



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 : Energétique**

Réf. : ..../..

---

Présenté et soutenu par :  
**Aboubakr Seddik Hachani & Nour El Imane Moummi**

Le : dimanche 26 juin 2022

## **Etude expérimentale d'un système de refroidissement par évaporation de l'eau**

---

### **Jury :**

Pr. Adel Ben Chabanne	Pr	Université de Biskra	Président
Dr. Nora BOLTIF	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. Saleh Guerbai	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021 – 2022

# DEDICACE

*A mes très chers parents :*

*Ceux qui ont sacrifié pour que je puisse arriver à ce stade*

*Ceux qui ont souffert pour que je ne souffre pas*

*Et pour que je sois heureuse*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon grand amour,*

*Mon estime, ma vive gratitude, mon intime attachement*

*Et ma profonde affection.*

*Je ne serai et je ne pourrai vous remercier*

*Pour tous ce que vous avez faits pour moi*

*Et ce que vous faite jusqu'à présent.*

*Que dieu vous protège*

*A ma sœur :*

*Avec toute ma tendresse et le plein succès dans sa vie personnelle.*

*A toute ma très chère famille :*

*Je n'aurais espéré avoir meilleur que vous comme famille.*

*En guise de mon amour, je vous dédie le présent travail.*

*A tous mes amis*

*A mes professeurs :*

*Vous resterez toujours pour moi, un bon exemple.*

*Enfin, à toute personne ayant participé de près ou de loin à la  
collaboration de ce travail.*

*Nour El Imane Moummi*

# DEDICACE

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail, comme un geste de gratitude :*

*A celle qui m'a enfanté dans la douleur et de la joie, mon symbole d'amour :*

*Ma très chère mère*

*A celui qui est cher et j'apprécie fort son soutien continu tout le long de mes études :*

*Mon très cher père*

*A ceux qui m'ont encouragé : mes frères (Waïl & Ali)*

*Mes sœurs ainsi que toute ma famille et amis*

*Aboubakar Seddik Hachani*

# Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté et la force d'accomplir ce travail comme l'aboutissement d'un long et fructueux parcours d'études à l'Université de Biskra.

Nous tenons à remercier et à exprimer notre gratitude à notre encadrante, Dr Boultif Nora, pour ses nombreux conseils éclairants et ses encouragements, et pour nous avoir permis d'apporter une modeste contribution à ce projet.

Nous tenons également à la remercier pour la confiance qu'elle a bien voulu nous accorder tout au long de ce travail et pour toutes les heures de consultation qu'elle nous a consacrées.

Nous remercions également tous les membres de jury Pr Ben Chabanne Adel et Dr *Guerbai Saleh* pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et temps qu'ils ont consacré pour l'examiner.

Nous adressons nos remerciements au Pr. Moummi Abdelhafid, Dr. Rouag Amar, et Dr. Sellam Sadam Houcine, M<sup>elle</sup> Bouteraa Youssra de l'Université de Biskra, pour leurs encouragements, leurs conseils et l'aide qu'ils nous ont donné pour réaliser notre projet de fin d'études.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études ainsi que nos amis Wail, ALI et Yasmine {H<sup>2</sup>Z<sup>2</sup>M} qui nous ont soutenus durant ce travail.

# Résumé

Ce travail comprend une étude expérimentale de l'efficacité d'un système d'évaporation directe (DEC) pour le refroidissement et l'amélioration de la qualité de l'air dans une zone de climat chaud et sec. Le banc d'essai a été conçu et construit dans le hall technologique de l'Université Mohamed Khider, Biskra. Les performances thermiques du système ont été évaluées en effectuant une série de mesures selon trois facteurs, matériaux des tampons de rafraîchissement (fibres de palmier, eucalyptus et fillasse), l'épaisseur du tampon et le débit d'air entrant. Les résultats de l'étude menée dans les conditions climatiques de la ville de Biskra, Algérie, ont montré que : Le matériau local (fibres de palmier- dattier) est le plus approprié pour être utilisé comme tampon rafraîchissant, l'augmentation de l'épaisseur des tampons et du débit d'air contribue à améliorer la capacité de refroidissement. Le système a également montré son efficacité en tant que technologie de rafraîchissement en fournissant des températures confortables et acceptables avec un coût moindre et une faible consommation d'électricité.

**Mots clés :** Evaporation directe, Rafrachissement, Tampon, fibre palmier dattier, confort thermique.

# Abstract

This work includes an experimental study of the efficiency of a direct evaporative system (DEC) in cooling and improving air quality in a hot and dry climate area. The test bench was designed and built in the technological hall of Mohamed Khider University, Biskra. thermal performance of the system was evaluated by conducting a series of measurements according to three factors, where three types of local materials were studied and used as cooling pads (Palm fibers, Eucalyptus and Fillasse), then the effect of pad thickness and incoming airflow were discussed. The results of the study conducted under the climatic conditions of the city of Biskra, Algeria, showed that date palm fibers are the most suitable local material to be used as a cooling pad, and the increase in the thickness of the pads and the airflow helps improve the cooling capacity. The system has also shown its effectiveness as a cooling technology by providing comfortable and acceptable temperatures with lower cost and low electricity consumption.

**Keywords:** Direct evaporation, Cooling, Pad cooling, Date palm fiber, Thermal comfort.

## ملخص

يتضمن هذا العمل دراسة تجريبية لكفاءة نظام التبخير المباشر في تبريد وتحسين جودة الهواء في منطقة ذات مناخ حار وجاف. تم تصميم وبناء النموذج التجريبي لنظام التبخير المباشر في البهو التكنولوجي بجامعة محمد خيذر بسكرة. تم تقييم الأداء الحراري للنظام من خلال اجراء سلسلة من القياسات وفقا لثلاثة عوامل أساسية حيث تم أولا دراسة ثلاثة أنواع من المواد المحلية واستعملها كوسائد تبريد (ألياف النخيل، كالببتوس والفلاس) ثم تم مناقشة تأثير سمك الوسائد وكمية تدفق الهواء الوارد. أظهرت نتائج الدراسة التي تمت تحت الظروف المناخية لمدينة بسكرة الجزائر ان ألياف نخيل التمر هي انسب مادة محلية للاستخدام كوسادة تبريد كما تساعد زيادة سمك الوسائد وتدفق كتلة الهواء على تعزيز قدرة التبريد. كما اظهر النظام فعاليته كتقنية تبريد في توفير درجات حرارة مريحة ومقبولة إلى حد ما مع تكلفة اقل واستهلاك منخفض للكهرباء.

**الكلمات المفتاحية:** تبخير مباشر، تبريد، وسادة التبريد، ألياف نخيل التمر، الراحة الحرارية.

# Sommaire

DEDICACE.....	II
DEDICACE.....	III
Remerciements.....	IV
Résumé.....	V
Sommaire.....	VII
liste de Tableau.....	X
Liste de figure.....	XI
Nomenclature.....	XIII
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Généralité

I-1- Introduction .....	4
I-2-Définition du refroidissement par évaporation .....	4
I-3-Principe de fonctionnement .....	4
I-4-1-Refroidissement évaporation direct.....	5
I-4-2-Refroidissement par évaporation indirect .....	5
I-4-3-Système mixte .....	6
I-5-Propriétés et grandeurs de l'air humide .....	7
I-5-1-Humidité relative.....	7
I-5-2-Humidité absolue.....	7
I-5-3-Température de rosée °C .....	7
I-5-4-Température humide en °C .....	7
I-5-5-Température sèche en °C.....	7
I-5-6-Température adiabatique de saturation .....	8
I-5-7-Volume spécifique de l'air humide.....	8
I-5-8-Enthalpie de l'air humide.....	8
I-5-9-pression de vapeur (P <sub>v</sub> ) .....	8



I-5-9-1-Pression partielle de vapeur d'eau .....	8
I-5-9-2-Pression de vapeur saturée ( $P_{vs}$ ) .....	9
I-5-10-Chaleur sensible et chaleur latente .....	9
I-5-11-Le diagramme de l'air humide .....	9

## Chapitre II : Recherche bibliographique

II-1-Introduction .....	12
II-2-Recherches bibliographiques .....	12

## Chapitre III : Etude expérimentale

III-1.Description du montage expérimental .....	21
II-1. Instrumentation .....	24
III-2.Analyse des performances du DEC.....	28

## Chapitre IV :Résultats et discussion

I-Introduction .....	31
II-1- procédures et mesures expérimentales .....	31
III-1-Effet du type de matériau du tampon sur la performance thermique .....	37
III-2-Effet de l'épaisseur du tampon sur la performance thermique .....	38
III-3-Effet du débit d'air sur la performance thermique.....	39
III-4-Effet des conditions ambiantes sur la performance thermique du DEC .....	40
III-6-Comparaison des performances du DEC .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Conclusion Générale .....	42
Références bibliographiques .....	43

# Liste de Tableau

<b>Tableau I.1:</b> Cinq méthodes de refroidissement air – eau [24] .....	6
<b>Tableau III.2:</b> Spécifications techniques des instruments de mesure utilisés dans la configuration expérimentale du DEC.....	24
<b>Tableau IV.3:</b> Paramètres mesurés à l’entrée. ....	32
<b>Tableau IV.4:</b> Paramètres mesurés à la sortie.....	33
<b>Tableau IV.5:</b> Influence des conditions ambiantes et de la température de l’eau sur les différents paramètres mesurés du nouveau DEC avec les mémés paramètres de fonctionnement.....	37

# Liste de figure

<b>Figure I.1:</b> Illustration du refroidisseur par évaporation [2].	4
<b>Figure I.2:</b> Refroidissement par évaporation direct [6].	5
<b>Figure I.3:</b> Refroidissement par évaporation indirect [9].	6
<b>Figure I.4:</b> d'un système de rafraichissement mixte [10].	6
<b>Figure I.5:</b> Chaleur sensible et chaleur latente [8].	9
<b>Figure I. 6:</b> Diagramme air humide [20].	10
<b>Figure II.7:</b> Banc d'essai expérimental avec ventilateur de soufflage de l'air [10].	13
<b>Figure II.8:</b> Fibres palash [19].	14
<b>Figure II.9:</b> Fibres de coco [19].	14
<b>Figure II.10:</b> Efficacité de saturation de différents matériaux [19].	14
<b>Figure II.11:</b> Fibres d'eucalyptus [29].	16
<b>Figure II.12:</b> (a) Mousse de charbon actif, (b) Luffa [15].	17
<b>Figure II.13:</b> Efficacité de refroidissement de l'ACF et du coussin de refroidissement en Luffa dans des conditions similaires [15].	17
<b>Figure II.14:</b> Photo du DEC expérimental réalisé à l'Université d'Ouargla [17].	18
<b>Figure II.15:</b> (a) fdem, (b) laine de mouton et (c) paille de blé [17].	18
<b>Figure II.16:</b> Description du dispositif expérimental [4].	19
<b>Figure III.17:</b> Vue face du banc d'essai " Direct evaporative cooling " DEC.	21
<b>Figure III.18:</b> Vue de dessus du DCE, (système d'arrosage).	22
<b>Figure III.19:</b> Dimensions des tampons d'évaporation utilisés.	22
<b>Figure III.20:</b> matériaux utilisés (L1), eucalyptus, (L2) palmier et (L3) fillasse .	23
<b>Figure III.21:</b> Schéma de la configuration DEC expérimentale.	24
<b>Figure IV.22 :</b> Impact du type de matériau du tampon sur la performance thermique(compagne de mesure C)	38
<b>Figure IV .23:</b> Effet de l'épaisseur du tampon sur la performance thermique.	39

<b>Figure IV.24:</b> Effet du débit d'air sur la capacité de refroidissement des fibres de palmier(A,BetC).....	40
<b>Figure IV.25:</b> La quantité d'eau évaporée par rapport a la température d'entrée d'air .....	42
<b>Figure IV.26:</b> Schéma du système du DEC avec différentes configurations de tampons .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure IV.27:</b> Variabilité de la capacité de refroidissement pour les systèmes (a) et (b) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure IV.28:</b> Impact du changement de distance entre les deux Tampon	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure IV.29:</b> Analyse des systèmes DEC concernant la zone de confort pour différentes campagnes de mesure .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

# Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
H	Enthalpie de l'air humide	kJ
Has	Enthalpies de l'air sec	kJ
Hv	Enthalpies de la vapeur d'eau	kJ
P <sub>v</sub>	pression partielle de la vapeur d'eau	Pa
m <sub>v</sub>	masse de vapeur d'eau dans l'air humide	kg
V	volume occupé par l'air humide et en particulier par la vapeur d'eau	m <sup>3</sup>
T	Température absolue de l'air humide	K
P <sub>vs</sub>	Pression de vapeur saturée	Pa
E	Efficacité de refroidissement par évaporation	[-]
T <sub>a, int</sub>	Température de l'air intérieur	°C
T <sub>a, ext</sub>	Température de l'air extérieur	°C
T <sub>h</sub>	Température humide de l'air	°C
Q <sub>s</sub>	Capacité de refroidissement sensible	W
m <sub>ia</sub>	débit massique de l'air d'admission	kg/s
C <sub>pa</sub>	chaleur spécifique de l'air d'admission	J/kg.K
ρ	Masse volumique	kg/ m <sup>3</sup>
V <sub>a</sub>	Vitesse d'air	m/s
S	surface	m <sup>2</sup>
ΔP	Différence de pression	Pa
EER	Rapport d'efficacité énergétique	[-]
W <sub>f</sub>	puissance du ventilateur.	W

Wp	puissance de la pompe	W
RHa, int	Humidité relative de l'air intérieur	[-]
RHa, ext	Humidité relative de l'air extérieur	[-]
Tw	Température de l'eau d'arrosage	°C

# **Introduction Générale**

### Introduction générale

Suite aux changements climatiques en raison du réchauffement de la planète ainsi que la croissance démographique, le monde a connu une croissance énorme des besoins énergétiques des bâtiments en raison de l'amélioration de son niveau de vie.

