se fait lorsque l'air chaud passe par le pad moulé en utilisant un ventilateur afin de pousser un certain débit d'air vers le milieu humide , cela engendra une transmission d'une

partie de la chaleur sensible d'air vers l'eau qui s'évapore partiellement en forme de chaleur latente .[12]

Le rendement de ce système est défini comme le rapport entre l'abaissement réelle de la température de bulbe sec de l'air et l'abaissement de température théorique maximal, si le rendement était à 100 et l'air soufflé était saturé. [12]



**Figure (II.1)** : principe de rafraîchissement par évaporation directe. [13]

#### II.4.Diagramme de l'air humide :

Le diagramme de l'air humide tracé dans un système d'axes orthogonaux ( $P_v$ ,  $T$ ) est celui qui correspond au diagramme de Carrier, sachant qu'il existe d'autres types et représentation de diagramme différentes, à titre d'exemple on cite :

- Le diagramme de Mollier : ( $P_v$ ,  $i$ ).
- Le diagramme de Veron : ( $T$ ,  $x$ ) à coordonnées obliques à  $92^\circ$
- Le diagramme de Missenard : ( $i$ ,  $x...$ )

Le diagramme de l'air humide permet par une simple lecture directe sans effectuer aucun calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractéristiques de l'air humide connaissant uniquement deux paramètres d'entre elles. [3]

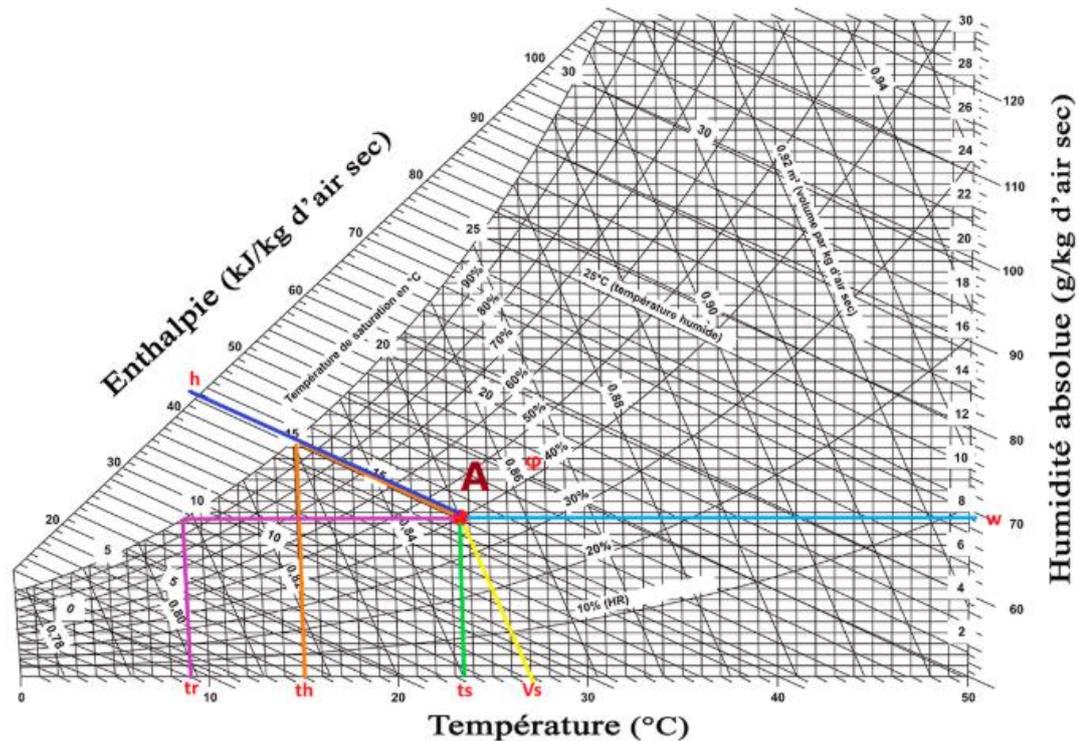


Figure (II.2) : Diagramme de l'air humide. [14]

### II.5. Analyse théorique du rafraîchissement de l'air par effet d'évaporation :

Afin d'établir l'expression analytique de l'efficacité d'un échangeur évaporatif, il faut tout d'abord analyser les différents bilans de transfert de chaleur et de masse dans une enceinte d'évaporation, ce qui revient à analyser les équations mathématiques décrivant les échanges ayant lieu étape par étape.

Sachant que le transfert de chaleur ne se passe que si les températures  $T_S$  et  $T_a$  sont différentes, de même pour le transfert de masse qui exige une différence de concentration en vapeur d'eau dans l'air et le milieu humide ( $W_a$  et  $W_S$ ). Donc la chaleur sensible élémentaire échangée est donnée par l'expression [12]:

$$\delta Q_S = h_c dA (T_S - T_a) \quad (\text{II.8})$$

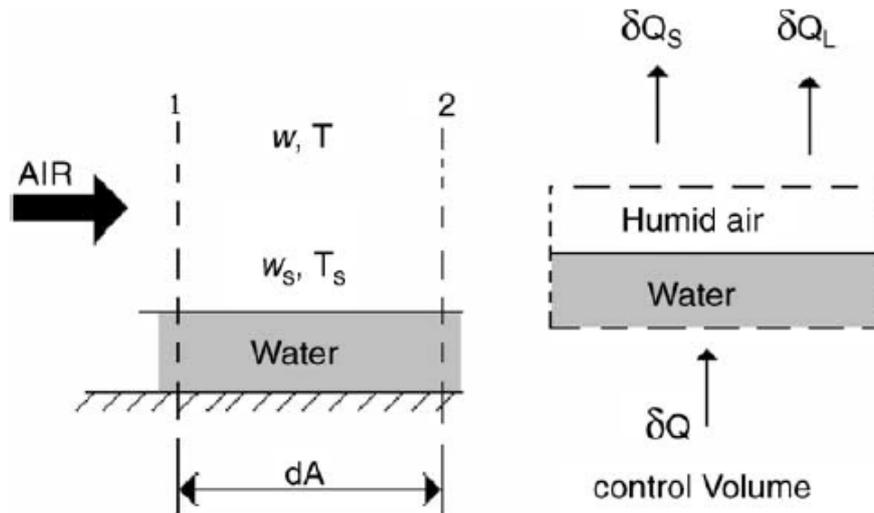
Avec :

$h_c$  : Coefficient d'échange par convection entre l'air et le pad humide ( $W/m^2.K$ )

$A$  : Surface de transfert de chaleur mise en jeu : surface totale mouillée ( $m^2$ ).

$T_S$  : Température de la surface humide ( $^{\circ}K$ )

$T_a$  : Température de l'air au voisinage de la surface humide ( $^{\circ}K$ )



**Figure II.3 :** Schématisation des bilans énergétiques dans un volume de contrôle dans l'enceinte d'humidification par évaporation d'eau [11]

Le coefficient  $h_c$  est déterminé à partir du nombre de Nusselt ( $N_u$ ) exprimé en fonction du nombre de Reynolds ( $R_e$ ) et le nombre de Prandtl ( $P_r$ ). [12]

Avec le nombre de Nusselt est exprimé par la relation suivante :

$$N_u = \frac{h_c L_c}{\lambda} \quad (\text{II.9})$$

Où,  $h_c$  : Coefficient de transfert thermique entre l'air et le pad humide ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).

$L_c$  : Le diamètre de la canalisation (tunnel) (m).

$\lambda$  : Conductivité thermique de l'air ( $\text{W}/\text{m K}$ ).

Le nombre de Reynolds est défini comme suit :

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (\text{II.10})$$

Avec,

$\rho$  : Masse volumique de l'air traversant le pad ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

$L$  : Le diamètre de la canalisation (tunnel) (m).

$v$  : vitesse moyenne de l'air traversant le pad (m/s).

