



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique
et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

N° d'enregistrement

جامعة غرداية

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

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electromécanique.

Spécialité: Maintenance Industrielle.

Thème

Etude des performances thermiques d'un système de refroidissement de type PAD pour une serre agricole à Ghardaïa

Présenté par :

Seglab Said

Benhouit Miloud

BOUARAOUR Kamel

MCA

Univ. Ghardaïa

Président

LALMI Djem oui

MCA

Univ. Ghardaïa

Examinateur

BADJI Ahmed

Doctorant

Univ. Ghardaïa

Examinateur

AKERMI Fouzi

MAA

Univ. Ghardaïa

Encadrant

BENSEDDIK Abdelouahab

MRA

URAER. Ghardaïa

Co-Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciment

Nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la force et la
Volonté d'accomplir ce travail.

Nos remerciements vont à tous nos familles, pour leurs soutiens incondtionnels
Tout au long de nos années d'études.

Nous tenons avant tout à exprimer nos sincères remerciements à notre directeur de
thèse, Monsieur Faouzi AKERMI, ainsi qu'à notre co-directeur, Monsieur
Abdelouahab BENSEDDIK anis KHERRFI Mohamed Abdel basset et BEN
ABDRRAHMEN Mahfoud. Pour Leur expertise, disponibilité, conseils et soutien
constant tout au long de ce travail sont grandement appréciés. Leur contribution a
été essentielle pour mener à bien ce projet et nous sommes profondément
reconnaissants de leur engagement envers notre réussite. Leur accompagnement
nous a permis de développer nos compétences et de réaliser ce travail avec
confiance et rigueur. Nous leur sommes infiniment reconnaissants pour leur
précieuse contribution à notre parcours académique.

On remercie les membres de jury qui ont accepté ce travail et d'y apporter
Leurs enrichissements.

On adresse nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de
Près ou de loin, à la réalisation de ce travail contribué.

Seglab Saïd & Ben Houit Miloud

DEDICACE

Je dédie cet humble travail et le fruit de mes efforts à:

La chose la plus précieuse qui existe est celle qui a lié son obéissance à

La charité à celle qui m'a satisfait de ce monde et de ce qu'il contient

..... "MA MÈRE BIEN-AIMÉE"

À qui était la plate-forme de ma vie et a enlevé toutes les difficultés et

Les difficultés sur mon chemin

..... "MON CHER PÈRE"

À tous les membres de la famille et à tous ceux qui m'ont aidé et aidé

À tous mes amis en spécialisation en maintenance industrielle

À tous les travailleurs de l'unité DE recherche appliquée énergie renouvelable

Et tous ceux qui m'ont apporté deux ans de formation

À tous ceux qui m'ont rassemblé dans ce travail

À tous ceux qui m'ont appris à faire le chemin du succès

Cher Professeurs " Abdelouahab BENSEDDIK et Faouzi AKERMI"

Seglab Saïd & Ben Houit Miloud

RESUME

Ce mémoire de Master présente les résultats d'une étude expérimentale sur un nouveau prototype de serre canarienne équipée d'un système de refroidissement par évaporation utilisant des fibres de palmier dattier. Deux serres canariennes (à l'échelle 1/50) sont réalisées et testées expérimentalement à la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa, Algérie. La première, sans système de refroidissement utilisant des fibres de palmier dattier (témoin) et le deuxième est modifié afin de tester l'influence du système de refroidissement. L'expérimentation se fait dans le but de déterminer les performances thermiques de la serre canarienne équipé d'un système de refroidissement. Les résultats obtenus dans le prototype montrent que ce système de refroidissement est efficace pour prévenir la surchauffe de la serre en été. Les fibres de palmier dattier se révèlent être un matériau alternatif prometteur en raison de leur capacité élevée de rétention d'eau, de leur abondance et de leurs coûts réduits. En outre, ce système de refroidissement par évaporation se distingue par son efficacité énergétique et son respect de l'environnement, sans émission de polluants. Ces résultats suggèrent que ce système pourrait être une alternative viable aux systèmes de refroidissement conventionnels, offrant des coûts d'exploitation inférieurs dans les régions à climat chaud et aride.

Mots clés : Serre canarienne ; refroidissement par évaporation (PAD) ; fibres de palmier dattier ; comportement thermique ; climat chaud et aride.

ABSTRACT

This Master's thesis presents the results of an experimental study on a new prototype of a Canarian greenhouse equipped with an evaporative cooling system using date palm fibers. Two prototypes of the Canarian greenhouse (1/50 scale) were designed, constructed and experimentally tested at the Experimental Platform of the Applied Research Unit in Renewable Energies (URAER) in Ghardaïa, Algeria. The first prototype served as a control without the evaporative cooling system using date palm fibers, while the second prototype was modified to assess the influence of the cooling system and any reported modifications. The experimentation aimed to determine the thermal performance of the Canarian greenhouse prototype equipped with the evaporative cooling system using date palm fibers. The results obtained in the prototype demonstrate that this cooling system is effective in preventing greenhouse overheating during summer. Date palm fibers prove to be a promising alternative material due to their high-water retention capacity, abundance, and reduced costs. Furthermore, this evaporative cooling system stands out for its energy efficiency and environmental friendliness, with no pollutant emissions. These findings suggest that this system could serve as a viable alternative to conventional cooling systems, offering lower operating costs in hot and arid regions.

Keywords: Canarian greenhouse; evaporative cooling (PAD); date palm fibers; thermique; hot and arid climate.

المخلص

تعرض هذه الأطروحة الماجستير على نتائج دراسة تجريبية على نموذج أولي جديد لبيت البلاستيكي كناريان مجهز بنظام تبريد تبخيري باستخدام ألياف نخيل التمر. تم تصميم نموذجين أوليين للبيت البلاستيكي كناريان (مقياس 50/1) وبناهما واختبارهما تجريبياً في المنصة التجريبية لوحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة (URAER) في غرداية، الجزائر. كان النموذج الأولي بمثابة عنصر تحكم بدون نظام التبريد، بينما تم تعديل النموذج الأول و الثاني لتقييم تأثير نظام التبريد وأي تعديلات تم الإبلاغ عنها. هدفت التجربة إلى تحديد الأداء الحراري لنموذج الصوبة البلاستيكية الكناريان المجهز بنظام التبريد التبخيري باستخدام ألياف نخيل التمر. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في النموذج الأولي أن نظام التبريد هذا فعال في منع ارتفاع درجة حرارة الدفيئة خلال فصل الصيف. أثبتت ألياف نخيل التمر أنها مادة بديلة واعدة نظراً لقدرتها العالية على الاحتفاظ بالمياه، ووفرته، وانخفاض تكاليفها. علاوة على ذلك، يتميز نظام التبريد التبخيري هذا بكفاءته في استخدام الطاقة وصديقه للبيئة، مع عدم وجود انبعاثات ملوثة. تشير هذه النتائج إلى أن هذا النظام يمكن أن يعمل كبديل عملي لأنظمة التبريد التقليدية، مما يوفر تكاليف تشغيل أقل في المناطق الحارة والقاحلة.

الكلمات الرئيسية: دفيئة الكناريان؛ التبريد التبخيري (PAD)؛ ألياف نخيل التمر السلوك المائي الحراري المناخ الحار والجاف.

Table des matières

Remerciements	ii
Dedicace	ii
Résumé	iii
Table des matières... ..	vi
Liste des figure	vii
Liste des abréviation	xi
Introduction générale.....	ii
CHAPITRE I : Généralité sur les serres	3
I.1 Introduction	3
I.2. Historique, définition et objectif de la plasticulture	4
I.2.1. Situation de la plasticulture	4
I.2.1.1. Dans le monde	4
I.2.1.2. En Algérie.....	5
I.2.1.3. En Ghardaïa	6
I.2.2. Types de serres agricoles.....	6
I.2.2.1. Serre canarienne	6
I.2.2.2. Serres tunnel	7
I.2.2.3. Serres multi-chapelle	7
I.2.2.4. Serre de jardin	8
I.3. Paramètres de contrôle	9
I.3.1. Température.....	9
I.3.2. Humidité.....	9
I.3.3. Concentration de dioxyde de carbone	10
I.3.4. Radiation solaire	10
I.4. Méthodes de contrôle du climat des serres.....	11
I.4.1. Systèmes de refroidissement dans les serres	11
I.4.2. Systèmes de refroidissement passifs :	12
I.4.3. Système de ventilation.....	12
I.4.3.1. Ventilation Naturelle	12
I.4.3.2. Ventilation forcée	13
I.5. Échangeurs de chaleur	14

I.5.1. Échangeurs de chaleur air-liquide	14
I.5.2. Échangeurs de chaleur air-air	15
I.6. Le refroidissement par évaporation	15
I.6.1. Systèmes de ventilateur et de PAD	16
I.6.2. Systèmes d'évaporation de toit	16
I.6.3. Systèmes de brumisation	17
I.7. Chauffage	17
I.8. Systèmes de chauffage	18
I.8.1. Chauffages par unité.....	18
I.8.1. Chauffage central	18
I.9. Conclusion.....	19
Chapitre II : Revue de la littérature	20
II.1 Introduction.....	20
Chapitre III : Matériels et méthodes	31
III.1. Introduction.....	31
III.2. Description de la zone d'étude	32
III.3. Etapes de réalisation de notre serre parallèle (canarienne).....	33
III.3.1. Sélection du site	33
III.3.2. Fondation	33
III.3.3. Conception et planification.....	33
III.3.4. Construction et configuration de l'infrastructure	34
III.3.5. Revêtement	34
III.3.6. Construction des côtés	34
III.4. Système de refroidissement (Pad) et ventilation	35
III.5. Acquisition et traitement des données	36
III.5.1. Capteur de température et humidité.....	38
III.5.2. Rayonnement solaire	38
III.5.3. Carte Arduino	39
III.6. Méthodologie	39
III.7. Conclusion	40
Chapitre IV : Résultat et discussion.....	41
IV.1. Introduction	41
IV.2. Conditions météorologiques réelles de fonctionnement.....	42
IV.3. Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	46

Liste des figures

Chapitre I

Figure I- 1:Serre canarienne[11].	6
Figure I- 2: Serre tunnel[12].	7
Figure I- 3:Serre multi-chapelle[12].	8
Figure I- 4:Serre jardin [12].	8
Figure I- 5:Différents types d'ouvertures de serre : (a) événements de toit ; (b) événements de faîte ; (c) événements latéraux.	13
Figure I- 6: Une serre équipée de dispositifs de ventilation forcée à l'Institut des Régions Arides (Kébili, Tunisie).	14
Figure I- 7: Systèmes de refroidissement par ventilateur et tampon pour les serres de l'Institut des régions arides (Kébili, Tunisie)	16
Figure I- 8:Schéma du refroidissement par système d'évaporation du toit. Reproduit avec la permission.	17
Figure I- 9:Schéma de refroidissement par un système de brumisation. Reproduit avec la permission.	17
Figure I- 10:Chaudière centrale (à gauche) et tuyaux de chauffage pour dissiper la chaleur produite (à droite)	18