Le secteur de la climatisation et du chauffage des locaux représente une grande partie de la consommation totale d'énergie dans le monde (environ 33 %) [1]. La demande d'électricité pour les réseaux de climatisation représente environ 60 % de la demande d'électricité pendant les périodes estivales [2].

C'est pourquoi les scientifiques et les explorateurs recherchent des systèmes éco énergétiques qui sert à la conservation de l'environnement et réduire l'utilisation de combustibles conventionnels.

L'une des techniques est l'utilisation des systèmes de refroidissement par évaporation qui ont un potentiel thermique important par rapport aux systèmes de climatisation conventionnels. Sans aucun doute, leur utilisation s'est répandue comme alternative à la climatisation dans les bâtiments et les secteurs industriels, en particulier dans les zones climatiques chaudes et sèches.

Le refroidissement par évaporation est le processus de traitement de l'air en s'appuyant sur l'évaporation de l'eau pour refroidir l'air chaud directement (refroidissement par évaporation directe) ou indirectement (refroidissement par évaporation indirecte), Il peut également être utilisé individuellement ou dans le cadre d'une préparation plus complexe (c.-à-d. systèmes de refroidissement d'air hybrides) [3].

Le but principal du système de refroidissement par évaporation est d'abaisser la température de l'air tout en augmentant la teneur en humidité, par le phénomène de transfert thermique et de transfert de masse entre l'air et l'eau.

Dans ce contexte que nous allons mener notre étude, l'objectif de ce travail consiste donc à réaliser un banc d'essais et d'étudier l'efficacité de la technique de refroidissement de



l'air par l'effet de l'évaporation de l'eau en utilisant des matériaux biologiques locaux moins chers tels que les fibres de palmier, les feuilles d'eucalyptus et de fillasses.

Le présent mémoire s'organise autour de quatre chapitres et une conclusion générale faisant suite à cette introduction.

Dans le premier chapitre, des généralités sur le rafraichissement 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 rafraichissement par évaporation d'eau existants.

Le deuxième chapitre est consacré à une synthèse bibliographique concernant Les travaux expérimentaux réalisés dans le domaine de refroidissement direct par évaporation de l'eau.

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

## Chapitre I : Généralité

### I-1- Introduction

Par définition, l'humidification consiste à traiter l'air chaud en évaporant l'eau pour le refroidir (directement ou indirectement). En fait, ce processus constitue une alternative à la climatisation conventionnelle, en particulier dans les régions où le climat est chaud, aride ou semi-aride et où la période estivale est longue. Sur le plan technique, le refroidissement par évaporation de l'air est le résultat d'une augmentation de l'humidité de l'air et d'une diminution de la température par l'effet de la masse et du transfert de chaleur entre l'air et l'eau dans la chambre d'évaporation. Cette technologie est très encourageante parce qu'elle est économique et propre d'un point de vue environnemental.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude expérimentale de la réfrigération par évaporation du principe de vaporisation de l'eau en utilisant les fibres végétales comme moyen et interface pour réaliser ce qui précède.

### I-2-Définition du refroidissement par évaporation

Le système de refroidissement par évaporation est l'un des systèmes de refroidissement les plus anciens et les plus éco-énergétiques où le système repose sur le refroidissement et l'augmentation de l'humidité de l'air passant dans le canal.

### I-3-Principe de fonctionnement

Le principe de refroidissement par évaporation est basé sur la technologie de refroidissement par air évaporatif à eau. Une fois que l'eau s'évapore, elle absorbe la chaleur de l'air et le refroidit progressivement, de sorte que la chaleur absorbée lors de l'évaporation est transférée à l'air sous forme de chaleur latente, après l'évaporation de l'eau. En conséquence, l'humidité de l'air augmente et la température diminue [4].

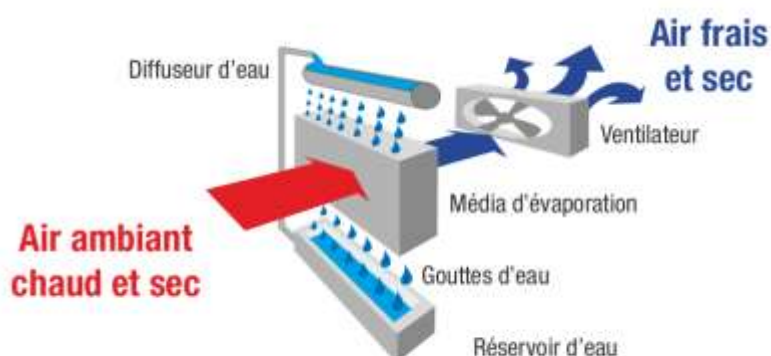


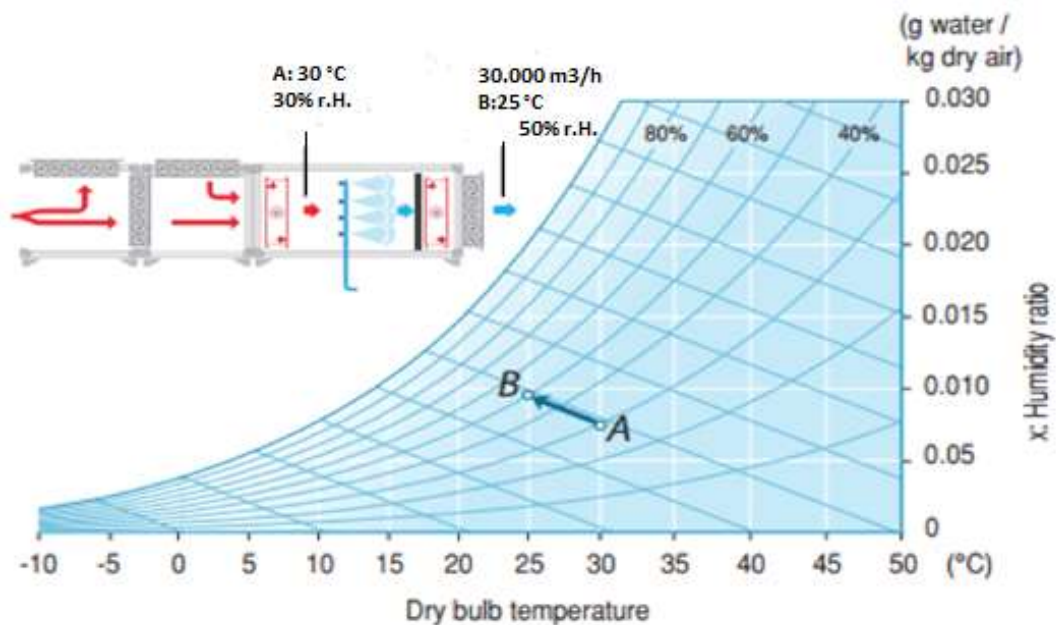
Figure I.1: Illustration du refroidisseur par évaporation [5].

## I-4-Les systèmes de refroidissement par évaporation de l'eau

### I-4-1-Refroidissement évaporation direct

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% [6].



*Figure I.2: Refroidissement par évaporation direct [7].*

### I-4-2-Refroidissement par évaporation indirect

Il peut être défini comme étant le résultat de deux humidificateurs directs, ce lieu est assuré par un échangeur (Eau–Air). Car l'évaporation adiabatique d'eau dans l'air sert à refroidir une réserve d'eau, cette dernière fait refroidir l'air d'entrée au second système à l'aide de l'échangeur de chaleur [8].

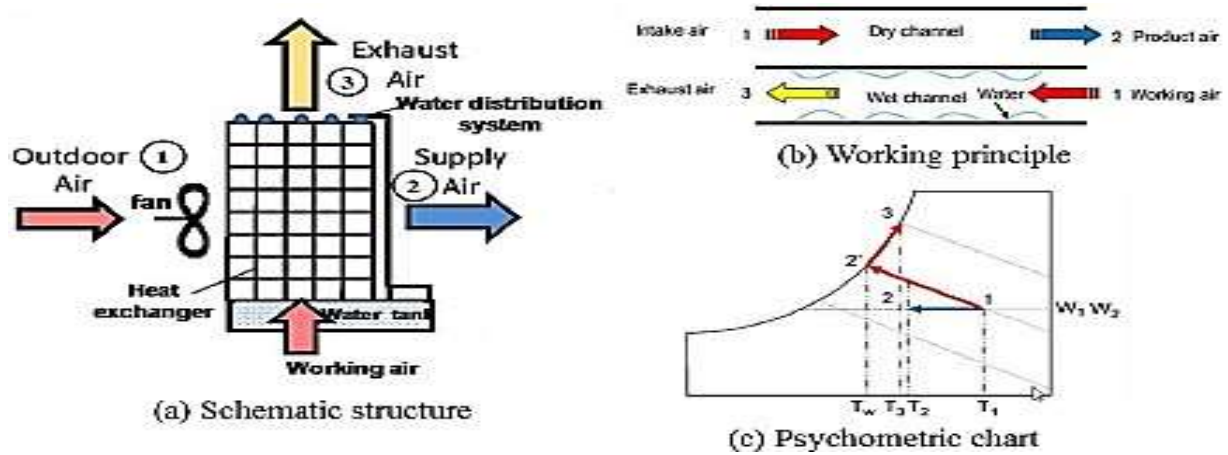


Figure I.3: Refroidissement par évaporation indirect [9].

I-4-3-Système mixte

Il s'agit d'un système de rafraîchissement d'air par évaporation à deux étapes indirecte-directe. Quand de l'air froid à la sortie d'un système de rafraîchissement d'air par évaporation est à une température de 21 °C et une humidité relative 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 froid et une augmentation de l'humidité relative. L'humidité relative élevée d'un air froid soufflé peut être acceptable pour une température élevée [10].

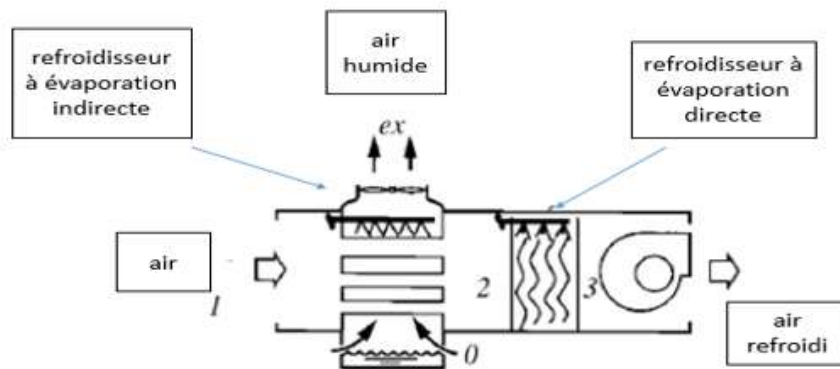


Figure I.4: d'un système de rafraîchissement mixte [10].

Tableau I.1: Cinq méthodes de refroidissement air – eau [11] .