$\mu$  : viscosité dynamique de l'air ( $\text{Kg}/\text{m.s}$ ).

D'autre part le nombre de Prandtl est donné par la relation :

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{II.11})$$

$C_p$ : Capacité thermique massique à pression constante de l'air (J/Kg K).

De la même manière, le masse élémentaire de vapeur d'eau  $m_v$  échangé entre le milieu humide et l'air est estimée par la relation suivante : [12]

$$dm_v = h_m dA (w_s - w) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$h_m$ : Coefficient de transfert de masse par convection entre le pad et l'air (Kg/m<sup>2</sup> s).

$dA$  : Zone de la surface de transfert de chaleur mise en jeu : surface totale mouillée (m<sup>2</sup>)

$w_s$  : L'humidité absolue du la fibre humide (kg<sub>eau</sub>/kg<sub>air humide</sub> )

$W$  : Humidité absolue (kg<sub>eau</sub>/kg<sub>air humide</sub> )

L'analyse des échanges dans l'interface air-liquide via l'interface humide (pad) permis de déduire la chaleur latente élémentaire  $\delta Q_L$  exprimée par la loi de conservation d'énergie donnée par l'expression. [12]

$$\delta Q_L = \delta Q - \delta Q_s = h_{LVS} \cdot d m_v \quad (\text{II.13})$$

Avec,

$h_{LVS}$  : Enthalpie spécifique de vaporisation d'eau à la température de surface (J/kg).

$\delta Q$  : est le flux de chaleur total (W)

$\delta Q_s$  : est le flux de chaleur latente (W)

Après réarrangement des équations (II.8) et (II.13) le flux de chaleur différentiel total est [13] :

$$\delta Q = [h_c (T_s - T) + h_m dA (w_s - w)]. dA \quad (\text{II.14})$$

L'équation (II.14) [12] indique que le transfert de chaleur total est le résultat d'une combinaison d'une partie provenant de la différence de température et d'une autre partie provenant de la différence des humidités absolues. Ces deux potentiels peuvent être combinés par la relation de Lewis (II.15) [12] de sorte que le flux de chaleur total sera exprimé par la différence d'enthalpie entre l'air près de la surface humide à l'entrée et le courant d'air passant à travers l'interface à la sortie.

L'utilisation de l'enthalpie spécifique du mélange, est défini comme étant la somme des enthalpies individuelles donnée par l'expression (II.15) de Lewis suivante [12] :

$$h_s - h = (h_{s a} - h_a) + (w_s h_{v s} - w \cdot h_v) \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$h_v$  : Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau (J/kg).

$h_{v s}$  : Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau à la température de surface du pad (J/kg).

$h_{s a}$  : Enthalpie spécifique de l'air sortant (J/kg)

$h_a$  : Enthalpie spécifique de l'air entrant après échange avec l'eau (humidité du pad ) (J/kg)

Avec l'hypothèse que l'air et la vapeur d'eau sont des gaz parfaits, il s'ensuit que :

$$h_s - h = C_{pu} \cdot (T_s - T) + h_{vs} \cdot (w_s - w) \quad (\text{II.16})$$

Où,

- $w_s$  : L'humidité absolue du la fibre humide ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{air}}$  )
- $W$  : Humidité absolue ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{air}}$  )
- $T_s$  : Température de surface du pad ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T$  : Température de l'air au voisinage du pad ou interface humide (K)
- $C_{pu}$  : Chaleur spécifique de l'air humide (J/kg K)

D'autre part, la chaleur spécifique humide est exprimée par :

$$C_{pu} = C_{p a} + w C_{p v} \quad (\text{II.17})$$

Avec,

$C_{p a}$ : Chaleur spécifique à pression constante de l'air sec (J/kg K)

$C_{p v}$  : Chaleur spécifique de la vapeur d'eau à pression constante (J/kg K)

Dans les conditions environnementales standard  $C_{p a} = 1006 \text{ J/kg k}$  et  $C_{p v} = 1805 \text{ J/kg}$ , par conséquent on aura :

$$T_s - T = \frac{(h_s - h) - h_{vs} \cdot (w_s - w)}{C_{pu}} \quad (\text{II.18})$$

La combinaison de l'équation (II.14) et (II.18) donne :

$$\delta Q = \frac{h_c \cdot dA}{C_{pu}} \left[ (h_s - h) + \frac{(w_s - w)}{R_{Le}} \cdot (h_{LVS} - R_{Le} \cdot h_{vS}) \right] \quad (\text{II.19})$$

Où :  $R_{Le}$  étant le nombre de Lewis adimensionnel donné par la relation suivante :

$$R_{Le} = \frac{h_c}{h_m \cdot C_{pu} \cdot \rho} \quad (\text{II.20})$$

En considérant que  $(h_{LVS} - h_{vS}) \approx h_{LS}$ , que le terme  $(w - w_s) h_{LS}$  est généralement négligeable en présence de la différence des enthalpies spécifiques  $(h_s - h)$ , de sorte que seul le premier terme entre parenthèses est significatif. De la même manière, le flux de chaleur total est causé par la différence des enthalpies spécifiques de l'air et de l'air saturé près de la surface humide, est donné par : [12]

$$\delta Q = \frac{h_c \cdot dA}{C_{pu}} (h_s - h) \quad (\text{II.21})$$

La chaleur sensible transférée à l'air traversant le pad est exprimée par :

$$\delta Q = m_a \cdot C_{pu} \cdot dT \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$m_a$  : Débit massique d'air (kg/s).

Par conséquent, la combinaison de l'équation (II.22) avec l'équation (II.8)] donnera [13]:

$$\delta Q = m_a \cdot C_{pu} \cdot dT = h_c dA (T_s - T) \quad (\text{II.23})$$

Cette dernière équation (II.23) peut être intégrée sur les deux parties :

$$\int_0^A \frac{h_c}{m_a \cdot C_{pu}} \cdot dA = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(T_s - T)} \quad (\text{II.24})$$

Dont la solution après intégration est de la forme:

$$1 - \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_s} = e^{-\frac{h_c \cdot A}{m_a \cdot C_{pu}}} \quad (\text{II.25})$$

Avec,

$T_1$  : est la température bulbe sec de l'air entrant (°K).

$T_2$  : est la température bulbe sec de l'air sortant (°K).

$T_s$  : est la température bulbe humide de l'air entrant (°K).

Le rapport des écarts de températures désigne l'efficacité d'un équipement de rafraîchissement par évaporation directe définie comme suit :

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_s} \quad (\text{II.26})$$

Autrement on a :

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{h_c \cdot A}{m_a \cdot C_{pu}}} \quad (\text{II.27})$$

L'analyse de l'équation (II.27), montre que pour atteindre une efficacité maximale de 100%, qui correspond à un flux d'air sortant de l'équipement à la température de bulbe humide de l'entrée, peut être réalisé qu'en présence d'un arrangement entre une grande surface de transfert et un coefficient de transfert de chaleur élevé pour un faible débit massique d'air.

On observe également que l'efficacité est constante si le débit massique d'air est constant, puisque, ce facteur contrôle directement et indirectement la valeur des autres paramètres de l'équation (II.27). [12]

## II.6. Conclusion :

L'étude théorique confirme l'avantage des systèmes de rafraîchissement d'air par effet d'évaporation d'eau, ce qui est résumé dans ces points suivants :

- L'air n'est pas stocké, le renouvellement de ce dernier est constant, cela améliore le bien-être des habitants.
- Les coûts d'investissement et d'exploitation sont faibles.
- Ce système est écologique: il n'utilise aucun réfrigérant.