Chapitre II

Figure II- 1: Tremble de précision haché[45].	22
Figure II- 2:U type fiber[45].	22
Figure II- 3: Bulk charkoal[45].	22
Figure II- 4:Principe de base du refroidissement par évaporation[46].	22
Figure II- 5: (a) Vue latérale et (b) vue d'angle du boîtier de refroidissement par évaporation[46].	22
Figure II- 6: Matériaux des patins de refroidissement (a) coussins en mousse de carbone activée et (b) coussins Luffa[45].	23
Figure II- 7:Schéma d'un photovoltaïque dynamique et ombrage système pour serre dans les climats chauds[46].	24
Figure II- 8: Serre à ventilation naturelle entraînée par pression différence[46].	24
Figure II- 9: Schéma d'un système de refroidissement à ventilateur pour serre[46].	24
Figure II- 10: Schéma d'installation d'un système de buée ou de brumisation dans les serres [47].	24
Figure II- 11: Schéma d'une serre avec évaporateur refroidissement en déplaçant le film d'eau sur une toile d'ombrage externe[46].	24
Figure II- 12: Schéma de principe du système de serre ventilée à ventilateur réparti assisté par déshydratant solaire [46].	24
Figure II- 13: Schéma du système de refroidissement par dessicant liquide à énergie solaire pour les serres dans les climats chauds [46].	25
Figure II- 14: Schéma d'une boucle fermée de serre système souterrain de tunnel aérien [46].	25
Figure II- 15: Schéma d'un système de refroidissement par évaporation indirect-direct et d'un puits géothermique pour les serres dans les climats chauds [46].	25
Figure II- 16: Élément de conception de fonction pour la gestion du microclimat de serre agricole dans les climats chauds[46].	25

Figure II- 17: Schéma de principe du montage expérimental[47].	26
Figure II- 18: Configuration et dimensions complètes du tampon cellulosique modèle Bee-hive utilisé[47].	26
Figure II- 19: (a) Palmier dattier, (b) Fibres de palmier dattier (maille) entourant le tronc et (c) Coussinet en fibres de palmier dattier [49].	27
Figure II- 20: Schéma de la configuration expérimentale du DEC[49].	27
Figure II- 21: Banc d'essai expérimental[51].	29
Figure II- 22: Le pad de cellulose et la configuration du tuyau de distribution d'eau[51].	29
Figure II- 23: Disposition schématique du système (PV/EC) [51].	29
Figure II- 24: Schéma de principe du banc d'essai expérimental[51].	29
Figure II- 25: . Tampon de refroidissement par évaporation[52].	30
Figure II- 26: le montage expérimental[52].	30
Figure II- 27: Ventilateur d'extraction[52].	30
Figure II- 28: Cycle d'eau du refroidissement par évaporation[52].	30

Chapitre III

Figure III. 1:Dimensions identiques des serres	31
Figure III. 2:Serre canarienne sans et avec system de refroidissement (pad)	32
Figure III. 3:Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa	32
Figure III. 4:Plateforme expérimentale d'applications des énergies renouvelables en agriculture	33
Figure III. 5: Conception de nouveau prototype de la serre canarienne	33
Figure III. 6: (A) soudure au poteau, (B) le serrer les câbles et (C)couverture	34
Figure III. 7:Type de couverture	34
Figure III. 8: Ventilation manuelle (cotés	35
Figure III. 9:(A) préparation (pad),(B)system récupération ,(C)pompe,(D) PAD	36
Figure III. 10:ventilateurs à vitesse variable, contrôlés manuellement	36
Figure III. 11: Système d'acquisition des données	36
Figure III. 12:Installation des capteurs est système d'acquisition des données	37
Figure III. 13: Position des capteurs a) thermocouples, b) DHT22	37
Figure III. 14:Capteur DHT22	38
Figure III. 15 Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement:	39
Figure III. 16:Carte Arduino Mega	39
Figure III. 17:Positionnement des thermocouples dans le prototype de la serre développée.	40

Chapitre IV:

Figure IV. 1:conditions météorologiques réelles de fonctionnement du17/05/2023 au 22/05/2023	42
Figure IV. 2:Variation de la température en fonction de temps aux centre des serre canariennes, avec et sans système de refroidissement (PAD) pour une période du 24 Mai au 01 Juin 2023. ...	43
Figure IV. 3:Variation de la température en fonction de temps aux centre des serre canariennes, avec et sans système de refroidissement (PAD) pour une période 3 du 28 mai au 31 mai 2023 ..	44

List des abbreviations

CO₂	Dioxyde de carbone
RH	L'humidité relative
T	Température de l'air
PAR	Rayonnement photo synthétiquement actif
PPFD	Densité de flux de photons photosynthétiques
DES	Refroidissement évaporation directe
RCH	Récupération de chaleur

Introduction générale

Dans les pays de l'Afrique, la période de production des légumes est flexible, car elle dépend principalement du climat local et de facteurs économiques. Ces dernières années, les périodes de production sous serre ont été prolongées. Cela implique une culture pendant l'été, lorsque le rayonnement solaire diurne peut provoquer des augmentations de température nuisibles pour les cultures se développant dans la serre. Cela affecte à la fois le rendement et la qualité des cultures. La production horticole sous serre en Algérie se caractérise par l'utilisation de structures simples à faible coût, avec un contrôle climatique limité. Dans ces serres, la régulation de la température est limitée à la gestion de la ventilation naturelle pour limiter les valeurs extrêmes d'humidité et de température. La ventilation naturelle est la méthode la plus pratique, économique et donc la plus utilisée pour abaisser la température de la serre pendant la journée. La plupart des serres sont équipées de systèmes de ventilation manuels, 90 % d'entre elles possèdent des ouvertures latérales qui s'ouvrent et se ferment grâce à un simple coulissement de film plastique, et 31 % des serres n'ont pas de ventilation au niveau du toit ou disposent d'une ventilation inefficace de type coulissant. De plus, la surface d'ouverture de la ventilation est insuffisante (c'est-à-dire nettement inférieure aux valeurs recommandées dans la littérature de 25 à 30 % de la surface ouverte par rapport à la surface couverte par la serre. L'utilisation générale de moustiquaires à faible porosité sur les ouvertures de la serre pour limiter l'entrée d'insectes tels que *Bemisia tabaci* et *Frankliniella occidentalis* (principalement), qui transmettent des maladies virales, réduit encore plus la surface de ventilation. Ainsi, la ventilation naturelle n'est pas suffisante pour évacuer l'excès d'énergie de la serre pendant les journées ensoleillées de l'été. Les conditions estivales pour les cultures dans ces serres sont loin d'être optimales, notamment en ce qui concerne la température et le déficit de pression de vapeur. Pour cette raison, les cultivateurs utilisent également l'ombrage en blanchissant le toit de la serre pour réduire la quantité de rayonnement pénétrant dans la serre. La combinaison de la « ventilation naturelle et du blanchiment du toit » est la méthode la plus courante utilisée pour refroidir les serres en été. Cependant, le blanchiment du toit est contraignant. Il ne peut pas être enlevé les jours nuageux ; il n'est pas appliqué uniformément, ce qui entraîne des quantités différentes de lumière atteignant les plantes dans différentes parties de la serre. Dans ce travail, nous entreprenons l'installation d'un système de refroidissement par évaporation afin de comparer ses effets avec un système traditionnel, en particulier en ce qui concerne la température et l'humidité. Cette mémoire est structurée de la manière suivante :

Le premier chapitre présente l'historique et les différents types de serres, ainsi que les paramètres à contrôler et les méthodes à utiliser pour obtenir les meilleurs résultats.

Le deuxième chapitre rassemble les travaux précédents sur le développement et l'optimisation des serres, offrant un aperçu des avancées réalisées dans ce domaine.

Le troisième chapitre, intitulé "Matériels et Méthodes", décrit la mise en place d'un nouveau prototype de serre spécifiquement conçu pour cette étude, ainsi que les méthodes utilisées pour sa mise en œuvre.

Le dernier chapitre présente les résultats obtenus et les discussions qui en découlent, mettant en lumière les différences et les avantages du système de refroidissement par évaporation par rapport au système traditionnel.

Enfin, une conclusion générale résume les principales découvertes et perspectives futures.

CHAPITRE I : Généralité sur les serres

I.1 Introduction

L'agriculture protégée est une pratique de plus en plus populaire qui se développe sur tous les continents du monde. Elle englobe une superficie estimée à 5,2 millions d'hectares en 2014. Dans les régions tempérées de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique, les serres recouvertes de films plastiques dans les climats doux, ou de verre ou de plastique rigide dans les climats tempérés et froids, s'étendent sur environ 4,7 millions d'hectares. Dans la région méditerranéenne, la superficie moyenne couverte est d'environ 364 000 hectares, tandis que dans les régions tropicales et subtropicales, elle atteint en moyenne 156 000 hectares [1].

Les régions chaudes et arides sont connues pour leurs étés brûlants, leur ensoleillement intense et leurs températures élevées. Dans ces régions, l'agriculture protégée joue un rôle important dans l'économie locale. Cependant, il est important de noter que le secteur des serres, qui fait partie de cette pratique agricole, nécessite des besoins énergétiques importants, principalement basés sur les combustibles fossiles. De plus, il est également un grand consommateur d'eau, en particulier lors de l'utilisation de méthodes de refroidissement par évaporation. Par conséquent, les contraintes croissantes sur les sources d'énergies conventionnelles, l'épuisement des réserves d'eau souterraine et l'augmentation de la salinité de l'eau souterraine soulignent la vulnérabilité de ce secteur économique.

Un refroidissement efficace des serres est nécessaire pendant les saisons chaudes pour maintenir une température interne propice à la croissance des cultures. C'est pourquoi des systèmes de refroidissement traditionnels ont été adoptés dans les régions aux conditions climatiques difficiles et variables, ce qui a amélioré les paramètres climatiques des serres. Néanmoins, les processus de refroidissement traditionnels, qui impliquent la ventilation naturelle et les techniques de refroidissement passif, étaient difficiles à contrôler, et aucune condition climatique idéale n'était garantie pour les cultures, ce qui a empêché la culture de nombreuses cultures, en particulier celles qui ne résistaient pas aux températures élevées [2, 3].

La gestion des conditions environnementales dans les serres, connue sous le nom de contrôle climatique, implique la régulation de paramètres clés pour répondre aux besoins spécifiques de croissance des cultures dans différents climats. Cela permet aux agriculteurs d'améliorer la qualité des cultures et d'augmenter les rendements. Ces dernières années, des efforts de recherche importants ont été consacrés au contrôle climatique des serres, en utilisant des technologies informatiques et du matériel de contrôle, tels que des capteurs, des contrôleurs et des actionneurs.

Ces outils permettent la surveillance et le contrôle de la température, de l'humidité relative, du rayonnement solaire et des niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) [4].

Les procédures de refroidissement et de chauffage, conçues pour maintenir l'environnement de la serre dans un état optimal pour la culture des plantes, représentent la plus grande part de la consommation d'énergie, allant d'environ 65% à 85% [5].

La consommation d'énergie pour le refroidissement dans la région méditerranéenne est estimée à environ 100 000 kWh/ha par an. Cependant, il n'existe pas de données numériques spécifiques disponibles concernant la consommation d'énergie dans les régions chaudes dans la littérature existante. Néanmoins, il est certain que la consommation d'énergie dans les pays chauds est considérablement plus élevée [1].

I.2. Historique, définition et objectif de la plasticulture

La plasticulture n'est directement associée à aucune discipline scientifique spécifique, bien qu'elle soit liée à plusieurs domaines, tels que la science des polymères, ainsi que toutes les sciences liées à la production agricole, comme la climatologie, l'hydraulique, la physiologie végétale, etc. [6].

La plasticulture regroupe différentes techniques qui utilisent des matériaux plastiques dans les domaines de l'agriculture et de l'horticulture. Ces techniques sont apparues dans les années soixante [7].

La plasticulture a généré de nombreux changements et offre de multiples applications. Les matériaux plastiques sont utilisés dans la construction d'abris tels que les bergeries et les poulaillers, ainsi que dans la fabrication de serres, de filets d'ombrage, de systèmes de drainage, de rampes perforées, de filets de protection. Ils sont également utilisés pour le paillage, l'emballage, le conditionnement, ainsi que la protection des récoltes et du matériel agricole [8].

La plasticulture vise à contribuer à l'"artificialisation" des conditions de production agricole, c'est-à-dire à modifier certaines caractéristiques de l'environnement (sol, climat) afin d'améliorer les rendements et la qualité des produits [6].