RED : Refroidissement par évaporation directe.	Utilise des milieux poreux mouillés (généralement des fibres de cellulose).
REI : Refroidissement par évaporation	Utilise un échangeur de chaleur pour séparer

indirecte.	l'eau de refroidissement de l'air refroidi.
REDI : Refroidissement par évaporation directe indirecte.	Utilise à la fois un échangeur de chaleur et un milieu humide en série.
RDCI : Récupération d'énergie par cycle indirect	Utiliser un échangeur de chaleur qui sert à refroidir en été et à récupérer la chaleur de l'air perdu en hiver.
DRDCI : Double récupération d'énergie à cycle indirect	Utiliser un échangeur de chaleur qui sert à refroidir en été et à récupérer la chaleur de l'air résiduel, mais qui a également un petit "chiller" serpentin de déshumidification.

## I-5-Propriétés et grandeurs de l'air humide

### I-5-1-Humidité relative

L'humidité relative est le rapport de la pression partielle de vapeur de l'air humide à la température considérée à la pression partielle de vapeur saturante à la même température. Elle est généralement exprimée en % [12].

### I-5-2-Humidité absolue

C'est la quantité de vapeur d'eau contenue dans un environnement d'air humide par rapport à un 1 kilogramme d'air sec [13].

### I-5-3-Température de rosée °C

C'est la température à laquelle l'air devient saturé par refroidissement ou bien c'est la température à laquelle la condensation de la vapeur d'eau s'amorce [14].

### I-5-4-Température humide en °C

La température humide  $T_h$  de l'air est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air [15].

### I-5-5-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 d'air [10].

### I-5-6-Température adiabatique de saturation

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) [10].

### I-5-7-Volume spécifique de l'air humide

Le volume spécifique est le volume d'air humide qui contient l'unité de masse d'air sec. Il s'exprime en mètre cube par kilogramme d'air sec [ $\text{m}^3 / \text{Kg as}$ ] [12].

### I-5-8-Enthalpie de l'air humide

L'enthalpie d'une certaine quantité d'air humide est égale à la somme des enthalpies de l'air sec et de la vapeur d'eau qu'elle contient. Son symbole est **H** et on l'exprime en kilojoules [12].

$$H = H_{as} + H_v \quad (1.1)$$

### I-5-9-pression de vapeur ( $P_v$ )

C'est la pression de vapeur partielle dans l'air, cette pression est la même que la pression de vapeur saturante à la température de rosée [10].

#### I-5-9-1-Pression partielle de vapeur d'eau

L'air humide étant un mélange d'air sec et de vapeur d'eau que nous pouvons considérer, en première approximation, comme des gaz parfaits.

$$P_v = 462 \frac{m_v \times T}{V} \quad (1.2)$$

Avec :

$P_v$  : pression partielle de la vapeur d'eau [Pa].

$m_v$  : masse de vapeur d'eau dans l'air humide [kg].

$V$  : volume occupé par l'air humide et en particulier par la vapeur d'eau [ $\text{m}^3$ ].

$T$  : température absolue de l'air humide [K].

La pression partielle de vapeur d'eau  $P_v$  dépend essentiellement de la quantité de vapeur d'eau  $m_v$  contenue dans un volume  $V$  d'air humide et de la température  $T$  de cet air [12]

### I-5-9-2-Pression de vapeur saturée ( $P_{vs}$ )

La pression de vapeur saturante est le produit de la pression de vapeur saturante de la phase pure et du facteur de montée. Les deux valeurs sont déterminées expérimentalement [16].

### I-5-10-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 [6].

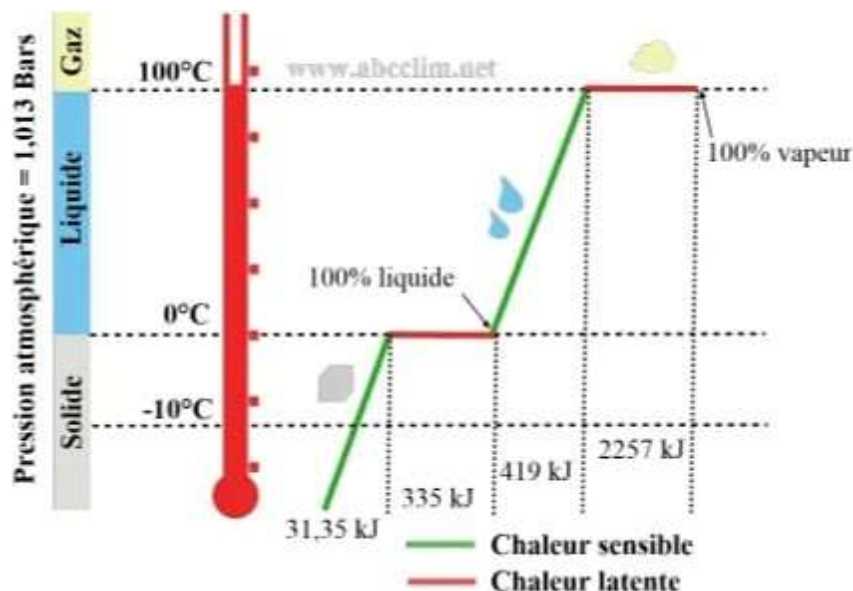


Figure I.5: Chaleur sensible et chaleur latente [17].

### I-5-11-Le diagramme de l'air humide

Pour comprendre le mécanisme du confort thermique et représenter les transformations de l'air en termes de refroidissement ou de climatisation, on s'appuiera sur le diagramme d'air humide, qui exprime la différence de température et d'humidité par rapport à la courbe de saturation. Le diagramme ci-dessous montre les grandeurs de base dans sa construction et comment le lire.



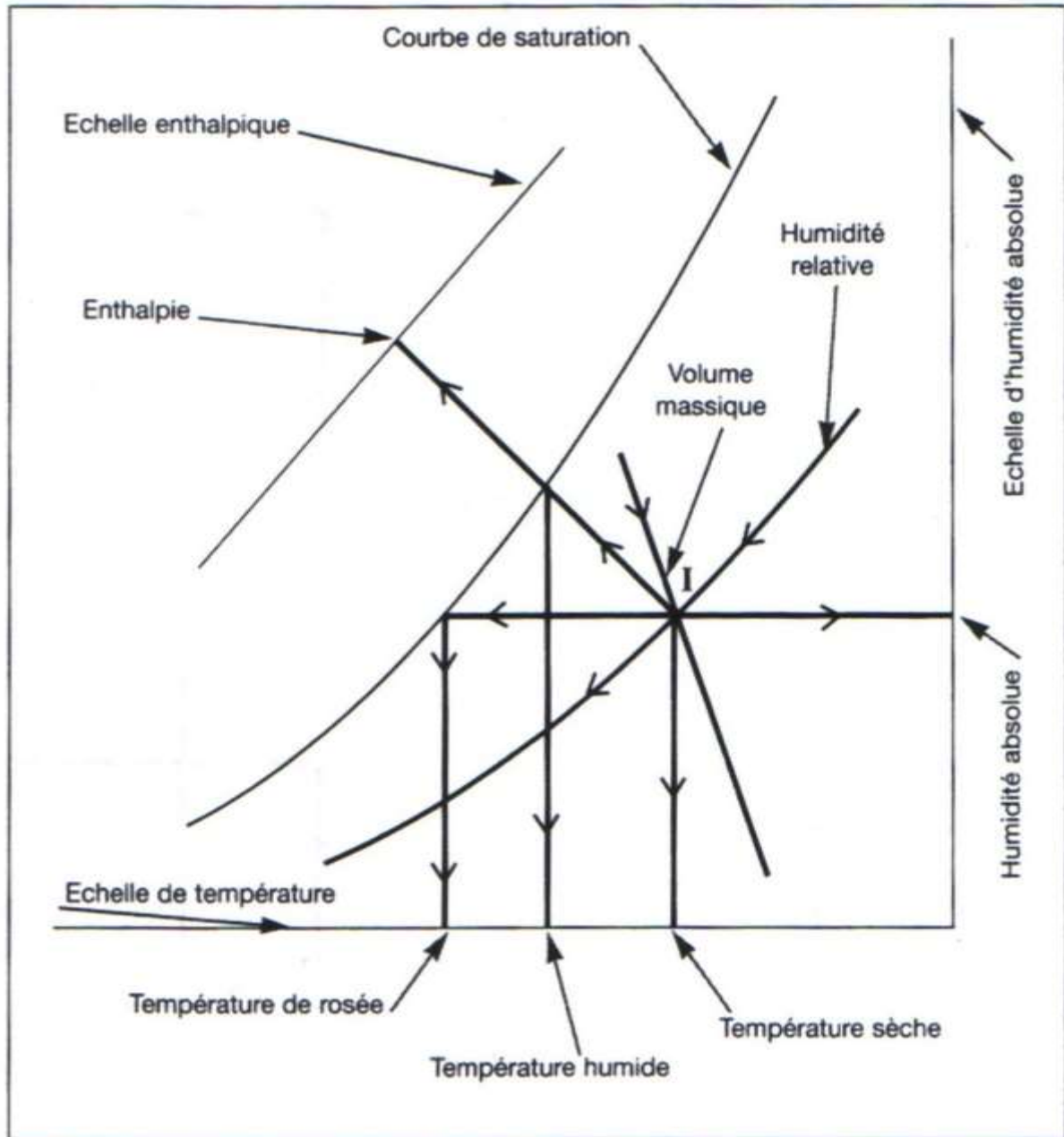


Figure I. 6: Diagramme air humide [18].

**Chapitre II :**

**Recherches**

**bibliographiques**

## Chapitre II : Recherche bibliographique

### II-1-Introduction

Le système de refroidissement par évaporation est l'un des plus anciens systèmes de refroidissement et de préservation de l'environnement. Les anciens Grecs, Romains et Égyptiens utilisaient le refroidissement par évaporation en suspendant des tapis humides devant les fenêtres et les événements de tente, de sorte que l'air chaud soufflé à travers les tapis maintenait l'air intérieur à une température raisonnable car ces tapis fonctionnaient un peu comme les coussins de refroidissement modernes [19].

L'objectif de chapitre est de présenter quelques travaux réalisés dans le domaine de refroidissement par évaporation de l'eau.

### II-2-Recherches bibliographiques

➤ **M. Maerefat, en [2010]** a étudié une technique à basse énergie pour améliorer le refroidissement passif et la ventilation naturelle d'une maison solaire, en utilisant un système composé d'une cheminée solaire (SC) et d'une cavité de refroidissement par évaporation (ECC). La capacité du système à répondre aux besoins thermiques des individus et les effets des principaux paramètres géométriques sur les performances du système ont été étudiés. La dépendance des performances du système par rapport à la température de l'air extérieur a été étudiée afin de déterminer les conditions de fonctionnement pour une efficacité appropriée, en ce qui concerne les critères de confort thermique. Pour déterminer les caractéristiques de transfert de chaleur et de masse du système, un modèle mathématique fondé sur des équations de conservation de la masse et de l'énergie a été élaboré et résolu par une méthode itérative. Les résultats montrent que le système est capable de fournir une bonne climatisation intérieure pendant la journée dans un salon, même avec une intensité de 200 W/m<sup>2</sup>. Les résultats montrent que lorsque l'humidité relative est inférieure à 50%, le système peut faire une bonne climatisation intérieure même à 40 °C, et des performances plus élevées sont obtenues en utilisant ECC avec la configuration de co-courant. On constate que le système proposé peut être appliqué avec succès dans les zones chaudes et arides pour répondre aux attentes de confort thermique intérieur [20].

➤ **D.BENAOUNE et all [2010]** Leçon de refroidissement de l'air par évaporation de l'eau.

Ils ont évalué la performance thermique du système de refroidissement par évaporation de

l'eau ; Dans la région de Biskra avec un climat chaud et semi-sec. Ces travaux expérimentaux ont été réalisés sur une plate-forme d'essai menée à l'Université Biskra, où ils ont utilisé un matériel biologique local pour contenir des dattes à l'eau et une raffinerie de fibres. Les facteurs à contrôler étaient la température, l'humidité relative et la même vitesse d'air au point de départ, d'où ils résument que l'épaisseur des fibres de palmier dattier affecte le refroidissement négatif, en particulier sur les mesures, l'humidité relative, la température et la vitesse de l'air [10].