Par contre, des inconvénients peuvent être soulignés tel que :

- Le système fonctionne moins bien lorsque le climat extérieur est chaud et humide (climats tropicaux).
- La température au soufflage est liée à celle extérieure: on ne peut pas maintenir à 15°C une salle toute l'année par exemple. [2]

## *Chapitre III*

### *Description du Dispositif Expérimental*

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une description générale du dispositif expérimental qui a fait objet de notre étude. Il s'agit d'une installation destinée pour le rafraîchissement de l'air par effet d'humidification d'eau qui a été conçue et réalisée dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra. Cette installation a été mise en place pour notre étude expérimentale, dont le principal objectif est d'étudier expérimentalement les performances de ce type de système sous les conditions climatiques des zones arides et semi-arides, cas de la région de Biskra.

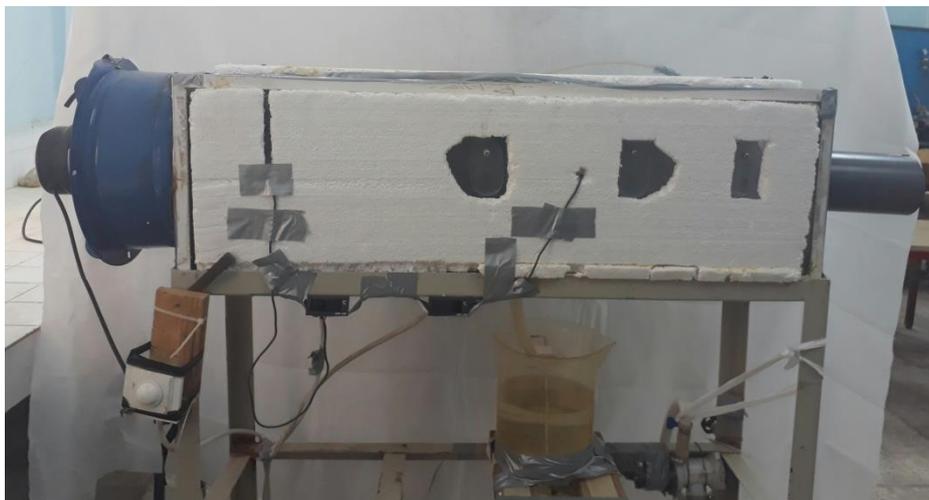
### III.2. Dispositif expérimental :

L'étude consiste à faire des essais avec deux types de pad, on considère trois cas :

- ✓ Le premier cas : pad de luffa sans fibres de palmier dattier
- ✓ Le deuxième cas: pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés de façon verticale.
- ✓ Le troisième cas: pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés de façon verticale et horizontale

Les expériences réalisées sur le dispositif de rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau ont été menées durant le mois de juin 2020, dans le Hall technologique du département génie mécanique de l'université de Biskra.

Le banc d'essai expérimental consiste en un tunnel rectangulaire en plexy-glass d'épaisseur 0.004 m transparent, de dimensions (0,3 m x 0,3 m), d'une longueur de 1 m, isolé sur tous les cotés avec une couche épaisse en polystyrène extrudé.(Figure III.1)



**Figure (III.1) :** Banc d'essai expérimental.

Afin de déterminer l'influence de débit d'air sur les performances de l'échangeur, un ventilateur de soufflage est placé à l'entrée de ce dernier, le débit d'air sera réglable avec un potentiomètre électronique afin d'ajuster le débit et la vitesse d'air souhaitée (Figure III.2).

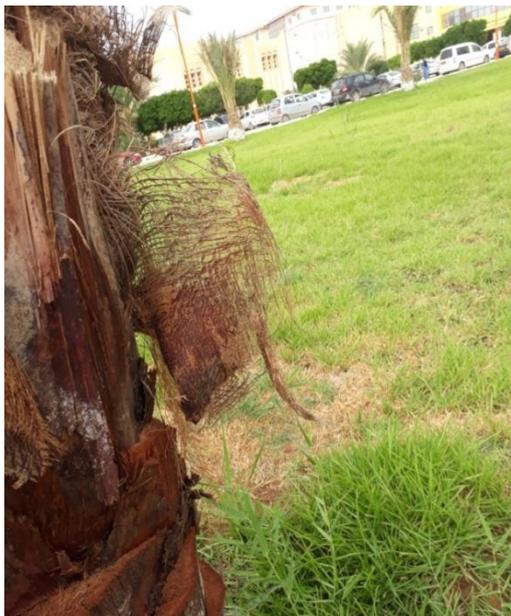


**Figure (III.2) :** Ventilateur d'air réglable dont le débit est ajusté avec un potentiomètre

L'élément de base qui constitue le milieu humide « pad » qui assure le rafraîchissement par humidification de l'air est fabriqué de fibres végétales de Luffa figure (III.3) et de palmiers dattier figure (III.4) de la région de Biskra. Le luffa il est une sorte de fruit qui la forme d'une courgette. Après le nettoyage, il est découpé en morceaux, ensuite sont assemblés les unes aux autres pour constituer un pad d'une épaisseur de 03 cm figure (III.5) et (III.6)



**Figure (III.3):** Photographie du matériau végétal fibreux « le Luffa » utilisé comme interface humide dans le procédé de rafraîchissement d'air.



**Figure (III.4):** Fibre de palmier dattier de la région de Biskra

L'enceinte d'humidification «pad» contenant les fibres de luffa est placée à l'intérieur du banc d'essai au milieu. Dans ce travail expérimental on va considérer trois types de pad ; le premier pad est constitué uniquement de fibres de Luffa (Figure (III.5) et (III.6)), le second pad comporte des fibres de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement dans le même sens que l'eau pulvérisée provenant des buses d'arrosage (Figure III.7), le troisième pad est constitué de fibres de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement (Figure III.8). Ces enceintes sont cadrées en métal galvanisé et couvertes avec une toile en plastique perforée afin de garder la forme uniforme des fibres et de permettre à l'air de traverser librement l'enceinte d'humidification.



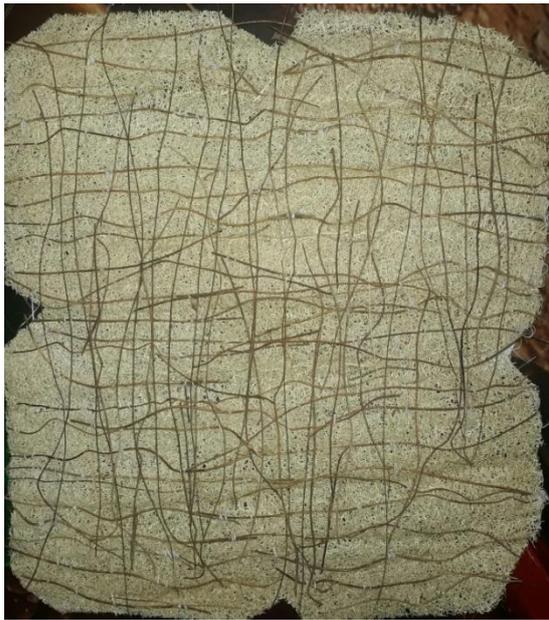
**Figure (III.5) :** Pad en fibres de luffa recouvertes d'une toile en plastique perforée



**Figure (III.6) :** Pad constitué de fibres de luffa

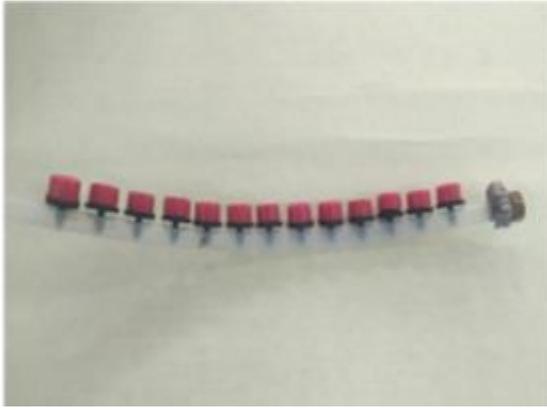


**Figure (III.7) :** pad de luffa avec fibres de palmier de palmier dattier fixées verticalement



**Figure (III.8) :** pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement

Pour assurer l'humidification de l'interface de rafraîchissement de l'air, un circuit de drainage a été conçu constitué d'un tuyau en plastique de diamètre intérieur de 06 mm Figure (III-9), où on a réalisé de petites orifices équidistantes, dans lesquelles on a introduit des buses réglables permettant d'alimenter et d'humidifier en permanence le pad contenant les fibres par un débit d'eau adaptable en gouttes à gouttes figure (III.10)