I.2.1. Situation de la plasticulture

I.2.1.1. Dans le monde

La plasticulture a été introduite au Japon au 18^{ème} siècle avec une superficie limitée, puis elle s'est répandue dans le monde entier. Les serres sont plus visibles et permanentes que les petits tunnels, et chaque année, le nombre de serres plastiques augmente. On observe une évolution

positive quantitative entre les années 80 et 90. La plasticulture a trouvé un écho favorable dans le monde de l'agriculture, ce qui a incité les pays à augmenter leurs surfaces cultivées.

Le Japon est le premier utilisateur d'abris plastiques avec une superficie de 34 200 hectares et un taux de croissance de 106,87 %. Il est suivi par l'Italie avec 16 290 hectares et un taux de croissance de 109,32 %, et l'Espagne avec 15 000 hectares et un taux de croissance de 136,36 %. Même les tunnels ont montré une reprise notable, probablement en raison des difficultés de financement et des investissements agricoles. Le Japon conserve toujours la première position avec 58 000 hectares et un taux de croissance de 105,45 %, suivi de la France avec 19 000 hectares et un taux de croissance de 158,33 %, et de l'Italie avec 14 000 hectares et un taux de croissance de 140 %.

Entre 1983 et 1996, les statistiques montrent que les concentrations les plus importantes se trouvent au Japon (47 000 ha), en Chine (34 000 ha), en Espagne (28 000 ha), en Italie (22 300 ha), en Corée (22 000 ha), mais on trouve également des surfaces significatives de serres plastiques partout, avec des constructions souvent récentes : Turquie (8 250 ha), Maroc (8 500 ha), Colombie (2 600 ha), Portugal (2 000 ha), Pologne (2 000 ha), Jordanie (1 700 ha), Arabie Saoudite (1 540 ha), Tunisie (1 200 ha), Égypte (1 000 ha).

En résumant toutes les données disponibles, la superficie totale atteint facilement 220 000 ha.

Dans la plupart des cas, les structures sont simples, bon marché et dépourvues de climatisation.

Elles fonctionnent correctement uniquement lorsque la température n'est ni trop froide ni trop chaude, ce qui limite leur productivité. Cependant, de nombreux exploitants de serres ont du mal à obtenir les fonds nécessaires pour moderniser leurs installations, ce qui constitue un problème majeur dans la région méditerranéenne.

En ce qui concerne les matériaux de couverture, des progrès continus ont été réalisés, notamment avec les films multicouches. Les matériaux semi-rigides s'améliorent également, comme en témoigne la nouvelle plaque PMMA double paroi traitée antibuée, qui offre une transmission lumineuse équivalente à celle du verre simple tout en réalisant une économie d'énergie de 40 %.

I.2.1.2. En Algérie

En Algérie, l'introduction des abris en plastique a eu lieu lors de la campagne agricole 1969/1970 grâce au projet FAO de 1969. Initialement, ces abris ont été utilisés sur des superficies

limitées dans le but de répondre aux besoins de consommation locale et de faire face à la concurrence étrangère. [9]

I.2.1.3. En Ghardaïa

Le développement du maraîchage sous serre et l'extension de la superficie arboricole fruitière sont les principaux axes du plan d'action arrêté dans la wilaya de Ghardaïa pour développer l'agriculture.

I.2.2. Types de serres agricoles

La classification des serres peut être complexe et difficile, souvent basée sur les différentes formes des structures porteuses qui composent l'assemblage. On distingue généralement deux principaux types de serres appartenant à deux grandes familles : les serres tunnels et les serres chapelles [10].

I.2.2.1. Serre canarienne

La serre canarienne est un ensemble de tresses et de câbles. Au départ, elle sert de serre était destinée à des serres de taille moyenne et petite, mais il est désormais employé pour des serres qui couvrent plusieurs hectares en raison de la stabilité à long terme et de sa résistance aux vents et aux conditions climatiques extérieures sèches et venteuses [11].



Figure I- 1:Serre canarienne[11].

Inconvénients

- Le déplacement des serres est difficile.
- L'installation des serres est coûteuse.
- Les maladies peuvent se propager plus facilement dans les serres [11].

Avantages

Les serres canariennes offrent de nombreux avantages en termes de productivité :

- Elles s'adaptent facilement aux terrains disponibles.

- Les opérations agricoles telles que le labour, le nivellement, la fertilisation et le traitement phytosanitaire sont facilitées.
- Elles permettent une exploitation optimale de l'espace disponible.
- Elles réduisent le temps et les coûts liés aux opérations agricoles.
- Le contrôle des réseaux d'irrigation est facilité.
- L'utilisation de matériaux "insecte-proof" permet de réduire l'humidité à l'intérieur de la serre.

I.2.2.2. Serres tunnel

Une serre tunnel est composée de plusieurs arceaux métalliques de grande taille, recouverts d'un film souple en plastique transparent, ce qui lui confère une forme de tunnel. Les dimensions de la serre varient en fonction des besoins du jardinier. [12]



Figure I- 2: Serre tunnel[12].

- Caractéristique des serres tunnel

- La hauteur de la serre tunnel est généralement comprise entre 2 et 2,50 mètres.
- La largeur se situe généralement entre 3 et 5 mètres.
- La surface au sol minimale recommandée est de 6 m².
- L'ajout d'une deuxième porte est nécessaire lorsque la longueur de la serre tunnel dépasse les 6 mètres.

I.2.2.3. Serres multi-chapelle

Les composants de la structure de la gamme à serres Multi chapelle sont conçus de manière à s'assembler parfaitement grâce à des joints vissés. Cette méthode de montage simplifie l'assemblage tout en absorbant efficacement les différentes forces qui affectent la structure. Ces serres sont très appréciées pour leur robustesse et leur grande capacité à s'adapter aux dimensions et aux caractéristiques du terrain [12].



Figure I- 3:Serre multi-chapelle[12].

- **Caractéristique des serres multi-chapelle**

- Les serres sont revêtues de divers matériaux tels que du film plastique, des plaques semi-rigides ou des plaques rigides.
- Les éléments en aluminium et les profils d'ancrage sont utilisés dans leur construction.
- Les serres offrent un volume intérieur spacieux.
- De plus, l'inclinaison des arceaux est conçue de manière à optimiser l'utilisation des rayons solaires, permettant ainsi d'en tirer le meilleur parti.

I.2.2.4. Serre de jardin

Il s'agit d'un modèle de serre de petite taille, idéal pour la croissance des plantes, la protection hivernale, la récolte de fruits et légumes tout au long de l'année ou la réalisation de semis sous abri. Une serre peut être construite avec différents matériaux et adopter différentes formes, même en utilisant des matériaux de récupération [12].



Figure I- 4:Serre jardin [12]

- **Caractéristique d'une serre de jardin [13].**

- 1) Les matériaux fréquemment utilisés pour l'armature de la serre :
 - Les structures en aluminium.
 - Les structures en acier.

- Les structures en bois.
- 2) Les matériaux fréquemment utilisés pour les panneaux de la serre :
 - Le verre horticole.
 - Le verre trempé.
 - Le polycarbonate alvéolaire.

- **Contrôle de l'exploitation de la serre**

La gestion climatique de l'environnement de la serre dépend de nombreux paramètres tels que le rayonnement solaire, la température de l'air (T), l'humidité relative (RH) et la concentration de dioxyde de carbone (CO₂). En contrôlant et en régulant ces paramètres, il est possible d'obtenir des conditions de croissance optimales pour la culture, ainsi que des économies d'énergie précieuses et une régulation de l'utilisation de l'eau. Cependant, l'interaction des paramètres qui s'influencent mutuellement et leur dépendance vis-à-vis du climat ambiant changeant rendent la surveillance et le contrôle climatique complexes. Par exemple, l'humidité relative dépend de la quantité d'humidité continuellement libérée par les plantes, de l'évaporation du sol ainsi que de la température, qui dépend à son tour du rayonnement solaire et des conditions météorologiques. Ainsi, la surveillance de tels paramètres constitue un véritable défi dans le contrôle climatique des serres.

I.3. Paramètres de contrôle

I.3.1. Température

La température et l'humidité relative sont des paramètres interdépendants qui devraient être contrôlés simultanément. Ces deux paramètres influencent fortement la croissance des cultures. Le rôle principal de la température est d'assurer l'expansion des feuilles des cultures à un jeune âge. Les jeunes cultures sont davantage affectées par la chaleur, car la surface foliaire et le développement des racines sont insuffisants pour une évaporation élevée en réaction au stress thermique. Avec un système de croissance continue et en utilisant la présence permanente de cultures matures et plus jeunes, ce problème pourrait être résolu. Une humidité accrue dans les serres fermées peut soulager le problème de l'évaporation pour les racines insuffisantes des jeunes cultures, Selon Nelson [14].

La croissance saine de la plupart des plantes est observée pour des températures comprises entre 10 et 24 °C, et la croissance idéale des plantes en serre est observée pour des températures variant entre 15 et 30 °C [15].

I.3.2. Humidité

Le contrôle de l'humidité relative à l'intérieur de la serre est vital pour maintenir un climat optimal pour la croissance des cultures, en particulier dans les serres fermées, où la vapeur d'eau doit être éliminée par des processus de condensation ou d'absorption afin de maintenir des

conditions saines. Il s'agit du paramètre climatique considéré comme le plus complexe à contrôler. L'humidité relative influence également la température intérieure de l'air, car l'évaporation auto-rafraîchissante de la végétation dépend du déficit de pression de vapeur dans l'air. Amani et al. [4] ont constaté que l'humidité relative optimale à l'intérieur de la serre devrait se situer entre 60 et 80 %.

Vadier et Martin [16] ont analysé l'influence du taux d'humidité sur la croissance des cultures. Un taux d'humidité relative plus bas inhibe la croissance des cultures, provoque un stress hydrique chez les plantes et réduit la longueur des tiges et la taille des feuilles. Dans les climats avec des niveaux élevés d'humidité, la condensation de la vapeur sur la couverture de la serre augmente et la diminution de la condensation entraîne une réduction de la transmittance du rayonnement incident normal des matériaux de couverture, qui atteint 23 %.

I.3.3. Concentration de dioxyde de carbone

L'enrichissement en CO₂ dans la serre est un paramètre crucial car il a un effet positif sur la croissance des cultures, à condition que d'autres facteurs de croissance, tels que l'approvisionnement en eau, l'apport en nutriments et surtout l'exposition au soleil, soient suffisamment satisfaits. Un meilleur contrôle de la concentration de CO₂ requise est bénéfique pour augmenter les taux de croissance des cultures et améliorer la qualité de la production [17, 18]. Des quantités adéquates de CO₂ doivent être fournies aux cultures de la serre pour compenser la forte réduction du CO₂ par la photosynthèse, en particulier lorsque de bonnes mesures de ventilation font défaut. Les avantages de l'enrichissement en CO₂ se reflètent principalement dans une production de cultures supérieure grâce à l'amélioration de la photosynthèse. Kirschbaum [17] affirme que, sous des concentrations élevées de CO₂, l'augmentation du taux de photosynthèse peut dépasser 50 % par rapport aux plantes cultivées dans des conditions normales de CO₂. Drake et al. [19] ont prouvé, à travers 60 expériences réalisées sous un enrichissement en CO₂ d'environ 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, que l'augmentation de la photosynthèse chez les plantes atteint 58 % par rapport aux plantes dans des conditions ambiantes.