*Figure II.7: Banc d'essai expérimental avec ventilateur de soufflage de l'air [10].*

- **Takahiko Miyazaki et al. en [2011]** Dans cette étude, la cheminée solaire était accompagnée d'un refroidisseur à point de rosée. Le refroidisseur à évaporation du point de rosée est intégré au toit du bâtiment. Le débit d'air de la cheminée solaire a été prédit par simulation, et l'effet de refroidissement du refroidisseur évaporatif du point de rosée a été analysé en simulant le transfert de chaleur et la masse. Les résultats ont montré que le système était capable de gérer les gains de chaleur internes d'un immeuble de bureaux normal. En outre, l'ingénierie optimale du canal de refroidissement par évaporation a été révélée [21].
- **J.K. Jain et D.A. Hindoliya [2011]** Ils ont analysé les performances de deux nouveaux matériaux des tampons de refroidissement par évaporation "les fibres de noix de coco et les fibres de palash". Ils les ont comparé avec les tampons de refroidissement par évaporation qui sont généralement fabriqués à partir de fibres de tremble et de khus. Les quatre matériaux ont été testés dans un laboratoire à l'aide d'une configuration de test fabriquée de manière appropriée. Le débit d'air a été maintenu constant. L'efficacité du refroidissement par évaporation a été obtenue et comparée à celle des tampons de tremble et de khus. L'efficacité des tampons avec des fibres de palash s'est avérée être respectivement de 13,2% et 26,31% supérieure à celle des tampons de tremble et de khus. Alors que l'efficacité des fibres de coco

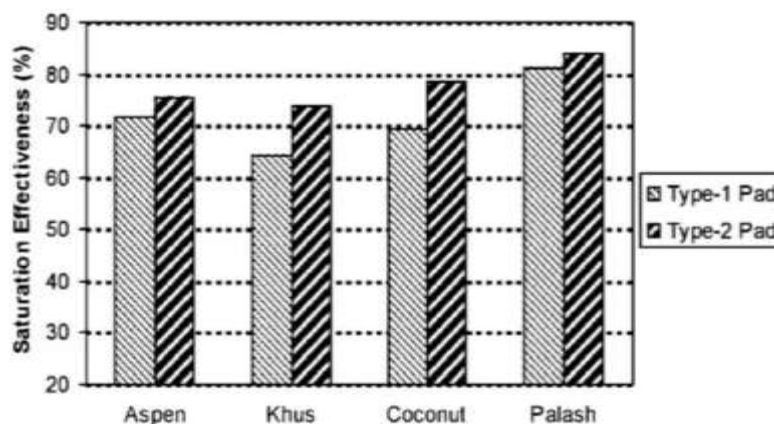
s'est avérée supérieure de 8,15% à celle des khus et comparable à celle du tampon de tremble. Le tampon Khus offre la plus faible chute de pression alors que le tampon en tremble (le plus couramment utilisé) offre la chute de pression la plus élevée parmi les quatre matériaux testés. Le nouveau matériau proposé (palash) offre une perte de charge inférieure à celle du tampon en tremble. En raison de meilleures performances, de coûts réduits et d'une disponibilité facile des fibres de noix de coco et de palash l'utilisation de ces matériaux dans les systèmes de refroidissement par évaporation domestiques et commerciaux pour le développement durable [22].



*Figure II.8: Fibres palash [22].*



*Figure II.9: Fibres de coco [22].*



*Figure II.10: Efficacité de saturation de différents matériaux [22].*

➤ Les mêmes auteurs en [2014] ont présenté quelques investigations expérimentales pour obtenir des corrélations pour l'efficacité de saturation des coussins de refroidissement par évaporation. Deux matériaux couramment utilisés, à savoir les fibres de tremble et de khus, ainsi que de nouveaux matériaux, à savoir les fibres de noix de coco et les fibres de palash, ont été testés dans un laboratoire à l'aide d'une configuration de test fabriquée de manière appropriée. Des corrélations mathématiques simples ont été développées pour calculer

l'efficacité de saturation des tampons de refroidissement par évaporation qui peuvent être utilisées pour prédire leurs performances à n'importe quel débit massique souhaité. Les performances de quatre matériaux de tampons différents ont également été comparées à l'aide de corrélations développées [23].

➤ **B.Niyomvas Et B.Potakarat [2013]** ont étudié L'efficacité d'un refroidisseur évaporatif, différents coussins de refroidissement ont été étudiés. Deux types de coussins de refroidissement constitués d'un tissu de rideau et d'un tissu de coton brut ont été étudiés de manière comparative pour des vitesses du ventilateur à 725, 1015 et 1450 tr/min et un débit d'eau de 26,9 litres par minute. Les résultats ont montré qu'une moyenne de la différence de température entre l'entrée et la sortie était de 2,9 °C et 1,7°C pour un tissu de rideau et un tissu de coton brut, respectivement. L'efficacité de saturation des coussins de refroidissement constitués d'un tissu de rideau était dans les plages de 46,3 à 61,3 % ou représente une moyenne de 54,8 %, et de 29,7 à 39,2 % ou représente une moyenne de 33,2 % pour un tissu de coton brut [24].

➤ **Abdallah et al. en [2013]** Ils ont étudié l'intégration des techniques de réfrigération par évaporation avec la cheminée solaire pour améliorer la température interne de l'environnement à Assiout New City, en Egypte. Ils ont développé l'intégration de la tour de refroidissement par évaporation directe avec le modèle de ventilation thermique à cheminée solaire multizones. La simulation est réalisée à l'aide d'un courant d'antenne commerciale multizone dans le cadre du programme COMIS-TRNSYS (Madison, WI, USA) pour évaluer la ventilation naturelle et le confort thermique interne. Les résultats montrent que le système génère 130,5 m<sup>3</sup>/heure sous l'effet du rayonnement solaire seulement et un minimum de 2 ACH sans facteur de pression, ce qui est l'exigence minimale d'ACH. Les résultats montrent que le nouveau système intégré interagit avec l'enveloppe du bâtiment et les conditions météorologiques pour réduire les températures internes de 10 °C à 11,5 °C par rapport aux températures externes [25].

➤ **Madhan Anand Kumar en [2015]** La technologie à faible puissance est proposée pour améliorer le refroidissement passif et la ventilation naturelle dans la maison solaire, en utilisant un système de cheminée solaire (SC) et de cavité de refroidissement par évaporation (ECC). La capacité du système à répondre aux exigences thermiques individuelles et les effets des principaux paramètres d'ingénierie sur les performances du système ont été étudiés. La fiabilité des performances du système sur la température extérieure de l'air a été étudiée afin de déterminer les conditions de fonctionnement pour atteindre une efficacité appropriée, par

rapport aux normes de confort thermique. Une analyse théorique des performances du système est également en cours, et certains détails sur la conception du système sont fournis. Trois matériaux d'oreillers de refroidissement différents tels que la cellulose, la paille, la fibre de coco et Vilantry ont été comparés [26].

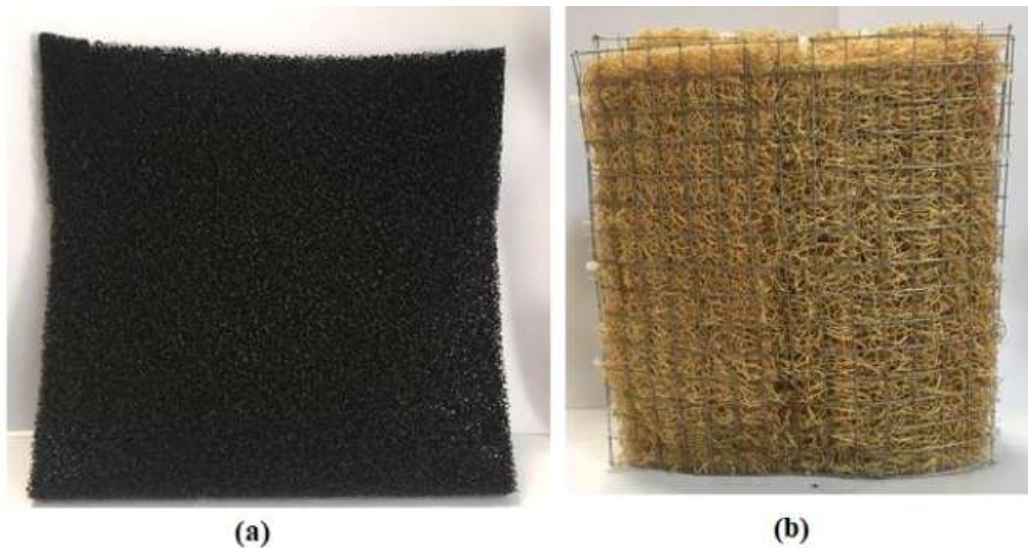
➤ **Pervin Abohorlu Doğramacı et al. en [2017]** On a étudié expérimentalement le potentiel des fibres d'eucalyptus pour la réfrigération par évaporation dans la région de la Turquie, et on a utilisé des fibres d'eucalyptus pour réduire la consommation d'énergie (figure II.1). Les résultats obtenus ont été que la baisse de température maximale de l'air se situait entre 11,3 °C et 6,6 °C, tandis que l'efficacité maximale de refroidissement était de 71 % et 49 % à des vitesses de 0,1 et 0,6 m/s, respectivement. Les capacités de refroidissement correspondantes ont également été calculées à 108W et 409W, ce qui indique une relation proportionnelle directe entre la vitesse de l'air et le refroidissement de performance [27].



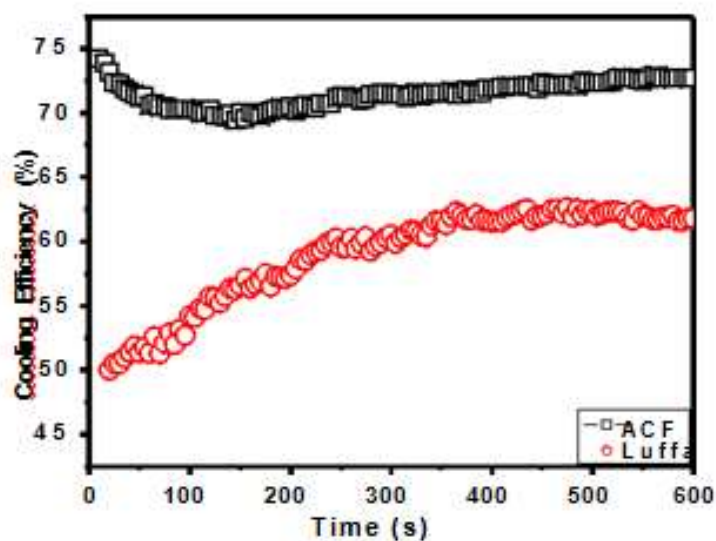
*Figure II.11: Fibres d'eucalyptus [27].*

➤ **A.A.Radhiyah et all [2018]** Cette recherche vise à examiner l'efficacité de refroidissement de différents types de matériaux à base naturelle en tant que coussin de refroidissement pour le système de refroidissement par évaporation. L'efficacité du système de refroidissement par évaporation directe dépend principalement du tampon de refroidissement et, par conséquent, le matériau utilisé dans le tampon de refroidissement joue un rôle très important. Ici, deux types de matériaux à base naturelle (mousse de charbon actif et coussin de luffa) ont été sélectionnés pour être utilisés comme coussin de refroidissement. La température et l'humidité sont les données les plus importantes dans cette analyse expérimentale. Les lectures de ces termes sont prises pour chaque type de tampon de refroidissement à l'aide d'un enregistreur de données et également, les calculs supplémentaires

sont effectués sur la base de ces lectures. Le matériau du coussin de refroidissement et le débit d'air sont variés pour observer l'effet sur leur efficacité de refroidissement. D'après l'analyse, le coussin de refroidissement ACF montre une meilleure efficacité de refroidissement par rapport à celle du coussin de luffa [28].



*Figure II.12: (a) Mousse de charbon actif, (b) Luffa [28].*



*Figure II.13: Efficacité de refroidissement de l'ACF et du coussin de refroidissement en Luffa dans des conditions similaires [28].*

➤ **M.KHOULDAT et M.FENTIZ 2021** dans leur étude d'évaluation des performances d'un système de refroidissement par évaporation de l'eau, dans les régions arides en utilisant des tampons contenant de la laine, de la paille et des fibres de palmier. Ils ont pu identifier plusieurs facteurs qui ont eu un impact sur les performances de système



étudié (évaporation d'eau). Ces facteurs étaient : la température ambiante, l'humidité relative, le débit d'air entrant, ainsi que l'épaisseur des fibres. Une température ambiante plus élevée avec une humidité relative ambiante plus faible avait une plus grande capacité du système à retenir l'eau, ce qui se traduisait par une augmentation du transfert de chaleur et de masse au niveau de tampon et ainsi un refroidissement plus important. L'épaisseur du coussin a un effet positif sur l'augmentation de l'efficacité du refroidissement. Plus le coussin est épais, plus l'échange de chaleur est important [29].