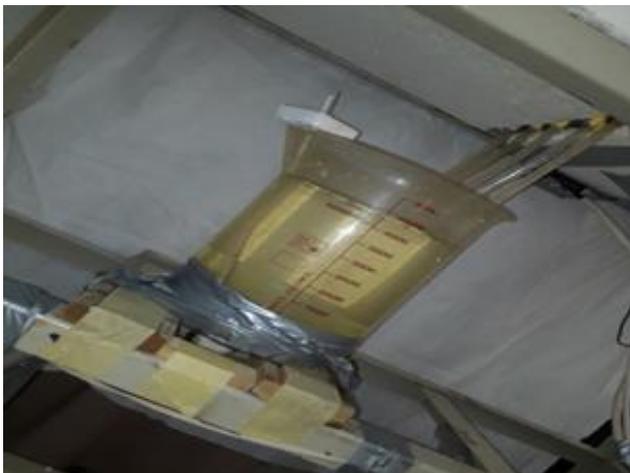


**Figure (III.9) :** circuit de drainage d'eau comportant des buses ajustables



**Figure (III.10) :** buses réglables permettant d'assurer un débit d'eau en goutte à goutte

Un réservoir d'eau gradué est placé en bas du tunnel Figure (III-11), relié par une conduite en plastique pour arroser continuellement et humidifier le pad. La circulation de l'eau du réservoir vers le pad est assurée par une pompe à eau, dont le débit est mesuré par un débitmètre à flotteur réglable au moyen d'une vanne d'alimentation figure (III-12).



**Figure (III.11):** réservoir d'eau gradué avec une pompe à eau d'alimentation et humidification du pad.



**Figure (III.12) :** Débitmètre à flotteur muni d'une vanne d'alimentation pour ajuster le débit



**Figure (III.13) :** Système de distribution d'eau

Pour mesurer les principaux paramètres intervenant durant le fonctionnement du banc d'essai, on a utilisé les instruments de mesures suivants :

- Un anémomètre à hélice pour mesurer la vitesse de l'air véhiculé dans le tunnel de rafraîchissement Figure (III.14) .
- Un hygromètre pour mesurer l'humidité relative respectivement à l'entrée et à la sortie du tunnel Figure (III.15).
- Des capteurs de températures à afficheur électronique placés respectivement à l'entrée à la sortie du tunnel, pour évaluer les températures de l'air avant et après le rafraîchissement Figure (III.16).



**Figure (III.14) :** Anémomètre à hélice de type KIMO LV 110



Figure (III.15) : Hygromètre de type Testo 625.



Figure (III.16) : Capteurs de température avec afficheurs électroniques

### III.3. Paramètres climatiques mesurés

L'objectif de cette étude expérimentale est de mesurer les paramètres climatiques qui affectent le comportement thermique du système de rafraîchissement de l'air par effet d'évaporation d'eau et qui interviennent directement durant le fonctionnement de l'installation expérimentale.

Les principaux paramètres climatiques mesurés sont :

- Température de l'air à l'entrée du tunnel et à la sortie respectivement avant et après le pad de fibres végétales.
- L'humidité relative en %, avant et après le pad de fibres à travers des orifices circulaires réalisées sur le côté latéral du tunnel.

- La vitesse de l'air en m/s, mesurée à la sortie du tunnel à travers une conduite circulaire en PVC.

Les mesures ont été effectuées durant le mois de juin 2020, l'air au début est directement soufflé à travers le dispositif expérimental, se trouve refroidi en passant à travers le pad humidifié et arrosé par un système de drainage aménagé par le haut. Les relevés sont retenues chaque heure.

Ci-joint un exemple typique d'un tableau de mesure comportant les paramètres mesurables durant les expériences

Pad hybrid eep=3 cm	V <sub>air</sub> [m/s]	Débit eau[l/min]	T <sub>e</sub> (c°)	T <sub>i</sub> (c°)	T <sub>h</sub> (c°)	Ecart (c°)	T <sub>sh</sub>	φ <sub>e</sub> (%)	φ <sub>s</sub> (%)	Q <sub>eau</sub> Cons [ml]	T <sub>eau</sub> (c°)	ε
09h00												
09h30												
10h00												
10h30												
11h00												
11h30												
12h00												
12h30												
13h00												
13h30												
14h00												
14h30												
15h00												
15h30												
16h00												

**Tableau III.1 : Exemple d'un tableau des relevés expérimentales**

Avec :

T<sub>e</sub>: Température de l'air extérieur (ambiante) en °C.

T<sub>i</sub> : Température de l'air intérieur (entrée) en °C.

T<sub>h</sub>: Température humide de l'air (sortie) en °C.

T<sub>sh</sub>: Température de la surface humide °C.

φ<sub>e</sub> : Humidité relative de l'air à l'entrée du tunnel.

φ<sub>s</sub> : Humidité relative de l'air à la sortie du tunnel.

T<sub>eau</sub> : Température de l'eau dans le bac en °C

V<sub>air</sub> : Vitesse de l'air soufflé en m/s

ε : efficacité du dispositif de rafraichissement.

*Chapitre IV*  
*Résultats et discussions*

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, dédié à la discussion et à l'interprétation des résultats obtenus à partir de l'étude expérimentale effectuée sur le banc d'essai du rafraichissement d'air par humidification d'eau (voir chapitre III). Les relevés expérimentaux sont reportés dans des tableaux afin d'évaluer et de suivre en fonction du temps la variation des paramètres de performances, à savoir l'efficacité, la température et l'humidité relative de l'air à la sortie du pad, pour chacune des expériences et de vérifier l'effet de la nature et la structure du pad sur ces paramètres, pour des conditions de fonctionnement tenus constants, notamment le débit d'air soufflé à l'entrée du tunnel et le débit d'eau véhiculer pour arroser l'interface humide conçue de fibre de luffa et de fibres de palmier dattier.

Dans cette étude expérimentale on a considéré troius types de pad :

- ✓ Pad de luffa sans fibres de palmier dattier
- ✓ Pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés verticalement dans le sens d'injection des goutteltes d'eau provenant des buses d'arrosage montées sur une conduite en plastique.
- ✓ Pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés verticalement et horizontalement

Les trois tableaux de mesures (IV.1), (IV.2) et (IV.3) représentent les relevées expérimentales qui ont été réalisés avec les trois types de pad, les mesures sont effectuées chaque 30 mn à partir de 09 H matin jusqu'à 16 H de l'après midi, où on a essayé de suivre en fonction du temps la variations des principaux paramètres affectant le fonctionnement du dispositif expérimental, sachant que le débit d'air à l'entrée du tunnel et le débit d'eau arrosé sont maintenus constants durant tout le protocole expérimental.