I.3.4. Radiation solaire

Le rayonnement solaire est le premier et principal paramètre climatique pour évaluer la convenance d'une région à la culture protégée [20]. Le rayonnement solaire direct intercepté dans la serre est la première source de gain de chaleur, et il contribue le plus à l'augmentation de la température diurne de l'environnement de culture protégée. De plus, d'importantes quantités de rayonnement solaire sont interceptées et stockées dans le sol pour être libérées pendant la nuit [1]. À l'intérieur des serres dans les climats secs, le rayonnement solaire passant à côté de la surface foliaire est directement transformé en chaleur sensible et réchauffe l'air environnant le sol. Le

rayonnement solaire intercepté est également la force motrice du processus de photosynthèse. Il exploite l'énergie du rayonnement solaire et la transforme en énergie chimique nécessaire au métabolisme, à la croissance et au développement des plantes. La partie du rayonnement électromagnétique qui peut être utilisée comme source d'énergie pour la photosynthèse par les plantes vertes est le rayonnement photo synthétiquement actif (PAR). Il est exprimé soit en termes de densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) ($\text{mmol de photons, m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), soit en termes de rayonnement photo synthétiquement actif (PAR) ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ou W/m^2) [21].

I.4. Méthodes de contrôle du climat des serres

La régulation climatique dans la serre est principalement utilisée pour garantir des conditions environnementales optimales pour la croissance des cultures et minimiser la consommation d'eau et d'énergie. Il existe différents types de systèmes de contrôle (manuel, automatique ou intelligent), où la serre est équipée de la surveillance des données Internet [22, 23]. Le matériel du système de contrôle comprend des capteurs, des contrôleurs et des actionneurs. Les paramètres contrôlés, à savoir la température, l'humidité relative, la concentration en CO_2 et le débit d'air, sont mesurés par plusieurs capteurs placés à l'intérieur et à l'extérieur de la serre à différentes positions, y compris au niveau de la plantation, ainsi qu'au niveau des entrées et des sorties des composants de contrôle. Les composants de contrôle sont principalement les systèmes de refroidissement, de chauffage et de ventilation, ainsi que les systèmes d'ombrage et de brumisation. Des études détaillées ont été menées pour étudier les caractéristiques de couplage entre les paramètres environnementaux, et elles montrent que, pour améliorer la précision de la stratégie de contrôle des serres à faible consommation d'énergie, il est nécessaire d'étudier le couplage multiparamétrique [22, 24].

Plusieurs algorithmes de contrôle et modèles numériques ont été réalisés pour simuler la complexité du contrôle de l'environnement de la serre. La précision de ces modèles garantit la gestion du contrôle et réduit la consommation d'énergie tout en offrant un environnement agréable pour les plantes. Beveren et al. [25] ont constaté qu'en utilisant la méthode de contrôle optimale, la consommation d'énergie de refroidissement et l'injection de CO_2 pouvaient être réduites jusqu'à 15 % et 10 % respectivement.

I.4.1. Systèmes de refroidissement dans les serres

Le contrôle de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la serre est assuré par différentes technologies de refroidissement, telles que la ventilation, les systèmes de refroidissement externes utilisant des échangeurs de chaleur, ainsi que les systèmes d'évaporation et de dessiccation. Les processus de refroidissement peuvent être classés en deux catégories

principales : les systèmes "passif" et les systèmes "actif". Le refroidissement "passif" dans la serre fait principalement référence à l'approche de conception (forme, matériaux de couverture, ouvertures, refroidissement passif nocturne du sol) visant à réduire la température à l'intérieur de la serre sans consommation d'eau ou d'énergie supplémentaire. Le refroidissement "actif" englobe tous les systèmes de refroidissement utilisant des équipements électriques tels que des pompes, des ventilateurs et des pompes à chaleur. L'intégration de techniques de refroidissement passif suivie d'un refroidissement actif pourrait simultanément garantir des conditions adéquates pour la croissance des cultures et une réduction de la consommation d'énergie.

I.4.2. Systèmes de refroidissement passifs :

Plusieurs caractéristiques de conception contribuent fortement à la réduction des besoins en refroidissement, notamment la forme et la géométrie de la serre, son emplacement et son orientation, le matériau de couverture et la disposition des ouvertures. Selon Choab et al. [26] et Sethi [27], indépendamment de l'emplacement considéré, la forme Quonset correspond à des valeurs minimales de température et de captation solaire, contrairement à la forme à travées inégales, qui permet une capture solaire maximale ainsi que des enregistrements de chaleur élevés. En ce qui concerne l'orientation, il est conclu dans de nombreuses études comparatives que l'orientation Est-Ouest est plus pratique à toutes les latitudes, sauf près de l'équateur, où l'été est moins ensoleillé que l'hiver.

I.4.3. Système de ventilation

Les systèmes de ventilation sont couramment utilisés pour maintenir un environnement adéquat à l'intérieur de la serre, en particulier pour la déshumidification de l'air et la baisse de la température. Deux types des systèmes de ventilation sont utilisés dans les serres : la ventilation naturelle et la ventilation forcée. La ventilation naturelle est principalement réalisée par le toit ou les ouvertures latérales, sans aucune intervention externe. Par conséquent, c'est la technique de ventilation la plus simple et la plus économique pour contrôler l'humidité et la température. Cependant, dans les environnements de serre avec des niveaux élevés d'humidité, dans certaines conditions, une ventilation forcée est nécessaire et peut être réalisée à l'aide de ventilateurs.

I.4.3.1. Ventilation Naturelle

La ventilation naturelle à l'intérieur de la serre est induite par le vent et la flottabilité interne créée par le gradient de densité de l'air. Le gradient de densité de l'air est créé en augmentant la température et l'humidité. La ventilation naturelle peut être considérée comme un système de refroidissement passif car elle est basée sur une conception de serre qui ne fait pas appel à

l'utilisation d'équipements. De nombreux travaux ont été réalisés sur les systèmes de ventilation naturelle des serres, qui sont contrôlés par les ouvertures des fenêtres au niveau des parois latérales et du toit [28, 29]. Les chercheurs ont constaté que le climat des serres est fortement influencé par le taux d'échange d'air par convection naturelle, qui dépend principalement de la surface des ouvertures. Par conséquent, la surface totale des événements devrait représenter de 15 à 30% de la surface au sol [28], avec différents types d'ouvertures simultanément (latérales, crête, toit), plutôt qu'un seul type d'événement Figure I-5.



Figure I- 5: Différents types d'ouvertures de serre : (a) événements de toit ; (b) événements de faîte ; (c) événements latéraux.

I.4.3.2. Ventilation forcée

La ventilation forcée est assurée par des ventilateurs ou des aérateurs utilisés pour l'évacuation de la chaleur et le contrôle de l'humidité relative Figure I-6. Selon A. Santosh et al. [30], maintenir un débit de ventilation adéquat est également essentiel pour éviter une distribution inégale de CO₂ pour égaliser la température à l'intérieur de la serre avec celle de l'extérieur. La ventilation forcée peut assurer une distribution d'air homogène à l'intérieur de la serre mieux que la ventilation naturelle [31]. Elle est couramment utilisée pendant les journées estivales dans les régions chaudes pour déshumidifier et refroidir la serre. La ventilation forcée garantit le contrôle de l'environnement intérieur pour éviter la surchauffe dans les environnements de culture sous serre, et elle peut remplacer d'autres systèmes de refroidissement courants, tels que les ventilateurs et les systèmes à tampons, ou contribuer à réduire leur consommation d'énergie [32, 33]



Figure I- 6: Une serre équipée de dispositifs de ventilation forcée à des Régions Arides (Kébili, Tunisie).

I.5. Échangeurs de chaleur

Le transfert de chaleur est l'un des processus moteurs les plus influents des systèmes de refroidissement dans les serres, notamment dans les climats chauds, où le flux de chaleur reçu par la serre est très important. Dans les systèmes de refroidissement, le transfert de chaleur se produit entre l'air intérieur de la serre et un second fluide à une température plus basse, qui constitue la source froide de l'échange. Il peut s'agir non seulement de l'air ambiant, mais également d'eau de refroidissement, par exemple, provenant des profondeurs de l'océan ou d'eau refroidie par un système de refroidissement externe.

I.5.1. Échangeurs de chaleur air-liquide

Les systèmes de refroidissement qui utilisent des échangeurs de chaleur air-liquide utilisent généralement de l'eau froide comme fluide de refroidissement, telle que l'eau de mer ou de l'eau refroidie circulant à partir d'un système de compression, d'une machine à absorption ou d'un stockage à froid jour-nuit. Plusieurs études théoriques et expérimentales ont été menées pour étudier les différents milieux de refroidissement et leurs limites opérationnelles. Par exemple, en Inde, Sethi et Sharma [34, 35] ont réalisé une expérience sur un système de refroidissement et de chauffage utilisant l'eau de l'aquifère à 24°C comme fluide de transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur air-liquide afin d'assurer le chauffage de la serre pendant les nuits d'hiver et le refroidissement pendant les journées d'été. L'aquifère couplé au système d'échangeur de chaleur à flux de cavité a maintenu avec succès la température de l'air de la serre entre 7 et 9°C au-dessus de la température extérieure pendant les nuits d'hiver, et entre 6 et 7°C en dessous de la température extérieure pendant les journées d'été extrêmes. L'humidité relative a également diminué de 10 à

12% en hiver, et elle était en moyenne de 60% pendant les journées d'été extrêmes, alors qu'elle était d'environ 25% à l'extérieur.

Albright et Behler [36] ont modélisé et réalisé une expérience sur deux échangeurs de chaleur air-liquide qui étaient assemblés en tant qu'échangeur de chaleur air-liquide-air dans une serre de 240 m² aux États-Unis. Le liquide expérimenté était un mélange de 50% d'eau et d'un liquide antigel automobile courant, avec une chaleur spécifique de 3140 J/kg K. Les valeurs d'efficacité de l'échangeur de chaleur obtenues variaient entre 0,4 et 0,5.

I.5.2. Échangeurs de chaleur air-air

Un échangeur de chaleur air-air est reconnu comme un système de récupération de chaleur (RCH) et constitue une technique alternative au mécanisme de condensation, préférablement utilisée dans les climats froids ou tempérés. De nombreuses études ont démontré que les RCH sont une technique efficace pour la déshumidification de la serre, notamment pendant les périodes froides. De plus, le processus d'échange de chaleur air-air est particulièrement utile dans les serres fermées, où l'énergie à l'intérieur de la serre est extraite et remplacée par l'air frais entrant. Les échangeurs de chaleur air-air sont généralement constitués de plaques en plastique ou métalliques, et ils fonctionnent soit en écoulement croisé, soit en contre-courant. De plus, la circulation de l'air et la turbulence nécessitent une ventilation supplémentaire, notamment dans des conditions sans vent. Ainsi, ce processus de refroidissement entraîne des coûts liés à l'échangeur de chaleur, ainsi qu'à l'équipement de ventilation et aux coûts énergétiques associés [37].

Un échangeur de chaleur air-air rotatif, modélisé par Maslak et Nimmermark [38] dans le but de déshumidifier les serres, présente une efficacité d'environ 70%. Ils ont constaté que, comparé à la ventilation naturelle, ce processus permet de réduire jusqu'à 17% de la consommation d'énergie globale. Ainsi, l'échangeur de chaleur air-air est un moyen efficace de maintenir un climat confortable dans les serres, qu'il fasse chaud ou froid. Cet échangeur pourrait également être couplé à un autre processus de refroidissement pour couvrir les coûts et obtenir des résultats précieux.

I.6. Refroidissement par évaporation

Les systèmes de refroidissement par évaporation, qui se basent sur la conversion de la chaleur sensible en chaleur latente par évaporation de l'eau, sont couramment utilisés pour maintenir un climat confortable favorisant la croissance des cultures dans les zones chaudes et sèches. Il existe de nombreux types de systèmes de refroidissement par évaporation utilisés pour refroidir les serres, tels que les systèmes de ventilation à ventilateur et tapis, les systèmes de brumisation et les systèmes de refroidissement par évaporation du toit. Selon Ganguly et al. [39],

l'intégration d'un système de refroidissement par évaporation avec des ventilations naturelles et forcées, des ombrages et la déshumidification, offre un climat favorable pour de meilleurs rendements des cultures. Ghani et al. [40] confirment que le refroidissement par évaporation couplé à des dispositifs de ventilation (ventilateurs, ouvertures de toit) est plus efficace pour le contrôle climatique dans les serres dans les climats chauds[41].