*Figure II.14: Photo du DEC expérimental réalisé à l'Université d'Ouargla [29].*



*Figure II.15: (a) fdem, (b) laine de mouton et (c) paille de blé [29].*

➤ **S.H Sellam et all 2022.** Ils présentent une étude expérimentale d'un refroidisseur à évaporation directe, DEC, conçu et installé dans la région chaude et aride de Biskra, en Algérie. Les fibres de palmier dattier sont utilisées comme nouveau matériau de refroidissement par évaporation. Différents paramètres de performance sont testés expérimentalement pour évaluer les performances thermiques du système DEC. Les résultats montrent que la capacité de refroidissement, l'efficacité de refroidissement et la capacité de refroidissement totale du tampon s'améliorent en augmentant l'épaisseur du tampon et le débit massique d'air dans des conditions ambiantes extrêmes. De plus, la durée de fonctionnement

n'a pas d'effet notable sur les performances du DEC. Les paramètres de fonctionnement (épaisseur du tampon, débit massique d'air, conditions ambiantes, quantité et température d'eau) sont les facteurs déterminants pour atteindre les conditions de fonctionnement optimales du DEC. Enfin, une comparaison avec les systèmes de refroidissement habituels montre que le tampon en fibres de palmier dattier est un matériau efficace par rapport aux tampons classiques dans les zones chaudes et arides [30].

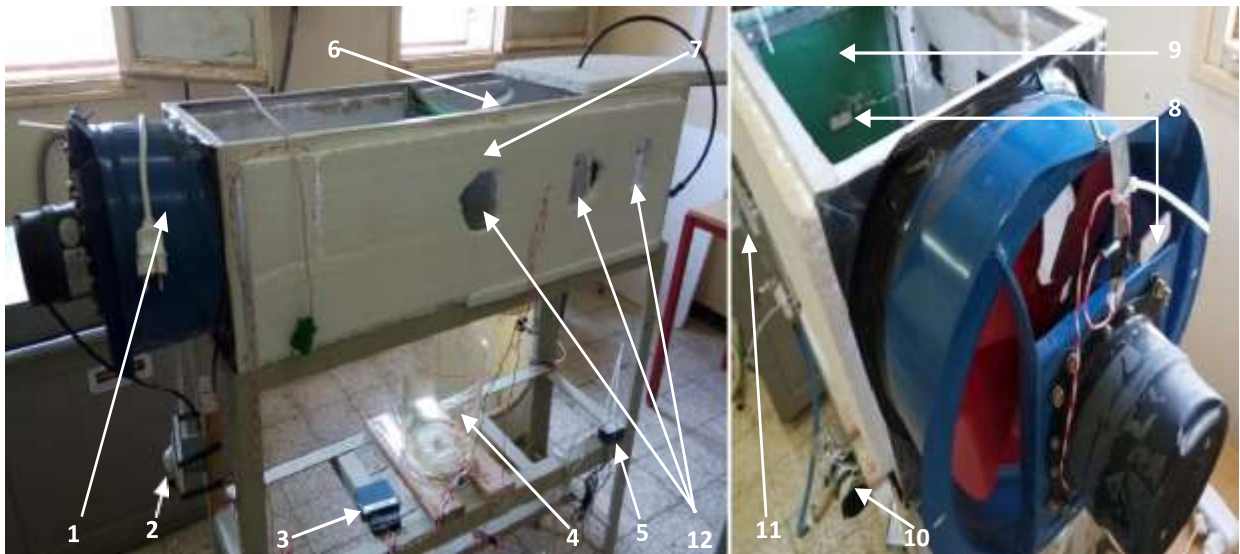


Figure II.16: Description du dispositif expérimental [30].

<b>1</b>	Ventilateur	<b>7</b>	Tunnel d'air
<b>2</b>	Variateur de vitesse de l'air entrant	<b>8</b>	Thermocouples
<b>3</b>	Carte acquisition	<b>9</b>	Interface humide à base de fibres de palmier
<b>4</b>	Réservoir d'eau gradué	<b>10</b>	Pompe d'eau
<b>5</b>	Sonde de température de l'eau	<b>11</b>	Débitmètre
<b>6</b>	Circuit d'arrosage	<b>12</b>	Orifices de mesure de l'humidité

# **Chapitre III :**

## **Étude expérimentale**

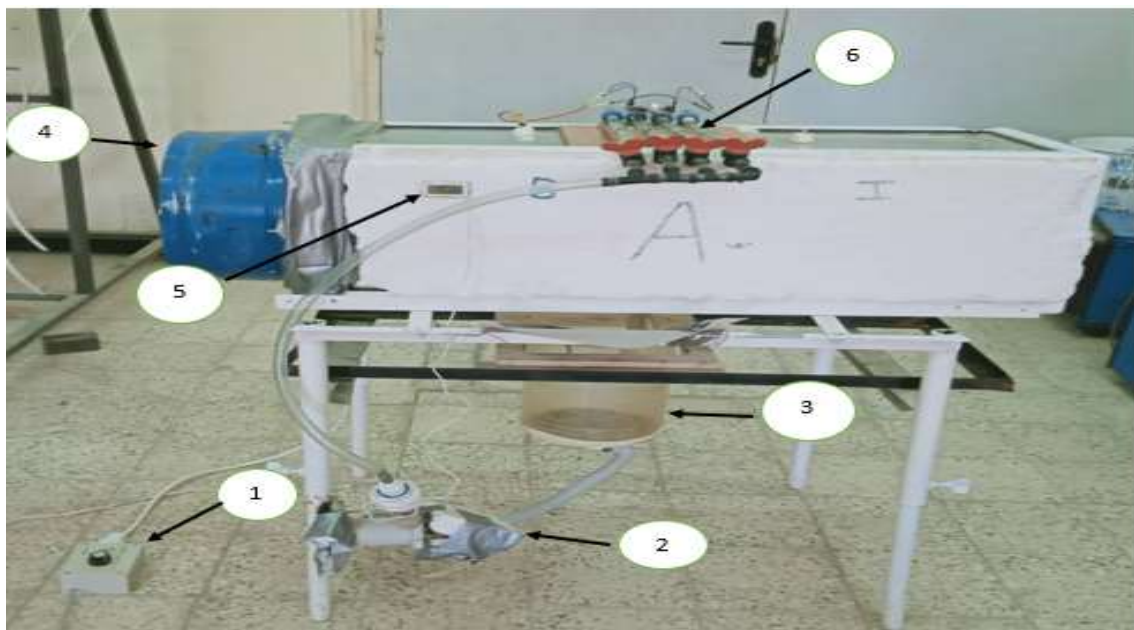
## Chapitre III : Etude expérimentale

### III-1. Description du montage expérimental

Pour conduire notre étude, un dispositif expérimental a été réalisé au sein du laboratoire énergétique (Hall technologique).

Ce montage expérimental se compose d'un canal de verre rectangulaire de section carrée de surface 0.09 mètre carré et une longueur totale du refroidisseur par évaporation direct (DEC) de 1 m. une couche de polystyrène est utilisée comme isolant pour réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur.

Dans cette étude, des tampons (pads) utilisés constitués de plusieurs fines couches de fibres (telles que des fibres de palmier, fillasse, eucalyptus) regroupés avec des épaisseurs de (15, 20 et 30) mm et de dimension de (0,26 x 0,21) m<sup>2</sup>.



*Figure III.17: Vue face du banc d'essai " Direct evaporative cooling " DEC*

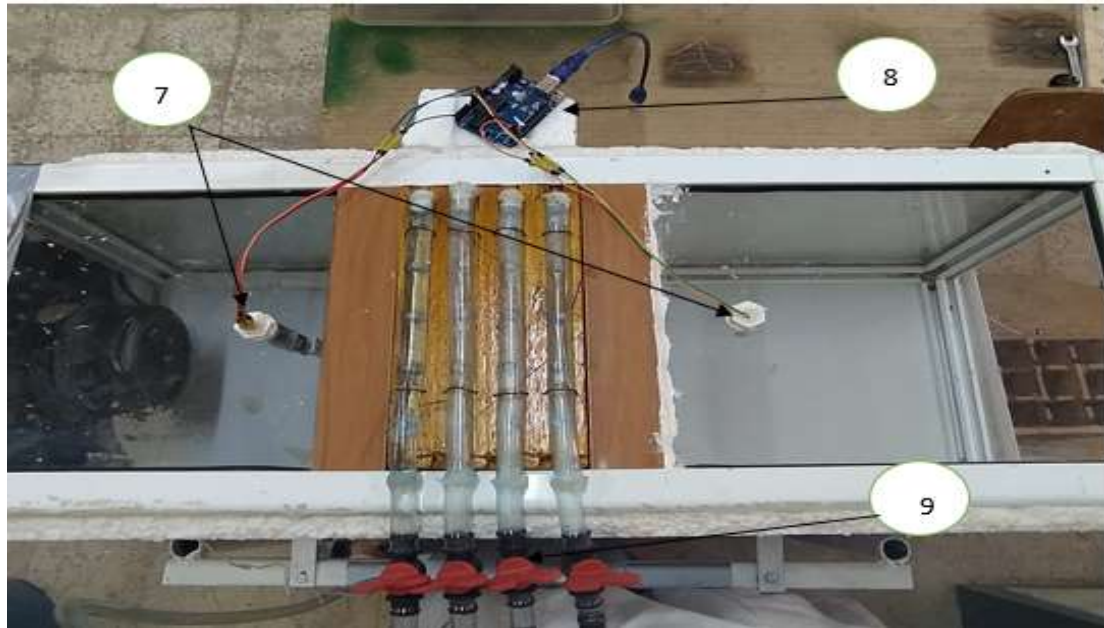


Figure III.18: Vue de dessus du DCE, (système d'arrosage).

1	Régulateur	5	Capteur de température d'eau
2	Pompe	6	Système de pulvérisation d'eau
3	Réservoir	7	Capteur de température (DHT22)
4	Ventilateur	8	Arduino
9	Vannes		

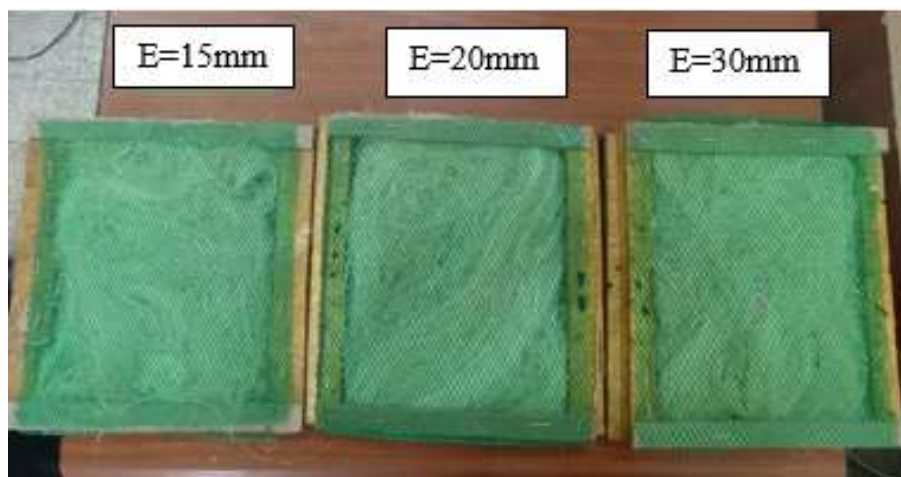


Figure III.19: Dimensions des tampons d'évaporation utilisés.



(L1)

(L2)

(L3)

**Figure III.20:** matériaux utilisés (L1), palmier, (L2) eucalyptus et (L3) fillasse.

Toutes les expériences ont été menées dans des laboratoires pédagogiques de l'Université de Biskra. Les tampons sont testés et placés 50 cm après l'entrée dans le 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.

- Pour mesurer les changements d'humidité relative et la température de bulbe sec à l'entrée et à la sortie, un collecteur DHT22 est utilisé et un autre détecteur est installé dans le tuyau relié au réservoir pour obtenir les températures de l'eau.
- Pour afficher et enregistrer les changements de température de l'entrée et de la sortie de l'installation pilote DEC, une carte d'acquisition de données (Arduino) a été utilisée et connectée à un ordinateur.