## IV.2. Résultats expérimentaux obtenus :

Temps	$V_{\text{air}}$ [m/s]	$Q_{\text{v-eau}}$ [l/min]	$T_e$ °C	$T_i$ °C	$T_h$ °C	$\Delta T$ (°C)	$T_{\text{sh}}$	$\phi_e$ (%)	$\phi_s$ (%)	$Q_{\text{eau}}$ [ml] (réservoir)	$T_{\text{eau}}$ (°C)	$\epsilon$
09H00	5	0.6	33.4	33.1	29.1	4	18.62	23.8	25.4	4700	29	0.27
09H30	5	0.6	34.2	33.8	29.3	4.5	18.67	22.2	25	4600	25	0.29
10H00	5	0.6	34.0	32.2	29.1	3.1	17.73	22.6	26.7	4400	24	0.21
10H30	5	0.6	34.3	34	29.6	4.4	18.77	22.1	25.3	4300	22	0.28
11H00	5	0.6	34.1	33.7	29.4	4.3	18.58	22.1	25.1	4100	21.5	0.28
11H30	5	0.6	33.9	33.8	29.6	4.2	17.84	19.1	23.6	4000	21.3	0.26
12H00	5	0.6	34.1	33.9	29.6	4.3	18.47	21.2	24.1	3800	21	0.27
12H30	5	0.6	34.5	34.2	30	4.2	18.50	20.6	23.2	3600	21	0.26
13H00	5	0.6	34.9	34.4	30.4	4	18.13	18.8	22.1	3400	21	0.24
13H30	5	0.6	34.5	34.4	30.2	4.2	18.54	20.3	22.4	3300	21	0.26
14H00	5	0.6	34.6	34.5	30	4.5	18.88	21.3	24.5	3200	21	0.28
14H30	5	0.6	34.6	34.3	30	4.3	18.97	22.1	24.7	3000	21	0.28
15H00	5	0.6	35.1	34.4	30.3	4.1	18.79	21.4	23.5	2800	21	0.26
15H30	5	0.6	35.3	34.6	30.5	4.1	19.43	23.1	25.2	2700	21	0.27
16H00	5	0.6	35.5	34.9	30.6	4.3	19.41	22.3	25.0	2600	21	0.27

**Tableau IV.1** : paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de Luffa d'épaisseur  $e=03$  cm.

Temps	$V_{\text{air}}$ [m/s]	$Q_{\text{v-eau}}$ [l/min]	$T_e$ °C	$T_s$ °C	$T_h$ °C	$\Delta T$ (°C)	$T_{\text{sh}}$	$\varphi_e$ (%)	$\varphi_s$ (%)	$Q_{\text{eau}}$ [ml] (réservoir)	$T_{\text{eau}}$ (°C)	$\varepsilon$
09H00	5	0.6	36.7	36.2	30.3	5.9	22.87	32	37	4700	28	0.44
09H30	5	0.6	36.3	36.4	27.6	8.8	23.20	32.7	39	4600	25	0.66
10H00	5	0.6	36.9	36.9	27.2	9.7	22.85	30	41	4500	24	0.69
10H30	5	0.6	35.3	35.1	27.6	7.5	21.92	31.4	36	4200	23.5	0.56
11H00	5	0.6	34.4	34.3	27.5	6.8	21.39	31.6	39	4100	23	0.52
11H30	5	0.6	34.8	32.3	27.6	4.7	19.81	31	39.2	4000	23	0.37
12H00	5	0.6	34.1	32.6	27.6	5	20.33	32.3	37.6	3700	22	0.40
12H30	5	0.6	36.5	35.6	27.5	8.1	22.64	32.8	39.1	3500	21	0.62
13H00	5	0.6	37.7	35.1	27.7	7.4	21.97	31.6	38.2	3400	21	0.56
13H30	5	0.6	38.1	37.0	28.1	8.9	23.53	32.3	39.9	3200	21	0.65
14H00	5	0.6	38.5	36.1	28.3	7.8	22.70	31.6	38.4	3000	20	0.58
14H30	5	0.6	38.6	36.2	28.1	8.1	22.38	30.1	38	2800	20	0.58
15H00	5	0.6	38.5	36.0	28.4	4.6	22.52	31.2	38.2	2600	20	0.34
15H30	5	0.6	38.7	37.9	29.5	5.4	23.76	30.7	36.5	2500	20	0.38
16H00	5	0.6	39	37.2	30.6	4.6	23.09	30.1	35	2300	20	0.32

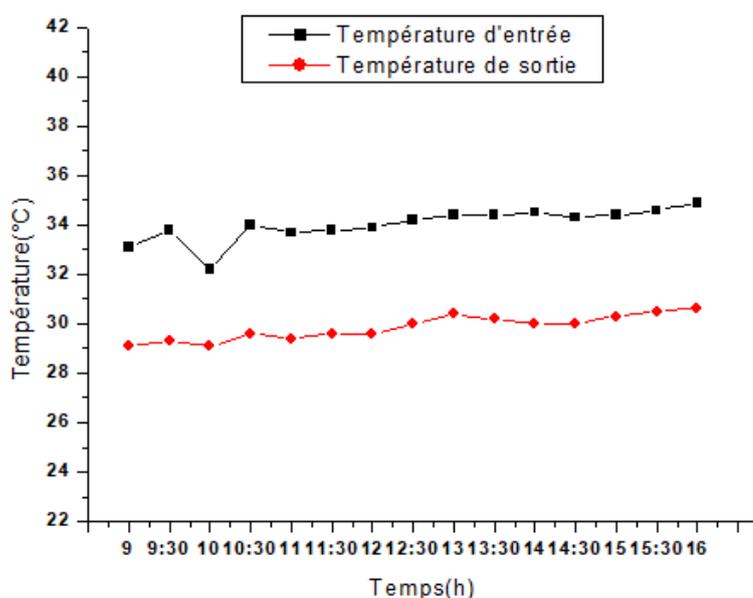
**Tableau IV.2 :** paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de luffa d'épaisseur 03 cm et de fibres de palmier dattier fixées verticalement.

Temps	$V_{\text{air}}$ [m/s]	$Q_{\text{v-eau}}$ [l/min]	$T_e$ °C	$T_s$ °C	$T_h$ °C	$\Delta T$ (°C)	$T_{\text{sh}}$	$\varphi_e$ (%)	$\varphi_s$ (%)	$Q_{\text{eau}}$ [ml] (réservoir)	$T_{\text{eau}}$ (°C)	$\varepsilon$
09H00	5	0.6	38.5	38.1	32	6.1	22.32	25.1	29.6	4700	28	0.38
09H30	5	0.6	38.9	38.6	30	8.6	23.01	26.3	32	4600	26	0.55
10H00	5	0.6	35.1	34	26	8	20.34	28.2	35.6	4500	24.2	0.58
10H30	5	0.6	35.7	35.2	26.8	8.4	21.13	28	37.9	4400	23	0.60
11H00	5	0.6	36.3	36.2	26.1	10.1	21.15	25.5	35.3	4100	21	0.67
11H30	5	0.6	36.5	36.1	27.2	8.9	20.11	22	28.9	4000	21	0.56
12H00	5	0.6	36.8	36.4	24.6	11.8	21.42	25	38.2	3900	20	0.78
12H30	5	0.6	39.3	38.4	24.8	13.6	21.90	23	40.9	3800	19	0.82
13H00	5	0.6	38.6	37.8	24	13.8	21.98	24.6	37.2	3500	19	0.87
13H30	5	0.6	38.3	37.9	28.3	9.6	22.45	26	34.9	3300	19	0.62
14H00	5	0.6	38.7	38.5	28.4	10.1	22.68	25.4	36.4	3000	19	0.63
14H30	5	0.6	38.9	38.1	28.1	10	22.50	25.7	38.7	2800	18	0.64
15H00	5	0.6	39.4	39.2	27.6	11.6	22.83	24.3	39.2	2600	18	0.70
15H30	5	0.6	39.8	39.5	28.5	11	22.84	23.7	38.6	2400	18	0.66
16H00	5	0.6	40.7	40.5	30	10.5	23.62	22.9	39.9	2200	18	0.62

**Tableau IV.3 :** paramètres climatiques mesurés en fonction du temps avec un pad de luffa d'épaisseur 03 cm et de fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement

### IV.2.1. Variations des températures en fonction du temps :

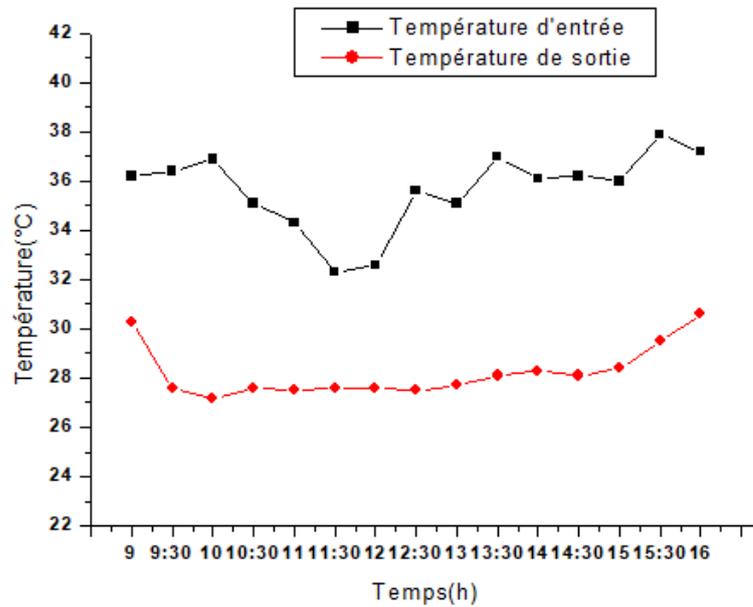
Les figures (IV.1), (IV.2) et (IV.3) montrent les variations de température d'entrée et sortie pour les trois types de pad. On remarque que dans le cas du pad conçu de luffa uniquement, un écart de température moyen de 04 °C est enregistré entre l'entrée et la sortie de l'interface humide, Figure (IV.1), de la même sorte que pour l'humidité relative de l'air, un écart variant entre 1 à 3 % entre l'entrée et la sortie du pad a été relevé. L'abaissement de la température de l'air et l'augmentation de son humidité relative est due à un transfert de chaleur et de masse via l'interface humide, par suite d'un arrosage par de l'eau provenant d'un système de buses réglables qui permettent d'humidifier en permanence le pad en fibre de luffa. D'autre part, on a observé une perte d'une quantité d'eau dans le réservoir gradué de 2500 ml au bout de 08 heures de fonctionnement. La quantité d'eau perdue est tout simplement récupérée sous forme d'humidité associée à l'air entrant, augmentant ainsi son humidité relative Figure (IV.4).



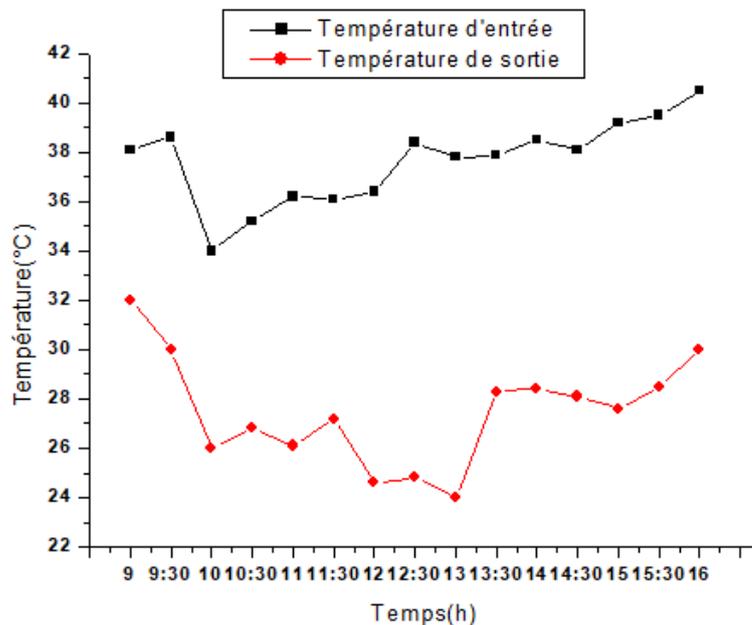
**Figure (IV.1) :** Variations des températures d'entrée et sortie pour le pad de Luffa

Dans le cas de pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement dans le sens d'eau pulvérisée par les buses, un écart de température moyen de 06,8 °C est relevé entre l'amont et l'aval de l'interface humide, Figure (IV.2), d'autre part, l'écart d'humidité relative de l'air moyen est de 6,7 % est enregistré entre les points de mesures à l'entrée et la sortie du pad variant entre 5 à 11 % Figure (IV.5). On remarque par conséquent, que l'insertion de plusieurs rangées verticales de fibres de palmier dattier améliore sensiblement les performances du système de rafraîchissement d'air par un abaissement de sa température et une augmentation de son humidité

relative , avec une efficacité variant entre 32 à 69 %. En effet les fibres de palmier dattier ont un pouvoir de rétention en eau supérieure que le luffa seule, D'autre part la quantité d'eau perdue sous forme d'humidité récupérée par l'air soufflé est de 2400 ml tableau (IV.2) après 08 heures de marche, pour des conditions de fonctionnement identiques.



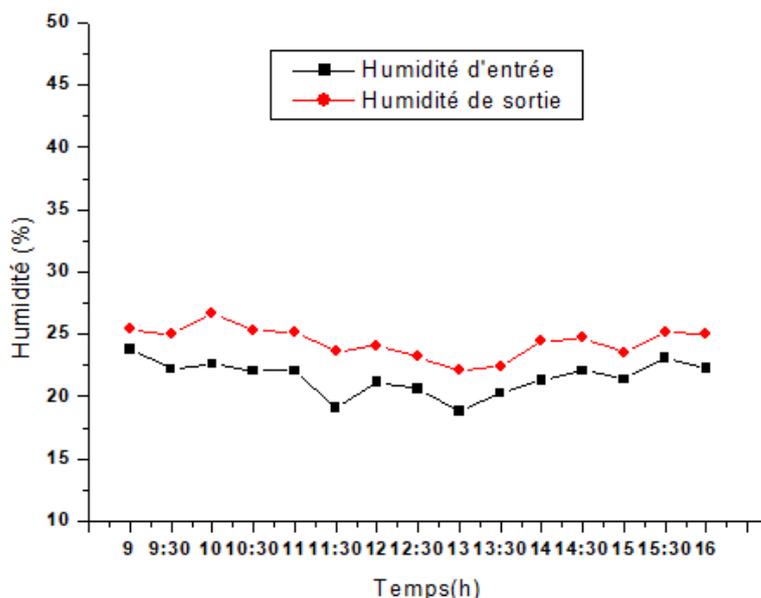
**Figure (IV.2) :** Variation des températures d'entrée et sortie pour un pad de luffa avec rangées de fibres de palmier dattier fixées verticalement



**Figure (IV.3) :** Variation des températures d'entrée et sortie pour un pad de luffa avec rangées de fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement

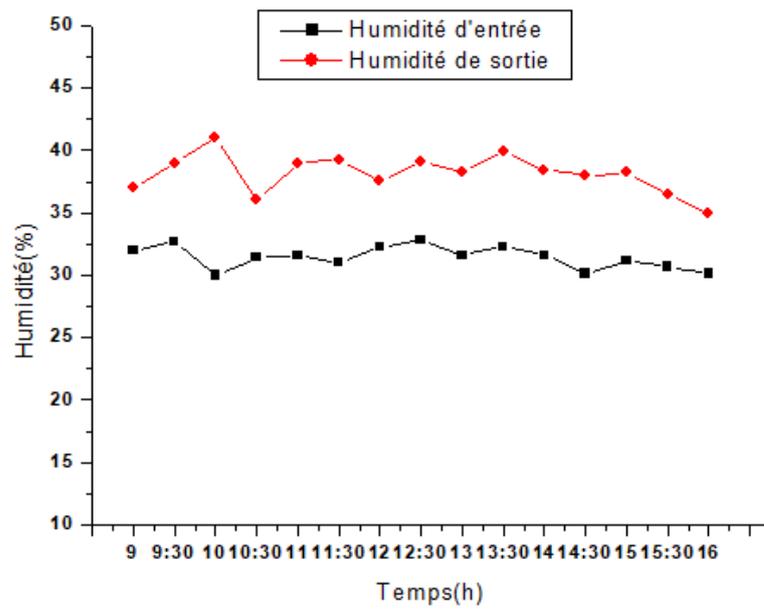
Pour le troisième pad de luffa avec plusieurs rangées de fibres de palmier datier horizontales et verticales, l'écart moyen de température relevé est deux fois supérieure que le pad de luffa de 10 °C Figure (IV.3), alors que l'écart moyen d'humidité relative de l'air véhiculé de l'entrée à la sortie du tunnel est de 11 % variant entre 4 à 17 % Figure (IV.6), d'autre part la quantité d'eau transformée sous forme d'humidité dans l'air est de 2500 ml d'eau durant 08 de fonctionnement Tableau (IV.3).