I.6.1. Système de refroidissement par évaporation (PAD)

Le système de refroidissement par évaporation à ventilateur et tapis est considéré comme une méthode efficace de contrôle et de refroidissement pour les climats de serre où la température dépasse 40°C. Son principe consiste à placer un tapis humide et des ventilateurs à des positions opposées dans la serre Figure I-7. L'évaporation de l'eau à travers le matériau du tapis humide entraîne une baisse de la température et une humidification de l'air à l'intérieur de la serre [40]. Il existe deux types de systèmes de refroidissement par évaporation : direct et indirect. En effet, un effet de refroidissement par évaporation directe est obtenu grâce à un échangeur de chaleur eau-air à écoulement croisé. L'air ventilé par les ventilateurs circule à travers un matériau poreux et la surface est humidifiée par une goutte d'eau pompée verticalement via une pompe hydraulique. Cependant, le refroidisseur évaporatif indirect est un échangeur de chaleur qui abaisse la température tout en maintenant un niveau d'humidité constant.



Figure I-7: Système de refroidissement par évaporation PAD (Kébili, Tunisie)

I.6.2. Systèmes d'évaporation de toit

Le refroidissement évaporatif du toit est réalisé en faisant circuler un film mince d'eau sur toute la surface du toit de la serre Figure I-8.[42] L'énergie thermique solaire, qui est absorbée par la surface externe, est ainsi réduite, ce qui permet de refroidir le toit et l'air ambiant sous le toit. En conséquence, les températures de l'air baissent et l'humidité augmente à l'intérieur de la serre.

Par conséquent, ce système fonctionne avec une grande efficacité dans des conditions chaudes et sèches.

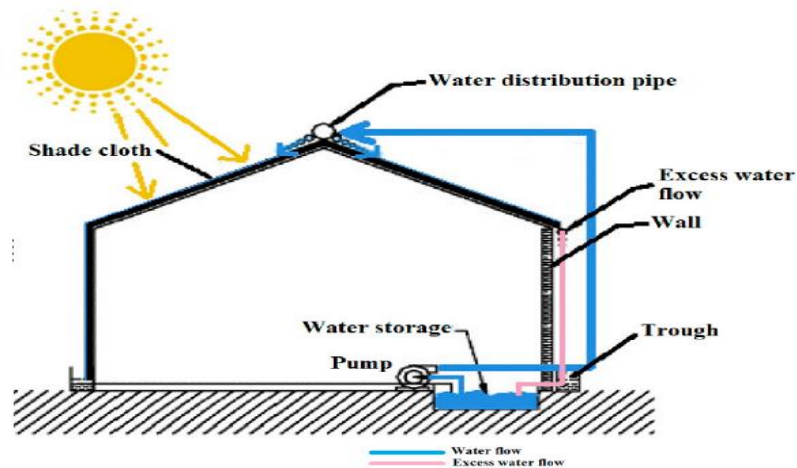


Figure I- 8:Schéma du refroidissement par système d'évaporation du toit. Reproduit avec la permission

I.6.3. Systèmes de brumisation

La brumisation est une méthode de refroidissement simple et couramment utilisée, principalement dans les serres commerciales. Ce système procure un refroidissement en humidifiant l'air ambiant à l'intérieur de la serre qui doit être conditionné, en pressurisant et en pulvérisant de l'eau à travers de petites buses situées dans le tuyau de brumisation installé en hauteur dans la serre Figure I-9 [42] Les systèmes de brumisation sont généralement utilisés en complément du processus de refroidissement principal, notamment pendant la saison estivale, et ils donnent de meilleurs résultats dans des conditions climatiques chaudes et sèches [42].



Figure I- 9: système refroidissement par un brumisation. Reproduit avec la permission

I.7. Chauffage

Le chauffage des serres est essentiel même dans les pays au climat tempéré, comme la région méditerranéenne, afin de maximiser la production de cultures en termes de quantité et de qualité, et ainsi d'augmenter l'efficacité globale. Les coûts de chauffage sont non seulement

directement liés à la rentabilité, mais à long terme, ils peuvent déterminer la survie de l'industrie des serres. En plus des coûts de consommation énergétique élevée, le chauffage est associé à des problèmes environnementaux dus aux émissions de gaz nocifs.

I.8. Systèmes de chauffage

Le système de chauffage doit fournir de la chaleur à la serre au même rythme qu'elle est perdue. Il existe plusieurs types populaires de systèmes de chauffage pour les serres. Le plus courant et le moins cher est le système de chauffage par unité.

I.8.1. Chauffages par unité

De l'air chaud est soufflé à partir de chauffages par unité dotés de foyers autonomes. Les chauffages sont répartis dans toute la serre, chacun chauffant une surface de sol de 180 à 500 m².

I.8.1. Chauffage central

Le vapeur ou l'eau chaude est produite, ainsi qu'un mécanisme de rayonnement dans la serre pour dissiper la chaleur **Figure I-10**.



Figure I- 10:Chaudière centrale (à gauche) et tuyaux de chauffage pour dissiper la chaleur produite (à droite)

I.9. Conclusion

En conclusion, le choix du type de serre dépend de divers facteurs, notamment le climat, les ressources disponibles, le budget et les objectifs agricoles. Les serres traditionnelles offrent un contrôle complet mais nécessitent plus d'investissement, tandis que les serres à tunnel élevé sont des options rentables pour l'extension saisonnière. Les serres offrent des pratiques agricoles durables, les serres solaires privilégient l'efficacité énergétique et les serres verticales maximisent l'utilisation de l'espace. L'évaluation de ces facteurs aidera à déterminer le type de serre le plus approprié pour les besoins agricoles spécifiques.

Chapitre II : Revue de la littérature

II.1 Introduction

Les serres jouent un rôle crucial dans l'agriculture moderne en fournissant des environnements contrôlés pour une croissance optimale des plantes. Pour maintenir des conditions favorables au sein de ces structures, diverses techniques de refroidissement sont employées, parmi lesquelles le refroidissement par évaporation est largement utilisé. Les tampons (PAD) de refroidissement par évaporation, également appelés tampons humides ou parois humides, font partie intégrante de ce système de refroidissement. Traditionnellement, les coussins de refroidissement par évaporation ont été construits à l'aide de matériaux synthétiques tels que les fibres de palmier, la cellulose ou les fibres synthétiques. Cependant, il existe un intérêt croissant pour l'exploration de matériaux naturels alternatifs offrant des performances comparables, voire améliorées. Ces matériaux naturels fournissent non seulement un refroidissement efficace, mais offrent également des avantages tels que la durabilité, le respect de l'environnement et la rentabilité. L'utilisation de matériaux naturels dans les coussins de refroidissement par évaporation offre un grand potentiel pour améliorer l'efficacité et la durabilité environnementale des opérations de serre. La littérature fournit des informations précieuses sur l'utilisation de différents matériaux naturels dans les coussins de refroidissement par évaporation et leur impact sur l'efficacité du refroidissement, la capacité de rétention d'eau, la durabilité et les performances globales. Dans ce chapitre de revue de la littérature, nous approfondirons les recherches et études existantes axées sur divers matériaux naturels utilisés dans les coussins de refroidissement par évaporation pour les serres. Nous explorerons les propriétés, les avantages et les limites de ces matériaux, en mettant en lumière leur aptitude à améliorer l'efficacité de refroidissement des serres. En examinant les résultats et les méthodologies des études précédentes, nous visons à acquérir une compréhension globale des différents matériaux naturels utilisés dans les coussins de refroidissement par évaporation. Ces connaissances contribueront à identifier les matériaux les plus prometteurs et à éclairer les orientations futures de la recherche. De plus, cette revue de la littérature fournira une base solide pour nos propres recherches, nous permettant de proposer des approches et des stratégies innovantes pour optimiser les performances de refroidissement des serres utilisant des matériaux naturels. Dans l'ensemble, cette revue de la littérature constituera une ressource précieuse pour les chercheurs, les praticiens et les parties prenantes dans le domaine de la technologie des serres, offrant un aperçu complet de l'état actuel des connaissances concernant les matériaux naturels pour les coussins (PAD) de refroidissement par évaporation.

Egbal Mohammed Ahmed et al., (2011) Ont évalué les performances de trois types différents de tampons d'évaporation locale pour les serres au Soudan, à savoir les tampons en celdek, les tampons en paille et les tampons en bois tranché, par rapport aux conditions extérieures des serres. L'évaluation comprenait des paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité relative à 8h, 13h et 18h, ainsi que des paramètres de culture tels que la longueur et le diamètre de la tige, le nombre et la largeur des feuilles, la longueur et le diamètre des fruits, le poids et la matière sèche des fruits, et le rendement. Les chercheurs ont constaté qu'il n'y avait aucune différence significative de température à 8h à l'intérieur des serres, mais qu'il y avait une différence significative élevée entre les conditions intérieures et extérieures. Des différences significatives ont été observées à 13h et 18h entre tous les traitements et les conditions extérieures. L'humidité relative a montré des différences significatives élevées à 8h et 13h à l'intérieur des serres et entre les conditions intérieures et extérieures, respectivement, mais aucune différence significative n'a été trouvée à 18h. L'étude a également révélé des différences significatives dans tous les paramètres de culture à l'intérieur et à l'extérieur des serres. Les résultats indiquent que les tampons en bois tranché sont meilleurs que les autres tampons d'évaporation évalués dans cette étude [43].

Ahmad Kouchakzadeh et al., (2013) Ont évalué le potentiel d'utilisation du charbon en vrac en tant que matériau alternatif pour les tampons d'évaporation dans les serres. Pour ce faire, les chercheurs ont conçu une configuration d'essai pour évaluer les performances du tampon de charbon. L'efficacité de refroidissement et la différence d'humidité relative ont été mesurées en faisant varier la densité en vrac du charbon, la vitesse de l'air et le débit d'eau. Les résultats ont montré que la meilleure efficacité de refroidissement moyenne a été obtenue avec une densité en vrac de 209,58 kg m⁻³, une vitesse de l'air de 1,38 m s⁻¹ et un débit d'eau de 0,19 kg s⁻¹ pour chaque mètre carré de tampon. Ces résultats suggèrent que le charbon en vrac présente un potentiel en tant que matériau viable pour une utilisation dans les tampons d'évaporation des serres [44].

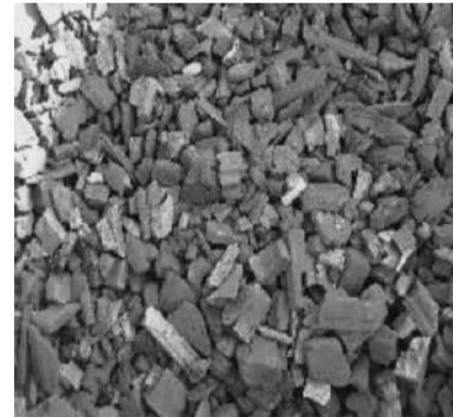
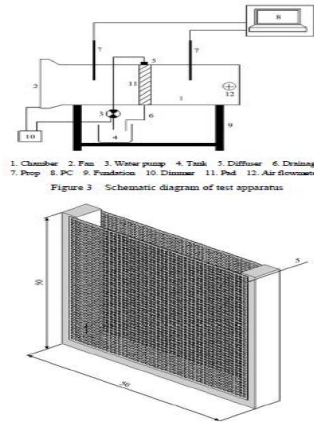


Figure II- 1: Tremble de précision haché[45].