- 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 1 présente les caractéristiques techniques des instruments de mesure utilisés dans la configuration expérimentale du DEC.

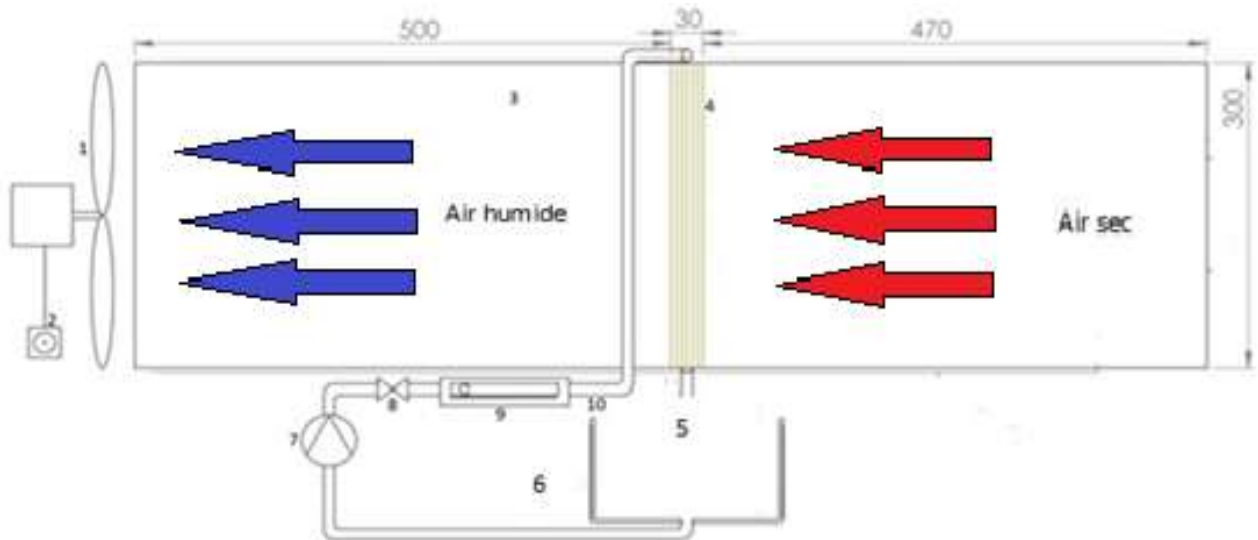



Figure III.21: Schéma de la configuration DEC expérimentale.

### II-1. Instrumentation



Les instruments de mesure utilisés sont regroupés dans le tableau suivant :



Tableau III.2: Spécifications techniques des instruments de mesure utilisés dans la configuration expérimentale du DEC.


Éléments	Spécifications
DEC– Refroidisseur à évaporation directe	<p>Configuration : Canal rectangulaire horizontal (boucle ouverte DEC)</p> <p>Matériau du canal :</p> <p>Épaisseur du plexiglas : 0,004 m</p> <p>Matériau de l'isolant polystyrène épaisseur : 0,02 m</p> <p>Fibres de palmier dattier (feuille)</p> 

	<p>Longueur du canal rectangulaire : 0.8 m</p> <p>Largeur du canal rectangulaire : 0.3 m</p> <p>Hauteur du canal rectangulaire : 0,3 m</p> <p>Dimensions des tampons : (0,3 x 0,3) m<sup>2</sup></p>	
<p>Ventilateur pour l'extraction d'air</p>	<p>Modèle : L300</p> <p>Tension : 220 V</p> <p>Puissance : 130 W</p> <p>Vitesse de rotation : 1400 r/min</p> <p>Spécifications : 300 mm</p> <p>Fréquence : 50 Hz</p>	
<p>Pompe pour faire circuler l'eau</p>	<p>Marque : HANYU, Modèle : B20- 6</p> <p>Tension : 220-240 V</p> <p>Fréquence : 50Hz</p> <p>Puissance : 30 W</p> <p>Courant : 0,25 A</p> <p>Débit volumétrique : 17 L/min</p> <p>Spécification : 30 mm</p>	
<p>Thermo- anémomètre à hélice pour mesurer la vitesse de l'air</p>	<p>Model : PCE-TA 30</p> <p>Affichage : affichage LCD Capteur : sonde souple longueur de la sonde : 300 mm Ø sonde : 27,2 mm</p>	



	<p>Pouvoir 1 pile 9 V</p> <p>Arrêt automatique : oui, après 5 min d'inactivité (pour préserver l'autonomie de la batterie)</p> <p>Dimensions 163 x 45 x 34 mm</p> <p>Enceinte : Plastique ABS</p> <p>Masse 257g</p>	
<p>Panneau de température numérique (NTC) pour obtenir la température de l'eau</p>	<p>Marque : EKO</p> <p>Modèle : TP3</p> <p>Tension : 220 VAC Puissance : &lt; 3 W</p> <p>Plage de mesure : -30 à 110 °C</p> <p>Résolution : 0,1 °C pour (&lt;100°C); 1 °C pour (&gt;100 °C)</p>	
<p>Thermomètres à résistance (DHT 22) pour l'obtention des températures d'air DEC entrée/sortie</p>	<p>Tension d'alimentation : 3.3 à 5,5V DC</p> <p>Connectivité : signal digital Bus (3 broches)</p> <p>Champ de mesure d'humidité : 0% à 100%,</p> <p>Champ de mesure de Température (-40 à +80 °C)</p> <p>Précision : Humidité + -2%, Température + - 0,5 °C</p> <p>Résolution : Humidité 0.1%, Température 0,1 °C</p> <p>Dimensions : 28,2 mm x 13.1 mm x 10 mm</p>	

<p>Module d'entrée analogique (arduino uno)</p>	<p>Microcontrôleur : ATmega328  courant CC par broche E/S :  40 mA  courant CC par broche 3,3 V :  50 mA  entrées analogiques : 6  mémoire flash : 32 ko (ATmega328) dont 0,5 ko utilisé par le chargeur de démarrage  SRAM : 2 ko (ATmega328)  EEPROM : 1 ko (ATmega328)  vitesse d'horloge : 16 MHz</p>	
<p>Manomètre</p>	<p>Modèle : PM-9102.  Circuit : circuit LSI du microprocesseur  Affichage : 61mm*34mm Super grand écran LCD. 15mm (0,6) taille des chiffres  Température de fonctionnement : 0 à 50 °C (32 à 122 °F).  Humidité de fonctionnement : moins de 80 % R .H.  Alimentation : 006P batterie DC 9 V (robuste).  Courant d'alimentation : env.DC 6,0 mA.  Poids : 345 g/ 0,76 LB.</p>	

Contrôler à tension variable	Tension d'entrée : 220 V c.a. Tension de sortie : AC0-220V Puissance maximale : 4000W Taille 100*85*53mm/3,94*3,35*2,09 inh prise : prise US Poids : 450 g	
------------------------------	--	--

### III-2. Analyse des performances du DEC

➤ L'efficacité de refroidissement par évaporation (efficacité de saturation)

$$\varepsilon = \frac{T_{a,int} - T_{a,ext}}{T_{a,int} - T_h} \quad (III.1)$$

Avec :

$T_{a, int}$  : Température de l'air intérieur °C

$T_{a, ext}$ : Température de l'air extérieur °C

$T_h$  : Température humide de l'air °C

➤ Capacité de refroidissement sensible du DEC

$$Q_s = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{a,i,int} - T_{a,ext}) \quad (III.2)$$

Avec :

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

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

Débit massique de l'air :

$$\dot{m}_a = \rho * V * S \quad (III.3)$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)

V : Vitesse d'air (m/s)

S : surface (m<sup>2</sup>)

$$V = \sqrt{2 * \Delta P / \rho} \quad (\text{III.4})$$

$\Delta P$  : Différence de pression [Pas]

➤ **L'efficacité énergétique**

$$EER = \frac{Q_s}{W_f + W_p} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$W_f$  : est la puissance du ventilateur (W).

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

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et discussion**

## Chapitre IV : Résultats et discussion

### I-Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des expériences effectuées avec le banc d'essais du système DEC réalisé dans le cadre de ce mémoire dans hall technologique à l'université de Biskra. Les résultats sont discutés afin d'éclaircir l'effet de quelques paramètres (type de fibre, débit d'air, épaisseur du tampon..) sur les performances thermique du système étudié dans les régions chaudes et arides tel que la région de Biskra.

### II-1- procédures et mesures expérimentales

Tous les instruments de mesure ont été correctement calibrés avant le début des expériences réalisées dans une salle presque ouverte dans le hall technologique de l'Université de Biskra.

La préparation des tampons des trois fibres utilisées dans ce travail à savoir : fibre de palmier (L1), eucalyptus (L2) et Fillasse (L3) (voir tableaux 1 et 2) s'est faite au même endroit ; chaque tampon de fibres a été trempé dans de l'eau pour s'assurer que le tampon était complètement humide avant de le placer dans le banc expérimental. L'humidité relative et la température de bulbe sec de l'air à l'entrée et à la sortie du tunnel, la température de l'eau, le débit massique d'air et la quantité d'eau évaporée ont été mesurés et enregistrés.

Les expériences ont été réalisées dans le hall technologique de l'Université de Biskra dans la période du 17 Mai au 30 Mai 2022 pour trois débits massiques d'air (0,236, 0,334 et 0,410 kg/s) indiqués dans les tableaux 1 et 2 par des lettres (A, B et C) respectivement. Les mesures ont été effectuées pendant 1 heure pour chaque débit d'air et avec trois épaisseurs de fibres (15mm, 20mm et 30mm). 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 5 minutes.

Les mesures expérimentales des températures et humidités relatives de l'air à l'entrée du tunnel et des températures de l'eau sont données dans le tableau 1. Les mesures expérimentales des températures et humidités relatives de l'air à la sortie du tunnel et des quantités d'eau évaporée sont données dans le tableau 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.3:** Paramètres mesurés à l'entrée.

Débit d'air		A			B			C		
Kg/s		0,236			0,334			0,410		
JJ /mm/2020		22/05	15/05	22/05	15/05	22/05	23/05	16/05	22/05	23/05
Matériaux		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Temp [min]										
Ta, int [°C]	00 :05	28	33	32	36	29	31	35	28	34
	00 :10	31	33	32	36	29	31	36	28	34
	00 :15	33	33	32	35	29	32	34	28	33
	00 :20	33	33	32	35	29	32	36	28	33
	00 :25	34	33	32	34	29	32	35	28	33
	00 :30	34	33	32	35	29	32	36	30	33
	00 :35	34	33	31	35	30	32	35	30	34
	00 :40	34	33	32	34	30	32	36	31	34
	00 :45	34	33	32	35	29	33	36	31	33
	00 :50	35	33	32	36	30	33	35	31	33
	00 :55	35	33	33	36	30	34	35	31	34
	01:00	34	34	32	36	30	33	36	31	33

RHa, int [%]	00 :05	38	36	39	33	40	44	31	41	39
	00 :10	34	36	40	32	40	42	31	41	39
	00 :15	33	36	39	31	41	39	34	40	37
	00 :20	33	36	39	32	41	40	32	40	38
	00 :25	32	36	39	31	41	40	31	41	38
	00 :30	32	36	39	33	41	39	32	41	39
	00 :35	32	36	40	32	41	40	32	40	37
	00 :40	32	36	39	31	41	39	32	40	38
	00 :45	32	36	38	33	41	38	32	40	39
	00 :50	31	36	39	31	40	37	33	41	39
	00 :55	31	36	39	31	41	38	33	40	37
01:00	31	36	38	31	40	39	32	41	38	

Tableau IV.4: Paramètres mesurés à la sortie.