**IV.2.2. Variations de l'humidité relative en fonction du temps :**

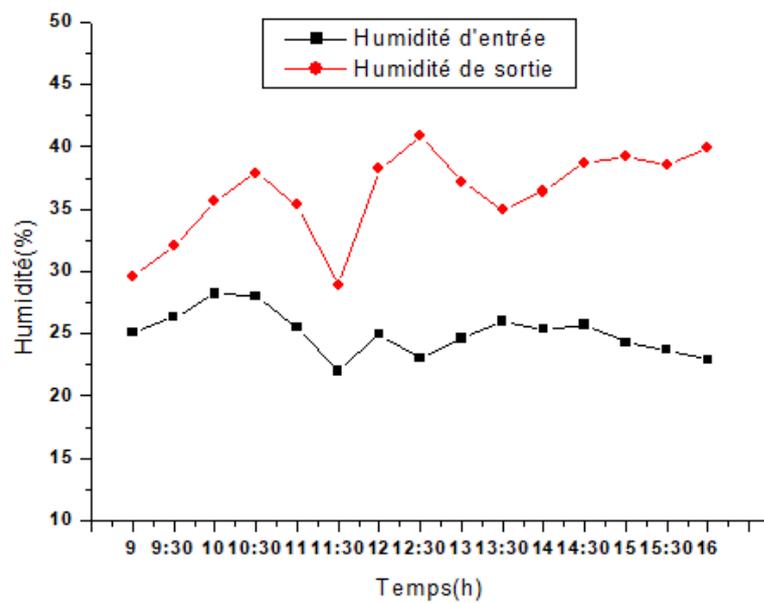


**Figure (IV.4) :** Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa

L'insertion des fibres de palmier dattier montées verticalement et horizontalement a permis d'apporter de nettes améliorations sur les performances de rafraichissement de l'air, par un abaissement de la température de la sortie allant de 06 à 14 °C et une augmentation de l'humidité relative de 4.5 à 18 %, d'autre part l'efficacite de dispositif en presence d'un pad hybride avec des fibres de palmier dattier a augmenté considerablement pour dépasser la valeur de 80 % vers midi par rapport au pad type 01 et 02, ce qui traduit l'effet des fibres de palmier dattier et les améliorations apportés au système de rafraichissement d'air par effet d'évaporation d'eau, grace à leur pouvoir de rétention en eau durant le fonctionnement de l'installation.

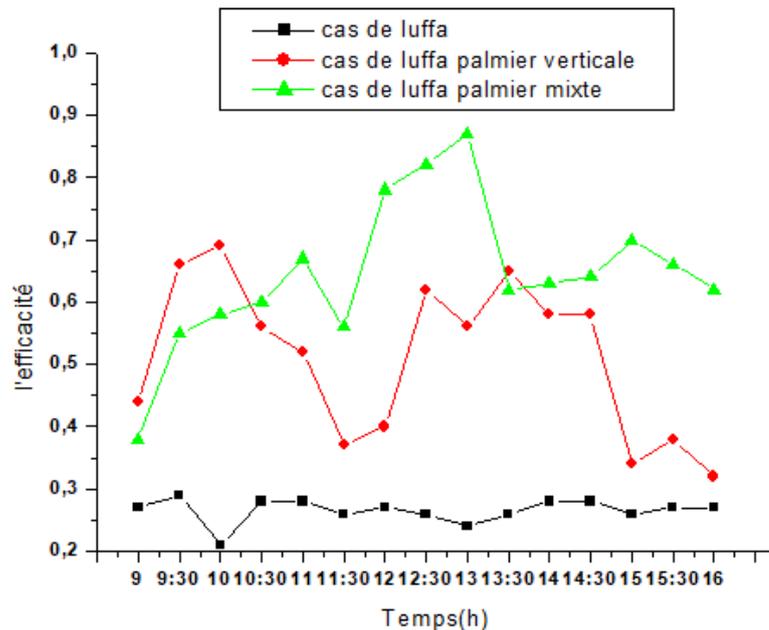


**Figure (IV.5) :** Variation de l’humidité relative de l’air à l’entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement



**Figure( IV.6) :** Variation de l’humidité relative de l’air à l’entrée et à la sortie en fonction du temps pour un pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement et horizontalement

### IV.2.3. Variations de l'efficacité en fonction du temps :



**Figure (IV.7) :** Variation de l'efficacité en fonction du temps pour trois types de pad étudiées ( luffa, luffa +fibres verticales , luffa + fibres verticales et horizontales).

L'analyse des courbes qui décrivent l'évolution de l'efficacité en fonction du temps pour les trois types de pad Figure (IV.7) , montre que c'est le pad hybride de luffa qui comporte plusieurs rangées de fibres montées verticalement et horizontalement qui a la meilleure efficacité de rafraichissement variant entre 38 et 87 %, ensuite c'est le pad de luffa type 02 avec des fibres de palmier dattier fixées verticalement, ou l'efficacité varie entre 32 et 69 %, par contre la plus faible efficacité a été relevé avec le pad de type 01 constitué de luffa uniquement variant entre 24 et 28 %. Les améliorations apportées en terme de performances de rafraichissement d'air avec le dispositif expérimental avec un pad à base de luffa reviennent à l'adjonction de plusieurs rangées de fibres de palmier dattier verticalement et horizontalement, permettant ainsi une rétention supplémentaire d'humidité et un transfert de chaleur et de masse intensif entre l'air et l'interface humide.

### IV.3. Conclusion :

A travers ce chapitre, on a essayé d'analyser les résultats expérimentaux obtenus par une série de manipulation effectuée sur une installation de rafraichissement de l'air par effet d'humidification d'eau conçue est réalisée au laboratoire de génie mécanique de l'université de Biskra.

A partir de cette étude expérimentale on a conclu que pour exploiter efficacement ce dispositif, il faut utiliser des pads de luffa avec des fibres de palmier dattier fixés de façon verticale

et horizontale, et afin d'améliorer la diffusion de l'humidité à l'intérieure des fibres constituant l'interface d'évaporation, A titre d'exemple, on a réalisé un écart de température entre l'air entrant et sortant de l'ordre de 13.8 °C, pour une température extérieure au voisinage de 38.6 °C, en présence d'une enceinte mixte d'une épaisseur de 03 cm, qui correspond à une efficacité de rafraichissement atteignant 87 %.