Figure II- 2: Type fiber [45].

Figure II- 3: Bulk charkoal [45].

Radhiyah Abd et al., (2018) Ont comparé l'efficacité de refroidissement de différents matériaux à base naturelle utilisés comme tampons de refroidissement pour un système de refroidissement par évaporation. Plus précisément, l'étude examinait l'efficacité de refroidissement de la mousse de carbone activé et du tampon de luffa dans le tampon de refroidissement, car ces matériaux jouent un rôle vital dans l'efficacité du système de refroidissement par évaporation directe. Pour mener l'étude, les chercheurs ont fabriqué les deux types de tampons de refroidissement pour les adapter à la configuration de refroidissement par évaporation, et ont fait varier le matériau du tampon de refroidissement et le débit d'air pour observer leur effet sur l'efficacité de refroidissement. Les résultats ont montré que le tampon de refroidissement en mousse de carbone activé présentait une meilleure efficacité de refroidissement par rapport au tampon de luffa [45].

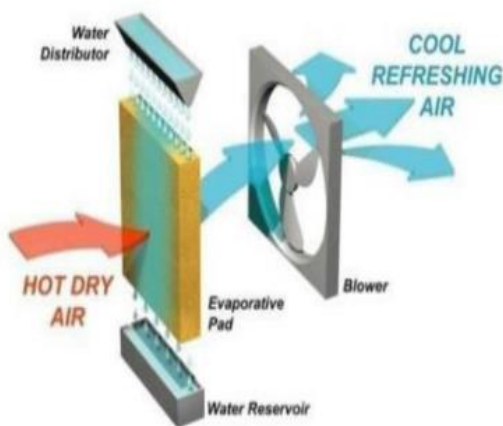


Figure II- 4:Principe de base du refroidissement par évaporation[46].

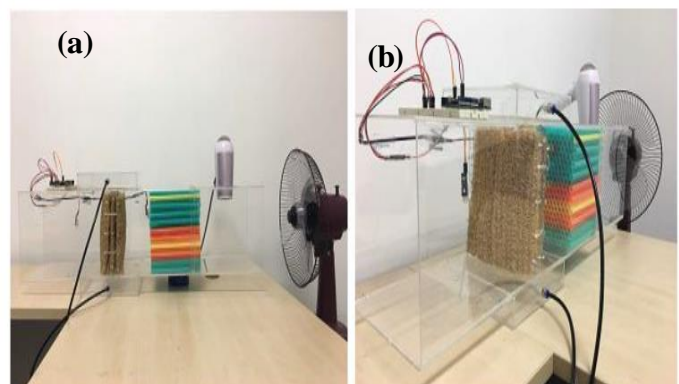


Figure II- 5: (a) Vue latérale et (b) vue d'angle du boîtier de refroidissement par évaporation[46].

S

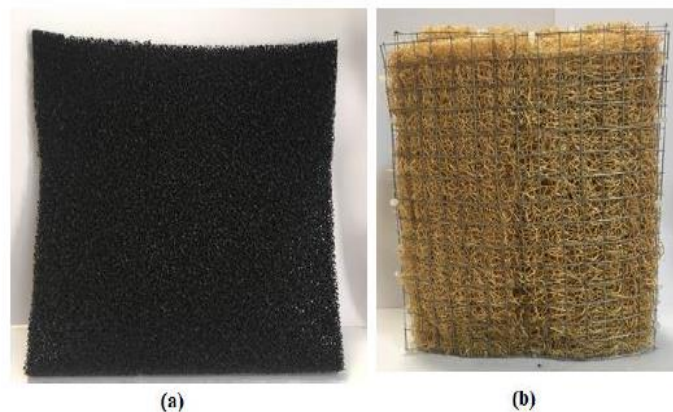


Figure II- 6: Matériaux des patins de refroidissement (a) coussins en mousse de carbone activée et (b) coussins Luffa[45].

Marouen Ghoulem et al., (2019) Ont discuté de la conception et des technologies de refroidissement utilisées pour la culture alimentaire durable dans les serres dans les climats chauds. Ils passent en revue les techniques de refroidissement à la pointe de la technologie, telles que la ventilation naturelle, le refroidissement par évaporation et l'ombrage, et présentent les aspects théoriques et pratiques liés aux systèmes de refroidissement des serres, y compris les principes de fonctionnement, les conditions de fonctionnement et les paramètres de performance. Les auteurs soulignent que l'utilisation combinée de ces techniques de refroidissement a le potentiel de réduire les besoins en énergie et de fournir des conditions intérieures optimales pour la croissance des cultures dans les serres des climats chauds. De plus, les auteurs étudient l'utilisation de la modélisation numérique pour la conception de serres dans les climats chauds et identifient les futurs défis et recommandations pour la recherche et le développement dans ce domaine. Dans l'ensemble, l'article offre des aperçus précieux sur la conception et les technologies de refroidissement pour la culture alimentaire durable dans les serres des climats chauds [46].

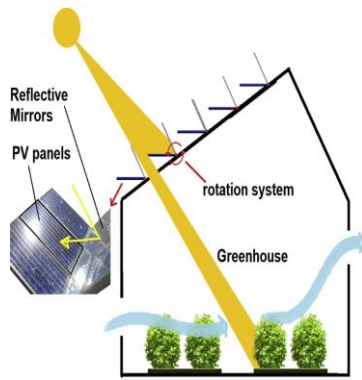


Figure II- 7:Schéma d'un photovoltaïque dynamique et ombrage système pour serre dans les climats chauds[46].

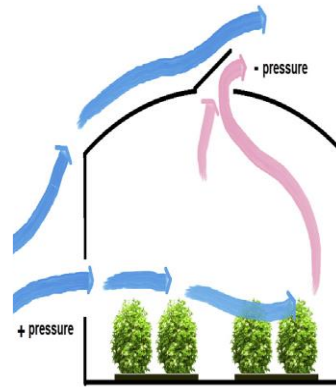


Figure II- 8: Serre à ventilation naturelle entraînée par pression différence[46].

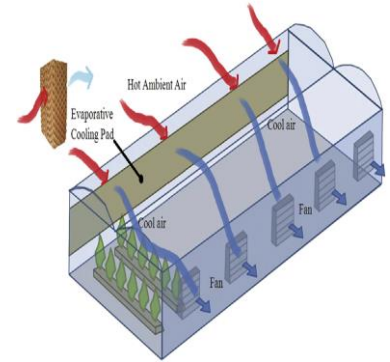


Figure II- 9: Schéma d'un système de refroidissement à ventilateur pour serre[46].



Figure II- 10: Schéma d'installation d'un système de buée ou de brumisation dans les serres [46].

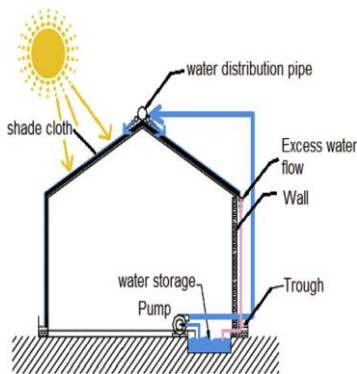


Figure II- 11: Schéma d'une serre avec évaporateur refroidissement en déplaçant le film d'eau sur une toile d'ombrage externe[46].

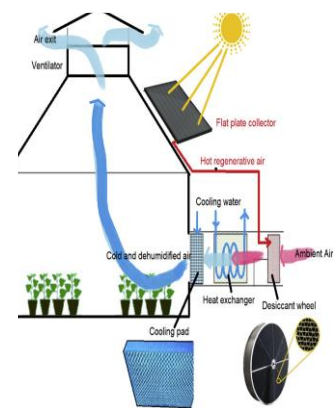


Figure II- 12: Schéma de principe du système de serre ventilée à ventilateur réparti assisté par déshydratant solaire [46].

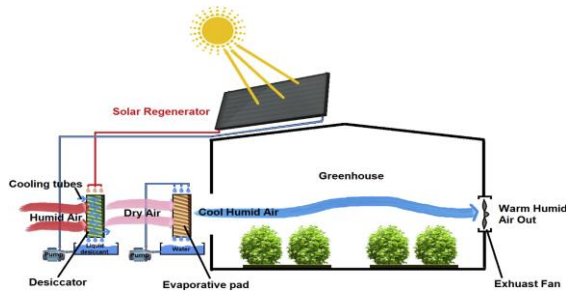


Figure II- 13: Schéma du système de refroidissement par dessicant liquide à énergie solaire pour les serres dans les climats chauds [46].

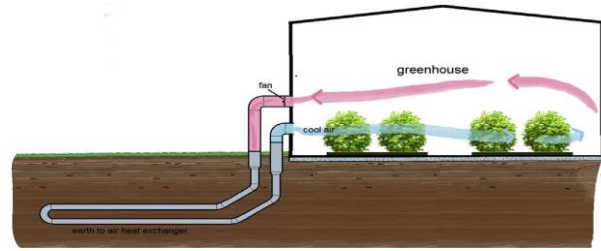


Figure II- 14: Schéma d'une boucle fermée de serre système souterrain de tunnel aérien [46].

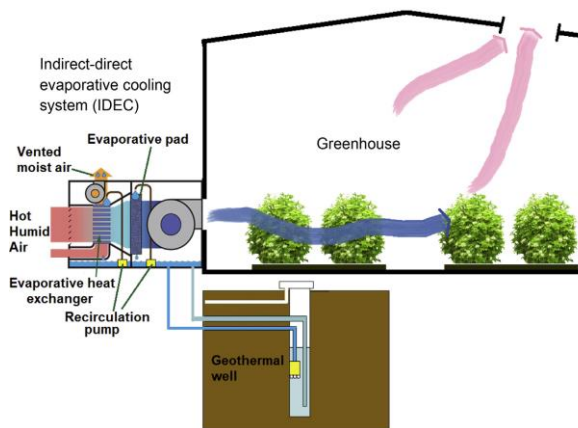


Figure II- 15: Schéma d'un système de refroidissement par évaporation indirect-direct et d'un puits géothermique pour les serres dans les climats chauds[46].

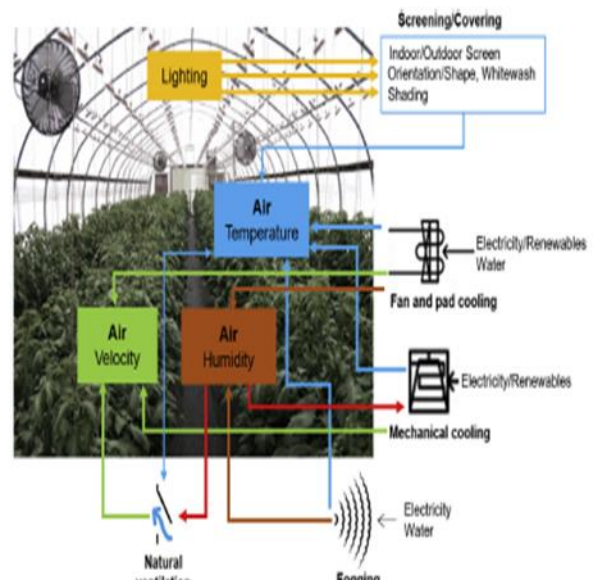


Figure II- 16: Élément de conception de fonction pour la gestion du microclimat de serre agricole dans les climats chauds[46].