Débit d'air Kg/s		A			B			C		
		0,236			0,334			0,410		
JJ /mm/2020		22/05	15/05	22/05	15/05	22/05	23/05	16/05	22/05	23/05
Matériaux		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Temp [min]										
	00 :05	27	30	31	30	25	29	30	28	31
	00:10	26	30	30	29	25	30	27	28	31
	00 :15	26	30	27	28	27	26	26	28	28



Ta, ext [°C]	00 :20	25	30	25	28	26	28	27	28	27
	00 :25	27	30	27	27	27	29	27	28	29
	00 :30	26	30	26	27	27	27	27	27	26
	00 :35	28	30	27	26	27	29	27	26	27
	00 :40	26	30	26	28	27	30	28	27	27
	00 :45	27	30	27	26	27	27	28	28	28
	00:50	26	30	28	27	27	29	27	26	26
	00 :55	28	31	27	29	27	30	27	27	27
	01:00	27	31	27	28	27	26	28	28	29

RH <sub>a</sub> , ext [%]	00 :05	48	42	45	37	49	45	46	45	49
	00 :10	49	42	49	46	48	48	47	45	49
	00 :15	48	42	49	46	46	52	48	45	48
	00 :20	49	43	56	47	47	47	46	46	49
	00 :25	47	44	47	46	47	44	46	46	47
	00 :30	48	42	51	47	48	47	46	47	59
	00 :35	47	43	48	47	46	44	45	50	49
	00 :40	47	44	55	46	49	42	45	48	50
	00 :45	47	43	51	48	47	50	45	45	47
	00 :50	47	43	50	47	46	45	47	50	52
	00 :55	47	41	55	46	37	50	46	49	50
	01:00	47	41	49	46	45	53	45	47	50

Tw [°C]	00 :05	27,2	28,7	27,8	25,8	28,3	29,1	29,5	28	28,4
	00 :10	27,8	30,1	28,6	27,8	29,5	29	27,9	29,4	30,6
	00 :15	30,2	27,7	27,2	25,7	28,5	28,4	29,1	27	30,6
	00 :20	27,9	28,6	29,3	25,3	27,2	30	29,3	27,6	29,6
	00 :25	30	30,1	28,6	26,9	28,8	30,3	28,8	27,7	28,2
	00 :30	26,8	29	29,4	28,2	27,4	29,1	28,8	27,5	30,6
	00 :35	29,5	28,6	27,6	25,2	28,6	30,4	28,9	26,8	29,1
	00 :40	27,8	28,8	27,3	27,3	28,1	31,2	28,5	28,7	30,6
	00 :45	30,6	31,1	27,5	25,6	27,6	28,2	28,8	27,1	29,4
	00 :50	27,1	29,1	29,4	28,8	29,3	28,8	28,6	26,4	29,3
	00 :55	29,8	30,3	27,6	26,1	26,6	30,5	28,6	28,3	27,8
	01:00	27,8	30,3	27,8	28,8	26,6	26	28,8	27,6	29,7

Th [°C]	00 :05	18,1	21,4	21,3	22,9	19,2	21,6	21,7	20,2	22,8
	00 :10	19,5	21,4	21,5	22,6	19,2	21,2	22,4	20,2	22,8
	00 :15	20,7	21,4	21,3	21,7	19,4	21,3	21,7	20	21,6
	00 :20	20,7	21,4	21,3	21,9	19,4	21,5	22,6	20	21,8
	00 :25	21,2	21,4	21,3	20,9	19,4	21,5	21,7	20,2	21,8
	00 :30	21,2	21,4	21,3	22,2	19,4	21,3	22,6	20,2	22,1
	00 :35	21,2	21,4	20,8	21,9	20,2	21,5	21,9	20,8	22,4
	00 :40	21,2	21,4	21,3	20,9	20,2	21,3	22,6	20,8	22,6
	00 :45	21,2	21,4	21,1	22,2	19,4	21,8	22,6	20,8	22,1
	00 :50	21,7	21,4	21,3	22,4	20	21,6	22,2	21	22,1

	00 :55	21,7	21,4	22,1	22,4	20,2	22,6	22,2	20,8	22,4
	01:00	20,9	22,1	21,1	22,4	20	22,1	22,6	21	21,8
ε	00 :05	0,101	0,258	0,093	0,458	0,408	0,212	0,375	0,204	0,267
	00 :10	0,434	0,258	0,190	0,522	0,408	0,102	0,661	0,204	0,267
	00 :15	0569	0,255	0,467	0,526	0,208	0,560	0,650	0,200	0,438
	00 :20	0,650	0,258	0,654	0,534	0,312	0,380	0,671	0,200	0,535
	00 :25	0,546	0,258	0,467	0,534	0,208	0,285	0,601	0,204	0,357
	00 :30	0,625	0,258	0,560	0,625	0,208	0,467	0,671	0,306	0,642
	00 :35	0,468	0,258	0,392	0,687	0,306	0,285	0,610	0,490	0,603
	00 :40	0,625	0,258	0,560	0,458	0,306	0,186	0,597	0,392	0,614
	00 :45	0,546	0,258	0,458	0,703	0,208	0,535	0,597	0,294	0,458
	00 :50	0,676	0,172	0,373	0,661	0,300	0,350	0,625	0,500	0,642
	00 :55	0,526	0,252	0,550	0,514	0,306	0,350	0,625	0,392	0,603
	01:00	0,534	0,171	0,458	0,588	0,300	0,642	0,597	0,300	0,357

Qs	00 :05	237,64	712,9	237,6	2016,2	1344,1	672,07	2058,2	823,28	1234,9
	00 :10	1188,2	712,9	2008	2352,2	1344,1	336,03	3704,7	823,28	1234,9
	00 :15	1663,5	712,9	1188,2	2352,2	672,07	2016,2	3293,7	823,28	2058,2
	00 :20	1901,1	712,9	1663,5	2352,2	1008,1	1344,1	3293,1	823,28	2469,8
	00 :25	1663,5	712,9	1188,2	2352,2	672,07	1008,1	3704,7	2008	1646,5
	00 :30	1901,1	712,94	1425,8	2688,3	672,07	1680,1	3293,1	1234,9	2881,4
	00 :35	1425,8	712,94	950,58	3024,3	1008,1	1008,1	3293,1	2058,2	2881,4
	00 :40	1901,1	712,94	1425,8	2016,2	1008,1	672,07	3293,1	1646,5	2881,4
	00 :45	1663,5	712,94	1188,2	3024,3	672,07	2016,2	3293,1	1234,9	2058,2
	00 :50	2138,8	712,94	950,58	3024,3	1008,1	1344,1	3293,1	2058,2	2881,4

	00:55	1663,5	475,29	1425,8	2688,3	1008,1	1344,1	3293,1	1646,5	2881,4
	01:00	1663,5	712,94	1188,2	2688,3	1008,1	2352,2	3293,1	1234,9	1646,5

**Tableau IV.5:** 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.

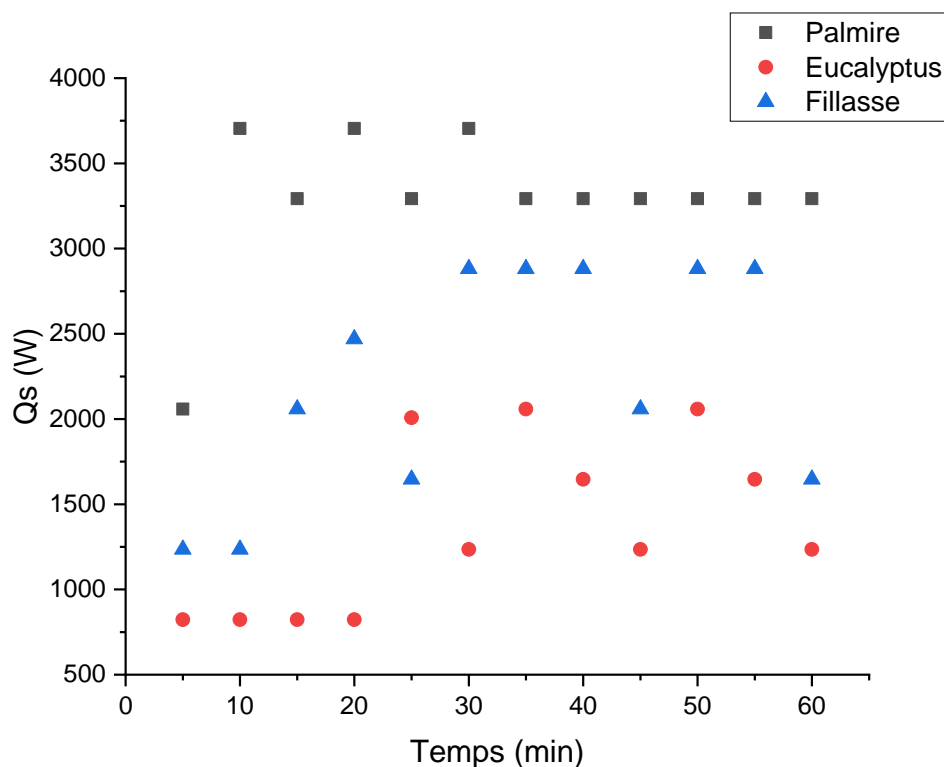
	C-E1	C-E2	C-E3
JJ/mm/2022	18/05	17/05	16/05
$T_{a,int}$ [°C]	32,91	33,91	35,41
$RHa,int$ [%]	36,08	35,58	32,08
$T_w$ [°C]	29,19	26,69	31,2
$T_{a,ext}$ [°C]	25,33	26,33	27,41
$RHa,ext$ [%]	53,25	51,16	46
$T_h$ [°C]	21,34	21,95	24,11
$\varepsilon$ [-]	0,65	0,63	0,61
$Q_S$ [W]	3121,60	3121,60	3293,12
$ERR$	19,51	19,51	20,58

### III-1-Effet du type de matériau du tampon sur la performance thermique

La figure (IV.22) montre la variation de la capacité de refroidissement  $Q_s$  des trois fibres utilisé (palmier, eucalyptus et fillasse) en fonction du temps pour la campagne de mesure (C). D'après les résultats de la figure IV.22, la capacité de refroidissement des fibres de palmier (3704,7 W) est la plus élevée. Cette valeur est correspondent à la température ambiante maximale (36 °C) et à l'humidité relative la plus faible (31 %), voir tableaux IV.1 et IV.2.

En d'autres termes, un air chaud à faible teneur en vapeur d'eau et à faible température de point de rosée avait 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. Ceci

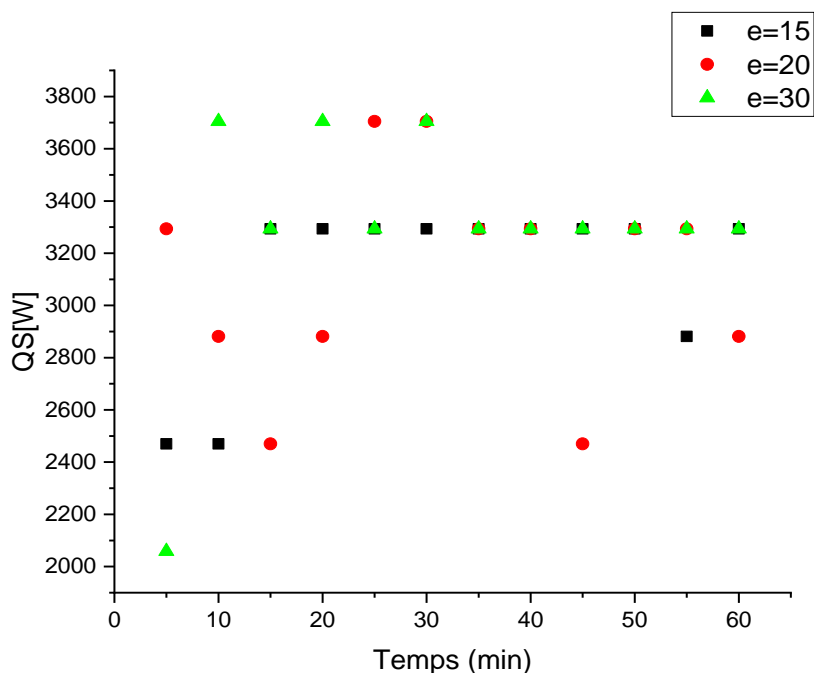
permet ainsi d'augmenter l'écart de température entre l'entrée et la sortie. En outre, nous notons que la capacité de refroidissement des fibres de palmier est toujours beaucoup plus élevée que celui d'eucalyptus (L2) ou de filasse (L3) en raison de la capacité des fibres de palmier à absorber une grande quantité d'eau.