## *Conclusion générale*

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale :

Ce travail comporte une étude expérimentale réalisée sur une installation de rafraîchissement de l'air par effet d'humidification d'eau, qui a été conçue, réalisée et améliorée au laboratoire de génie mécanique de l'université de Biskra

Notre études a comme objectif d'évaluer les performances thermiques du système de rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau ; dans la région de Biskra à climat chaud et semi aride

L'objectif de ce système de rafraîchissement d'air par effet d'évaporation d'eau est la diminution de la température de l'air avec augmentation de l'humidité par un phénomène de transfert de chaleur et de masse entre l'air et l'eau. Pour cela on a réalisé un banc d'expérimentation constitué d'un tunnel rectangulaire en plexy- glass d'épaisseur 0.04 m de dimensions (0.3m x 0.3m) de longueur 1 m avec un ventilateur de soufflage en amont du tunnel afin d'assurer un débit d'air à une vitesse de confort avec la boîte contenant en premier cas, un pad de luffa sans fibres de palmier dattier et le deuxième cas, un pad de luffa avec des fibres de palmier dattier fixés verticalement, le troisième cas, un pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés de façon verticale et horizontale, une pompe assure la circulation d'eau par un conduit qui permet l'arrosage de ce dernier.

Les principaux paramètres climatiques contrôlés et mesurés dans cette étude expérimentale sont ; la température extérieure et la température de l'air à l'entrée et la sortie du tunnel, ainsi que l'humidité relative en fonction du temps, la consommation et la température de l'eau pour des conditions de fonctionnement constantes, principalement le débit d'air véhiculé et le débit d'eau utilisé pour humidifier l'enceinte d'évaporation.

Cette campagne de mesure a permis d'évaluer le rendement de ce système et sa participation dans la réduction de la température qui représente un des facteurs dominants pour le maintien du confort thermique dans les locaux.

Les résultats présentés dans le chapitre VI, dédié à l'étude expérimentale sur le rafraîchissement de l'air par humidification, ont montrés des performances encourageantes de ce système, à titre d'exemple, pour une température extérieure qui avoisine 38.6 °C avec une interface humide mixte entre luffa et palmier dattier d'une épaisseur de 03 cm, il est possible d'obtenir une différence de température allant jusqu'à 13.8 °C entre la température de l'air d'entrée et celle à la sortie pour un débit d'eau de 0,6 l/min et un débit d'air de 5 [m/s], qui correspond à une efficacité de rafraîchissement atteignant 0.87%.

## Conclusion générale

---

Cette technique de rafraîchissement par humidification représente une solution adéquate pour assurer des microclimats confortables avec un meilleur coût dans les régions à climat chaud et aride.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] **S. H. SELLAM, A. MOUMMI, and A. Hakim**, "Rafrachissement de l'Air par Effet d'Evaporation d'Eau en utilisant la Fibre de Palmier Dattier, Application dans les Zones Arides et Semi-arides," *First Arab Conférences on Mechanical Engineering (ARCME'17)* (2017).
- [2] **Abdelkader Hachaichi**, « Etude de l'effet de la température de l'eau et du débit d'air sur les performances d'une installation de rafraichissement par humidification », mémoire de master, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie(2018)
- [3] **Zohra Lahlouhi**, « Etude expérimentale du rafraichissement de l'air par effet d'évaporation d'eau », mémoire de master, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie (2018)
- [4] **Généfol Kone**, « refroidissement par évaporation potentiel d'économie d'énergie et confort thermique », mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut International D'ingénierie de L'eau et de L'environnement de Ouagadougou, Burkina Faso (2011)
- [5] <https://turkish.alibaba.com/product-detail/agricultural-evaporative-cooling-pad-for-air-cooling-system-in-greenhouse-60309311905.html>. Site web consulté le 10/12/2019
- [6] **Renato Lazzarin**, 27<sup>e</sup> note d'Information sur les technologies du froid-Institut International du Froid,pp.1-6,(janvier 2015)
- [7] **Djamel Benaoune**,« Etude expérimentale du rafraichissement de l'air par évaporation d'eau », mémoire de magistère, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie (2012)
- [8] **Narimane El Hamzaoui**, «Humification de l'air d'un local par pulvérisation d'eau dans un milieu saharien», mémoire de master en physique énergétique, Université Ahmed Draia D'Adrar, Algérie (2013)
- [9] **J. R. Camargo**, A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system, these de doctorat Université de Taubaté Brésil , (2009).
- [10] **LP Galilée**, « Cours de Climatisation L'AIR HUMIDE », BTS FEE 1ère Année.
- [11] **Rafrâchisseur par évaporation écologique, diffuseurs et accessoires**, document en ligne pp.1-54, (2012).

## Bibliographie

---

- [12] **Jos Rui Camargo, Carlos Daniel Ebinuma, Jose ´ Luz Silveira**, « Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city», *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, pp. 1124–1132, (2005).
- [13] <http://www.westpoint.tn/Content/Pages/Climatiseur-Cooler.html> site web (consulté le 18/01/2020)
- [14] <http://tonepi.com/systemes-energetiques/caracteristiques-physiques-de-lair-humide-diagramme-psychrometrique.html> site web (consulté le 20/01/2020)

## المخلص

يتضمن هذا العمل دراسة تجريبية لتقنية تبريد الهواء عن طريق الترطيب من خلال التأثير على مبدأ تبخر الماء ، مما يسمح بتخفيض درجة حرارة الهواء مع زيادة الرطوبة . هذه التقنية تمكن من تقليل درجة حرارة الهواء مع زيادة الرطوبة النسبية ، وتحقق كل ذلك بفضل ظاهرة انتقال الحرارة والكتلة بين الهواء والماء عن طريق الاتصال المباشر وقد قمنا بدراسة ثلاث حالات مختلفة : واجهة مصنوعة من ألياف نبات الخزم فقط، واجهة مصنوعة من ألياف نبات الخزم وألياف نخيل التمر حيث تم تثبيتها عموديا ، و في الأخير واجهة مصنوعة من ألياف نبات الخزم وألياف النخيل حيث ثبتت عموديا وأفقيا في نفس الوقت. استنتجنا من خلال التجربة أن هذه الحالة الأخيرة أكثر فعالية و مردود على الحالتين الأخيرتين . أجريت الاختبارات في جامعة بسكرة ، حيث كان من الضروري التحكم في تطور بعض العوامل المناخية ، مثل درجة الحرارة والرطوبة النسبية من أجل زيادة كفاءة هذه التقنية الاقتصادية والبيئية.

**الكلمات المفتاحية :** تبريد الهواء، الترطيب، ألياف الخزم , الياف التمر

## Résumé

Ce travail comporte une étude expérimentale de la technique de rafraîchissement de l'air par humidification basé sur le principe d'évaporation d'eau. Ce système permis de réduire la température de l'air tout en augmentant l'humidité relative grâce aux phénomènes de transfert de chaleur et de masse entre l'air et l'eau par contact direct. on a considéré trois types de pad , pad de luffa sans fibres de palmier dattier, pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés verticalement, pad de luffa avec fibres de palmier dattier fixés verticalement et horizontalement. Les résultats expérimentaux ont montré que le type troisième de pad est le plus efficace et bénéfique que les deux autres cas. Des tests ont été réalisés à l'Université de Biskra, où il a fallut contrôler l'évolution de certains facteurs climatiques, comme la température, l'humidité relative afin de monter l'efficacité de cette technique économique et environnementale.

**Mots clés :** Rafrâchissement de l'air, Humidification; Fibre de Luffa, Fibres de Palmier Dattier

## Abstract

This work includes an experimental study of the technique of air cooling by humidification based on the principle of water evaporation, using an enclosure made of local biological material as a wetland, loofah and dates palm fibers. This system made it possible to reduce the air temperature while increasing the relative humidity, all this was achieved thanks to the phenomena of heat and mass transfer between air and water by direct contact. We have carried out this technique in three different cases, the first case loofah pad without dates palm fibers and the second case loofah pad with dates palm fibers fixed vertically, the third case loofah pad with dates palm fibers fixed vertically and horizontally. We concluded that the latter case was more effective and beneficial than the last two cases. Tests were carried out at the University of Biskra, where it was necessary to control the evolution of certain climatic factors, such as

temperature and relative humidity, in order to increase the effectiveness of this economic and environmental technique.

**Keywords:** Air cooling, Humidification, Luffa fibers, dates palm fibers.