S.A. Nada et al., (2019) Ont étudié un nouveau tampon de refroidissement par évaporation fabriqué à partir de papiers de cellulose dans une structure en ruche. Ils examinent quatre tailles de tampons différentes avec une surface de face de $0,335 \times 0,390$ m² et des épaisseurs de 35, 70, 105 et 140 mm dans une soufflerie adaptée au système de refroidissement par évaporation. L'étude évalue les paramètres de performance du tampon de refroidissement tels que la baisse de température de l'air, l'augmentation du rapport d'humidité de l'air, la capacité de refroidissement, le débit d'évaporation de l'eau, l'efficacité de saturation, la perte de pression, l'efficacité

énergétique, le rapport d'efficacité énergétique, l'efficacité exergétique et l'efficacité globale énergétique. Les effets de l'épaisseur du tampon de refroidissement et des conditions de fonctionnement, notamment la vitesse de l'air, la température de l'air d'entrée, le débit d'eau, la température de l'eau et l'épaisseur du tampon de refroidissement, sont étudiés. Les résultats montrent que l'efficacité de saturation, l'efficacité exergétique et l'efficacité globale exergétique du tampon proposé augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur du tampon et du débit d'eau. Les valeurs les plus élevées obtenues pour ces paramètres sont respectivement de 84 %, 92 % et 74 %. Les auteurs présentent également de nouvelles corrélations expérimentales adimensionnelles permettant de prédire les paramètres de performance du système en fonction de différentes conditions de fonctionnement et de la taille du système [47].

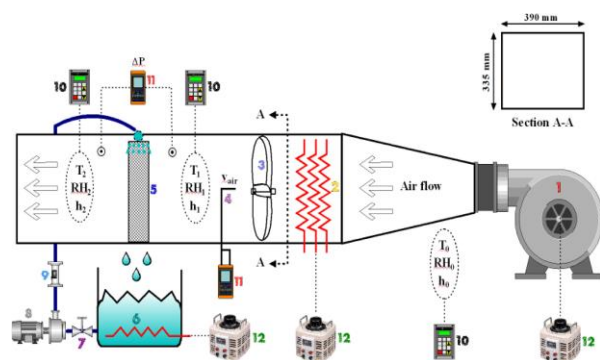


Figure II- 17: Schéma de principe du montage expérimental[47].

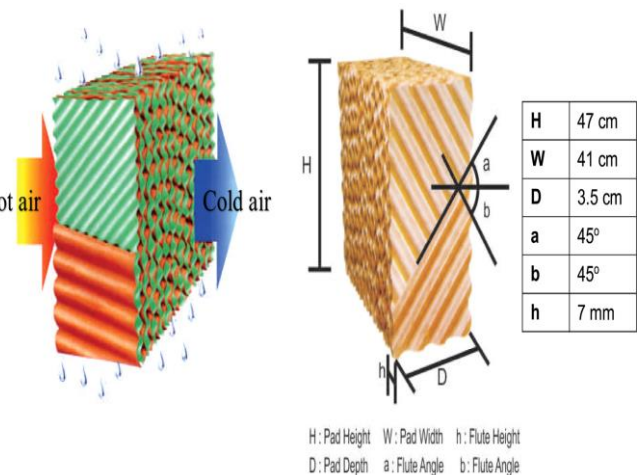


Figure II- 18: Configuration et dimensions complètes du tampon cellulosique modèle Bee-hive utilisé[47].

Yildiz et al., (2022) Ont analysé l'exergie, la durabilité et l'efficacité de refroidissement d'un système de refroidissement par évaporation directe à source géothermique dans quatre cas différents. L'objectif était d'étudier la consommation d'énergie dans les bâtiments et de trouver une alternative plus économique et durable. Les auteurs ont évalué l'efficacité exergétique, la perte exergétique spécifique, les valeurs de durabilité, le potentiel d'amélioration exergétique et l'efficacité de refroidissement pour chaque cas. Les résultats ont montré que l'efficacité exergétique était la plus élevée dans le cas 3, à 20,83 %, et la perte exergétique spécifique était la plus élevée dans le cas 2, à 100,51 J/kg. Les valeurs de durabilité étaient parallèles à l'efficacité exergétique. Les efficacités de refroidissement pour les quatre cas différents ont été obtenues respectivement à 33,70 %, 34,81 %, 41,69 % et 36,95 %, et les différences de température entre la pièce et la température ambiante ont également été rapportées. Les auteurs ont conclu que l'efficacité exergétique est un indicateur utile de l'utilisabilité et de la durabilité du système, et les résultats ont montré que le système de refroidissement par évaporation présente un fort potentiel d'amélioration[48].

Sadam-Houcine Sellam et al., (2022) Ont mené une enquête expérimentale sur un refroidisseur à évaporation directe (DEC) dans la région chaude et aride de Biskra, en Algérie. Ils ont utilisé des fibres de palmier dattier comme nouveau matériau de refroidissement par évaporation dans le refroidisseur. L'objectif était d'évaluer les performances thermiques du système DEC en testant différents paramètres de performance. Les chercheurs ont évalué la capacité de refroidissement, l'efficacité de refroidissement et la capacité de refroidissement totale du tampon en faisant varier l'épaisseur du tampon et le débit massique d'air dans des conditions ambiantes extrêmes. Ils ont constaté que l'augmentation de l'épaisseur du tampon et du débit massique d'air entraînait des améliorations de la capacité de refroidissement et de l'efficacité du tampon. Ils ont également observé que la durée de fonctionnement n'affectait pas significativement les performances du DEC. L'étude a identifié les paramètres de fonctionnement, y compris l'épaisseur du tampon, le débit massique d'air, les conditions ambiantes, la quantité et la température de l'eau, comme des facteurs cruciaux pour obtenir des conditions de fonctionnement optimales pour le système DEC. Les chercheurs ont conclu que le tampon en fibres de palmier dattier a démontré son efficacité en tant que matériau de refroidissement par rapport aux tampons conventionnels dans les zones chaudes et arides [49].

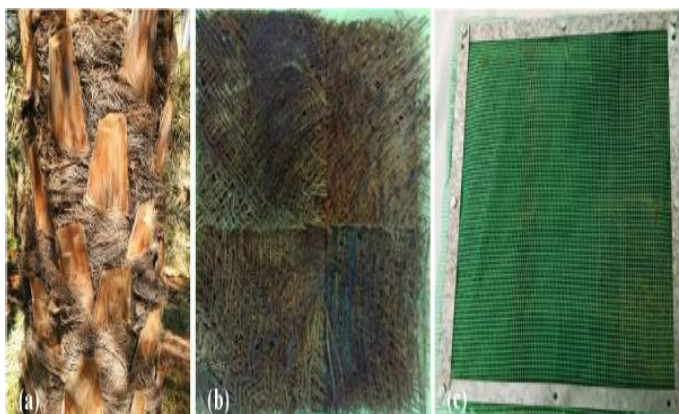


Figure II- 19: (a) Palmier dattier, (b) Fibres de palmier dattier (maille) entourant le tronc et (c) Coussinet en fibres de palmier dattier [49].

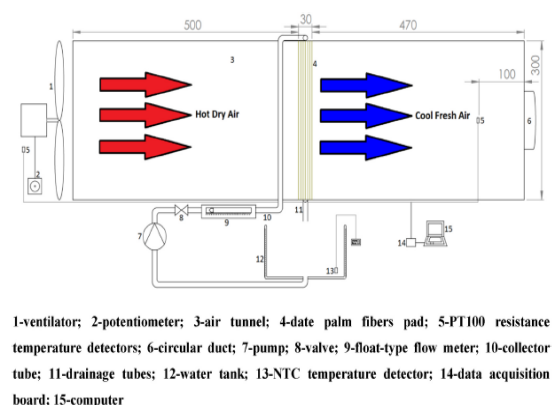


Figure II- 20: Schéma de la configuration expérimentale du DEC[49].

Amatalraof Abdullah (2022) A réalisé une étude pour évaluer les performances de refroidissement de trois matériaux naturels différents utilisés comme milieu humidifié pour une conception de refroidissement bio-inspirée installée dans une tour éolienne à Seiyun, au Yémen. Les trois matériaux utilisés dans les différentes conceptions étaient des plaques d'argile, de l'argile avec des fibres de jute et de l'argile avec de la laine de bois. L'étude a également examiné l'effet de la hauteur de la conception et du nombre de tampons en laine de bois sur l'efficacité de refroidissement. L'efficacité de refroidissement et la perte de pression de chaque conception ont été testées à six vitesses d'air différentes allant de 1,0 à 3,5 m/s. Les résultats ont montré que

l'efficacité de refroidissement moyenne la plus élevée a été atteinte avec la conception d'argile avec des fibres de jute, qui a atteint 85,2 %, suivie de la conception d'argile avec de la laine de bois avec 76,6 %, et l'efficacité la plus faible a été obtenue avec la conception d'argile avec 66,3 %. La plus grande perte de pression a été constatée dans la conception d'argile avec de la laine de bois, allant de 11 à 33,5 Pa, suivie de la conception d'argile avec une perte variant de 5 à 30 Pa, et la plus faible a été observée dans la conception d'argile recouverte de fibres de jute, qui variait de 2,5 à 27,5 Pa. L'étude a également révélé que la capacité de refroidissement de la conception augmentait avec l'augmentation de sa hauteur et du nombre de tampons en laine de bois. L'étude a conclu que les conceptions de refroidissement utilisant des matériaux naturels pourraient potentiellement remplacer les systèmes de CVC conventionnels dans les régions chaudes et arides, et contribuer de manière significative aux économies d'énergie et à la protection de l'environnement[50].

Deyaa M.N. Mahmoud et al., (2022) Ont réalisé une étude expérimentale sur un système innovant de refroidissement par évaporation hybride photovoltaïque (PV/EC) dans le but d'améliorer son efficacité pour le refroidissement du panneau photovoltaïque et la fourniture simultanée d'air froid et humide. Le système PV/EC intègre un panneau photovoltaïque et un système de refroidissement par évaporation traditionnel monté sur le toit, le système de refroidissement étant placé sous le panneau photovoltaïque en une seule structure. L'objectif était d'éliminer l'espace requis par un système de refroidissement entraîné par des panneaux photovoltaïques et de réduire le rayonnement solaire sur le toit du bâtiment en été.

Les performances du système de refroidissement par évaporation proposé ont été testées à l'aide d'un tampon de refroidissement en cellulose de trois épaisseurs (50, 100 et 150 mm) avec trois débits d'eau (1, 2 et 3 LPM), tandis que la vitesse de l'air variait entre 2 et 3 m/s. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus à partir d'un panneau photovoltaïque normal sans refroidissement.

Les résultats expérimentaux ont montré que le système PV/EC améliorait les performances électriques et thermiques du système par rapport au panneau photovoltaïque normal. L'efficacité du panneau photovoltaïque a augmenté de 7,4 %, 10,5 % et 11,2 % pour les tampons #1, #2 et #3, respectivement. La réduction de température moyenne pour le tampon #1 était de 15 °C, tandis que les tampons #2 et #3 ont montré une réduction d'environ 20 °C. La différence de température de l'air fourni était de 5,5 °C, 9,2 °C et 13,9 °C pour les trois tampons, respectivement. La meilleure température de l'air sec-bulbe fournie obtenue était de 24,7 °C avec une humidité relative de 71 % pour le tampon [51].



Figure II- 21: Banc d'essai expérimental[51].

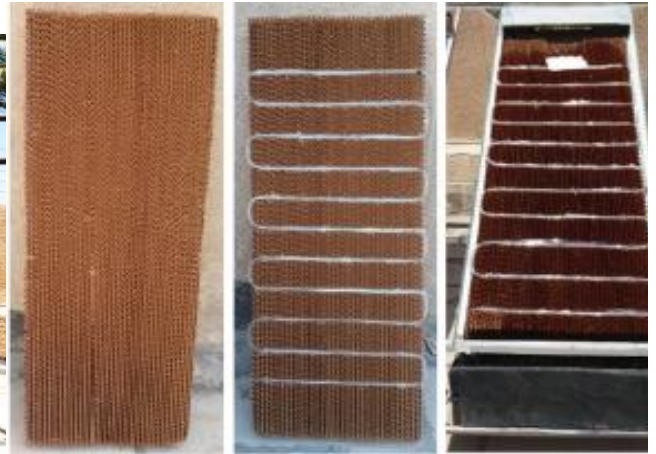


Figure II- 22: Pad de cellulose et la configuration du tuyau de distribution d'eau[51].