**Figure IV.22 :** Impact du type de matériau du tampon sur la performance thermique (compagne de mesure C)

### III-2-Effet de l'épaisseur du tampon sur la performance thermique

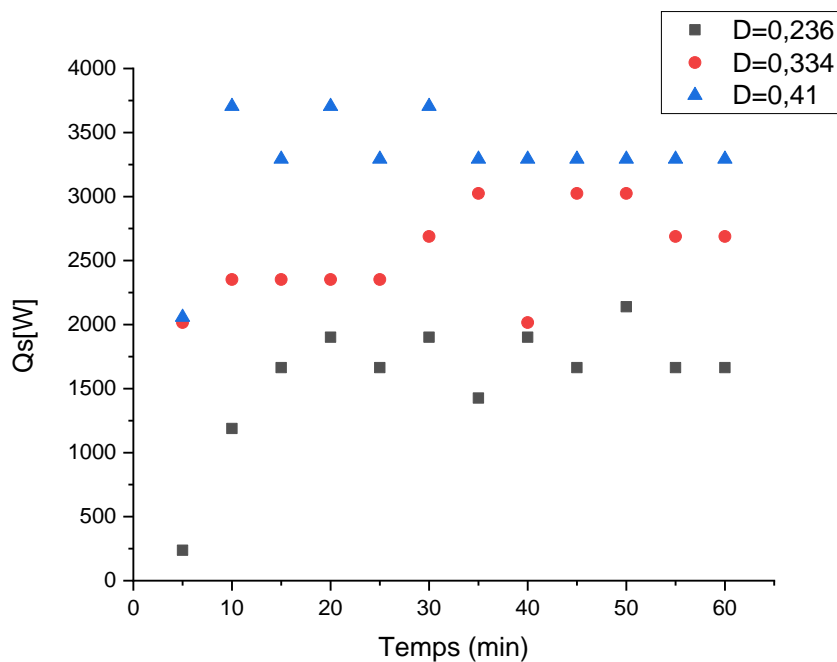
La figure (IV.23) montre l'évolution de la capacité de refroidissement pour chaque épaisseur des fibres de palmier (15 mm, 20mm et 30 mm) au fil du temps. Il est à noter que les tests sont menés dans les conditions climatiques différentes ce qui génère des résultats instables. Toutefois, on peut dire d'après les résultats de la figure IV.23 que plus le tampon des fibres est épais, plus la capacité de refroidissement est élevée, en raison de l'augmentation du volume d'échange de chaleur et de masse entre l'air et les fibres. Ainsi, l'augmentation de l'épaisseur du tampon, augmente la quantité d'eau évaporée.



*Figure IV .23: Effet de l'épaisseur du tampon sur la performance thermique*

### III-3-Effet du débit d'air sur la performance thermique

La figure IV.24 représente l'effet du débit massique sur les performances thermiques des fibres de palmier (voir tableau IV.1). Il a été observé que la capacité de refroidissement augmente avec l'augmentation du débit massique de l'air et atteint sa valeur maximale 3704,76 W pour le débit de 0,41 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.24:** Effet du débit d'air sur la capacité de refroidissement des fibres de palmier (A, B et C)

### III-4-Effet des conditions ambiantes sur la performance thermique du DEC

La figure IV.25 illustre la quantité d'eau évaporée en ml par rapport à la température d'entrée d'air au fil du temps pour les fibres de palmier. Comme prévu, la quantité d'eau évaporée augmente progressivement avec l'augmentation de la température d'air à l'entrée. Cette augmentation est justifiée par l'augmentation de la chaleur latente par évaporation à cause l'augmentation de la température.

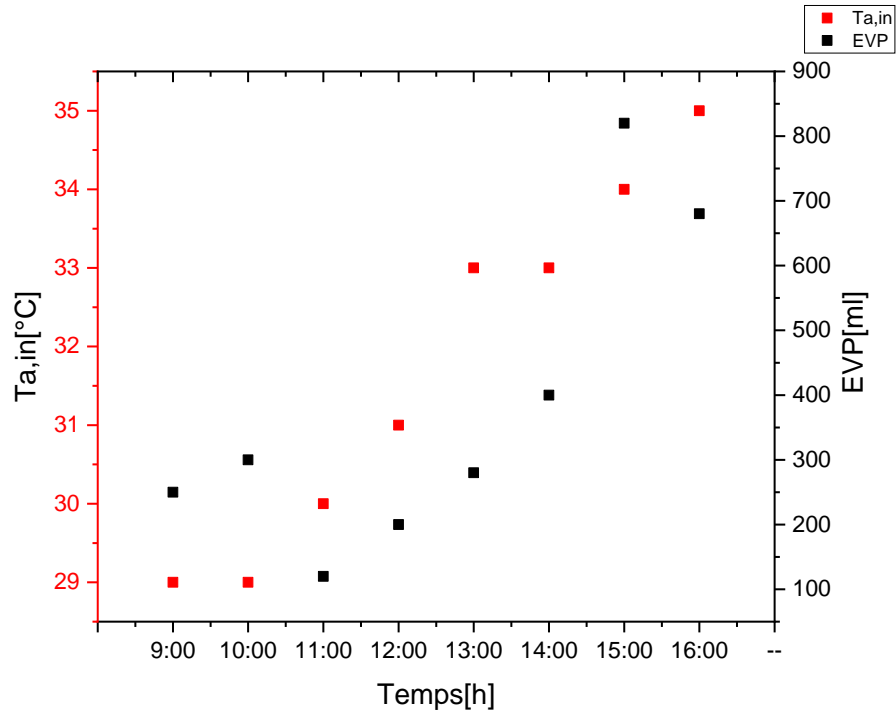


Figure IV.25: La quantité d'eau évaporée par rapport à la température d'entrée d'air.



## Conclusion Générale

Un banc d'essai " Refroidisseur par évaporation directe" (DEC) est conçu au hall technologique de l'université de Mohamed KHIDER, dont le but de tester les performances de ce système dans la région de Biskra, en utilisant des tampons de fibres tel que (Palmier dattier - Eucalyptus - Filasse).

Une étude expérimentale a été effectuée pour mesurer et contrôler les principaux paramètres climatiques : la température de l'air à l'entrée et la sortie du canal, ainsi que l'humidité relative, le débit d'air véhiculé et le débit d'eau utilisé pour humidifier l'enceinte d'évaporation.

Sur la base des résultats obtenus, nous avons pu identifier plusieurs facteurs qui ont eu un impact sur les performances de système (DEC) ces facteurs sont la température ambiante, l'humidité relative, le débit d'air entrant, ainsi que l'épaisseur et le matériau des fibres.

- On comparant les trois matériaux, le tampon à fibre de palmier-dattier a donné de meilleurs résultats par rapport aux deux autres matériaux, en raison de sa capacité à retenir l'eau ainsi son faible coût.
- L'efficacité énergétique (ERR) est directement proportionnelle à l'épaisseur du Pad palmier-dattier.
- La capacité de refroidissement et la consommation d'eau par heure augmentent avec l'augmentation du débit massique d'air.

En résumé, le système de DEC est efficace lorsque les températures ambiantes sont plus élevées, il est très éco-énergétique il ne présente aucun rejet polluant pour l'environnement. Ce système peut être utilisé comme une alternative efficace aux systèmes de climatisation conventionnels à un coût d'exploitation inférieur dans les zones de climat chaud et sec

### Références bibliographiques

- [1] CUCE, Pinar Mert et RIFFAT, Saffa. A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, p. 1240-1249.
- [2] NADA, S. A. et SAID, M. A. Performance and energy consumptions of split type air conditioning units for different arrangements of outdoor units in confined building shafts. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 123, p. 874-890.
- [3] GUAN, Lisa, BENNETT, Michael, et BELL, John. Evaluating the potential use of direct evaporative cooling in Australia. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 108, p. 185-194.
- [4] BELLOUFI, Yousef. *Etude théorique et expérimentale de l'exploitation de la géothermie dans le réchauffement ou le refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat*. 2017. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [5] [https://stringfixer.com/fr/Evaporative\\_cooling](https://stringfixer.com/fr/Evaporative_cooling) (Visité le 20 avril 2022)
- [6] ZOUBIRI, Nesserine. Étude de rafraîchissement de l'air par humidification dans une interface à base de fibres végétales: Luffa et palmier dattier.
- [7] <https://fae.hcmute.edu.vn/ArticleId/c40ee266-2806-411f-882281638d1170b1/evaporative-cooling-for-chillers-and-dry-coolers> (Visité le 21 Avril 2022)
- [8] Zerguine, Nadia. *Etude De Refroidissement De L'air Au Dessous De Sa Température Humide À L'aide Dun Echangeur De Chaleur Évaporatif Indirect*. 2014. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [9] AMER, O., BOUKHANOUF, R., et IBRAHIM, H. G. A review of evaporative cooling technologies. *International journal of environmental science and development*, 2015, vol. 6, no 2, p. 111.
- [10] BENAOUNE, Djamel. *Etude expérimentale du rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau*. 2012. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra .
- [11] ] HUI, Sam CM et CHEUNG, W. Y. Two-stage evaporative cooling systems in hot and humid climate. In : *Proceedings of the Tianjin-Hong Kong Joint Symposium 2009, 29-30 Jun*

2009, Tianjin, China. Hong Kong Institution of Engineers, Building Services Division., 2009.

[12] PORCHER, Georges. *Cours de climatisation.*. EDIPA, 1973.

[13] Aribi, Yacine. Etude De Performance Des Fibres De Palmiers Dattiers Utilisees Dans Un Systeme De Refraichissement De L'air Chaud Dans Différents Conditions. 2019

[14] REZGUI, Kamal. Etude numérique d'un système de rafraîchissement évaporatif indirect (IEC) avec régénération. 2019.

[15] JANNOT, Yves. l'air humide. *Laboratoire Energétique et Phénomène de Transfert (LEPT)*, 2005.

[16] CARPENTIER, Vincent. *Etude pour le développement d'un générateur d'air humide.* 2005. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.

[17] [https://sti2d.ecolelamache.org/chaleur\\_sensible\\_et\\_chaleur\\_latente.html](https://sti2d.ecolelamache.org/chaleur_sensible_et_chaleur_latente.html) (**Visité le 26 avril 2022**)

[18] <https://pdfcoffee.com/qdownload/explication-du-diagramme-de-lair-pdf-free.html>  
(**Visité le 26 avril 2022**)

[19] TASSOU, S. A. et XIANG, W. Modelling the environment within a wet air-cooled vegetable store. *Journal of Food Engineering*, 1998, vol. 38, no 2, p. 169-187.

[20] M. Maerefat , A.P. Haghghi Mech. Eng. Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran 14115-143, Iran , 2010

[21] MIYAZAKI, Takahiko, AKISAWA, Atsushi, et NIKAI, Isao. The cooling performance of a building integrated evaporative cooling system driven by solar energy. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, no 9, p. 2211-2218.

[22] JAIN, J. K. et HINDOLIYA, D. A. Experimental performance of new evaporative cooling pad materials. *Sustainable Cities and Society*, 2011, vol. 1, no 4, p. 252-256.

[23] JAIN, J. K. et HINDOLIYA, D. A. Correlations for saturation efficiency of evaporative cooling pads. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2014, vol. 95, no 1, p. 5-10.

[24] NIYOMVAS, Banyat et POTAKARAT, Bunjerd. Performance study of cooling pads. In : *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2013. p. 931-935.

- [25] ABDALLAH, Amr Sayed Hassan, YOSHINO, Hiroshi, GOTO, Tomonobu, *et al.* Integration of evaporative cooling technique with solar chimney to improve indoor thermal environment in the New Assiut City, Egypt. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2013, vol. 4, no 1, p. 1-15.
- [26] Madhan Anand Kumar, U. Krishnaveni \* K. Ramakrishnan College of engineering, K. Ramakrishnan College of engineering, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences ISSN: 0974-2115 Analysis Of Solar Chimney With Evaporative Cooling Cavity To Improve Indoor Air Quality
- [27] Dođramacı, P.A., et al., Experimental study of the potential of eucalyptus fibres for evaporative cooling. *Renewable Energy*, 2019. 131: p. 250-260.
- [28] AZIZ, Radhiyah Abd, ZAMRUD, Nurul Farahin, et ROSLI, Nurrina. Comparison on cooling efficiency of cooling pad materials for evaporative cooling system. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 2018, vol. 1, p. 61-68.
- [29] Mohammed KHOULDAT , Mohammed FENTIZ , Evaluation des performances d'un système de refroidissement par évaporation de l'eau dans les régions arides en utilisant des fibres naturelles . 2021, Thèse de MASTER, Université de Ouargla.
- [30] SELLAM, Sadam Houcine, MOUMMI, Abdelhafid, BENCHABANE, Adel, *et al.* Experimental performance of a direct evaporative cooler during summer in Biskra region. 2018.