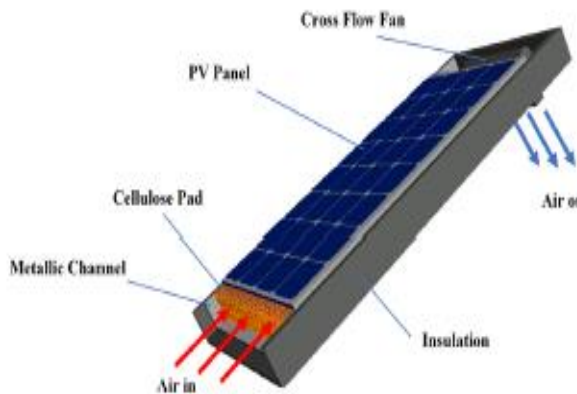


Figure II- 23: Disposition schématique du système (PV/EC) [51].

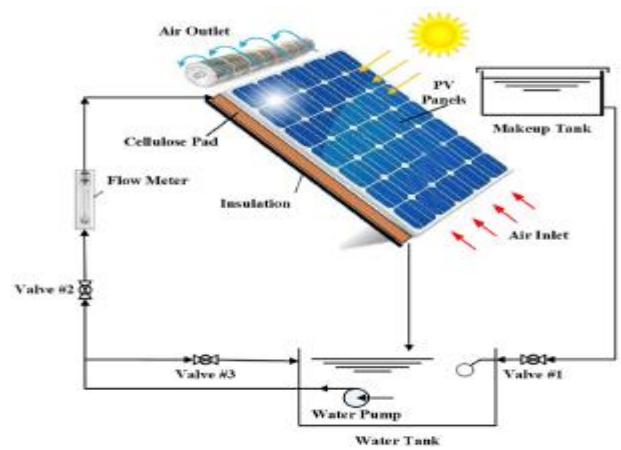


Figure II- 24: Schéma de principe du banc d'essai expérimental[51].

Khater et al., (2022) Ont optimisé les paramètres de fonctionnement d'un système de refroidissement par évaporation, plus précisément la hauteur des tampons et la vitesse de l'air, en examinant leur effet sur la température de l'air, l'humidité relative, la réduction de température, l'efficacité de refroidissement et la capacité de refroidissement. L'expérience a consisté à faire varier la hauteur des tampons (1,0 et 2,0 m) et les vitesses de l'air (1,5, 3,0, 4,5 et 6,0 m/s) et à enregistrer des données sur la température et l'humidité. Les résultats ont montré que la température de l'air diminuait avec l'augmentation de la hauteur des tampons, tandis que l'humidité relative diminuait initialement puis augmentait pendant la période diurne. La plus grande réduction de température et l'efficacité de refroidissement la plus élevée ont été obtenues avec une hauteur de tampon de 2,0 m et une vitesse de l'air de 6,0 m/s. La capacité de refroidissement la plus élevée était de 629,1 kW dans ces conditions[52].

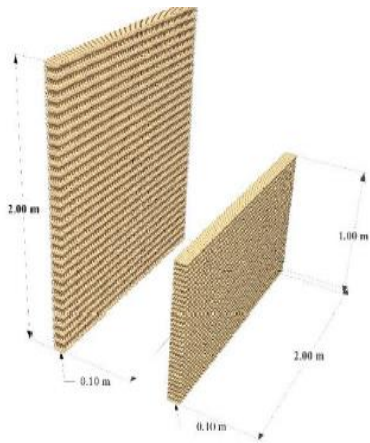


Figure II- 25: . Tampon de refroidissement par évaporation[52].

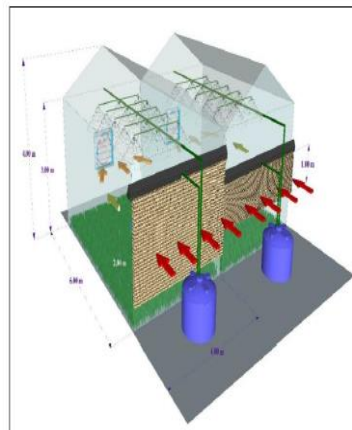


Figure II- 26: Montage expérimental[52].

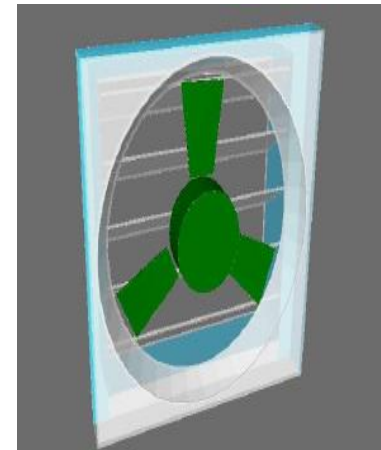


Figure II- 27: Ventilateur d'extraction[52].

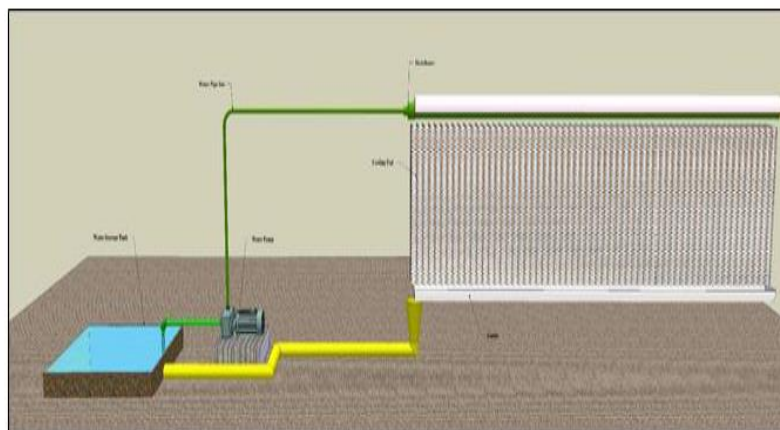


Figure II- 28: Cycle d'eau du refroidissement par évaporation[52].

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous fournirons une description générale du prototype développé dans le cadre de ce mémoire de Master. Deux serres canariennes ont été construites à l'atelier de l'Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa). Ces deux serres canariennes ont été instrumentées pour étudier leur comportement thermique avec et sans système de refroidissement (PAD). La première serre, sans système de refroidissement, a servi de témoin, tandis que la deuxième serre a été modifiée pour tester l'influence du système de refroidissement et toute modification apportée.

La phase de prototypage de cette recherche a été menée pour valider le concept et tester sur le terrain dans des conditions réels le système de refroidissement (PAD) de nouvelle serre développer dans ce projet de Master, démontrant ainsi les performances de la serre à grande échelle. L'efficacité du système de refroidissement a été évaluée. La serre à grande échelle a été miniaturisée tout en conservant la même configuration et le même mode de fonctionnement. Elle avait une surface de 18 m² (6×3 m, avec une hauteur de 1,90 m), représentant une réduction d'échelle de 1/50 par rapport à la surface de la grande serre proposée dans cette recherche (Figure III- 1). Pendant la phase de test, la serre était complètement vide. Il était recouvert de plastique polyéthylène jaune transparent (Figure III- 2).



Figure III. 1:Dimensions identiques des serres



Figure III. 2: Serre canarienne sans et avec system de (Pad)

III.2. Description de la zone d'étude

Le site de Ghardaïa est considéré comme une région aride et sèche, située dans le sud de l'Algérie, à environ 600 km au sud de la capitale (Figure III- 3). Il est délimité par les coordonnées géographiques suivantes : latitude de $32^{\circ}36' N$, longitude de $3^{\circ}48' E$ et altitude de 450 m au-dessus du niveau de la mer. Le site se caractérise par un ensoleillement exceptionnel, avec un taux d'insolation significatif. Le rayonnement solaire annuel moyen mesuré sur un plan horizontal dépasse les 6000 Wh/m^2 , et la durée d'ensoleillement est supérieure à 3000 heures par an. L'hiver à Ghardaïa est marqué par un froid extrême dû aux chutes de neige venant des hauts plateaux, et les tempêtes de sable en provenance du sud-ouest en fin d'hiver sont particulièrement gênantes, provoquant une grande quantité de poussière. Les températures sont élevées en été et peuvent dépasser les 45°C , tandis qu'elles sont relativement fraîches en hiver. Les gelées sont exceptionnelles et légères [53].

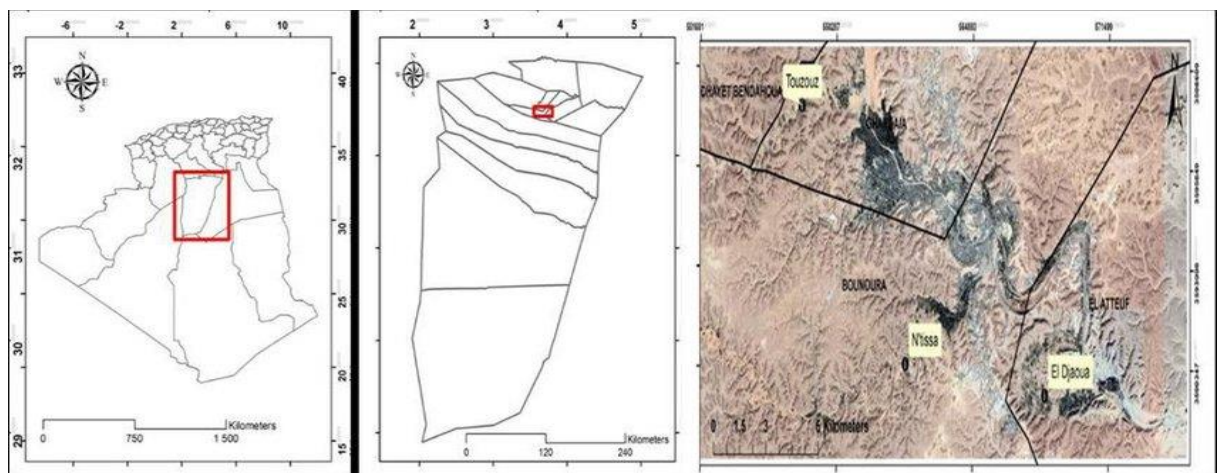


Figure III. 3: Géographique de la wilaya de Ghardaïa[54]

III.3. Etapes de réalisation de notre serre parallèle (canarienne)

III.3.1. Sélection du site

La plateforme expérimentale d'applications des énergies renouvelables en agriculture de l'URAER a été choisie comme site pour notre prototype de projet principal, en tenant compte de facteurs tels que l'exposition au soleil, l'accessibilité, la disponibilité de l'eau et de l'électricité, et la protection contre les vents forts ou les conditions météorologiques défavorables (Figure III- 4).



Figure III. 4: Plateforme expérimentale d'applications des énergies renouvelables en agriculture

III.3.2. Fondation

Après avoir sélectionné l'emplacement adéquat, nous procédons au creusement et à l'installation des colonnes. Une fois les colonnes en place, nous les soude ensemble pour assurer leur solidité. Ensuite, nous préparons le toit conformément aux spécifications d'une serre agricole. Cette étape inclut la construction de la structure de support du toit, l'installation des matériaux de couverture appropriés, tels que des plastiques polyéthylènes jaune transparent pour permettre une bonne transmission de la lumière, et le serrer les câbles. Il est représenté sur la figure suivante.

III.3.3. Conception et planification

Nous avons déterminé les dimensions et l'aménagement de notre serre en fonction de nos besoins spécifiques et de l'espace disponible (réduction d'échelle de 1/50), en tenant compte de facteurs tels que le type de cultures que nous prévoyons de cultiver.

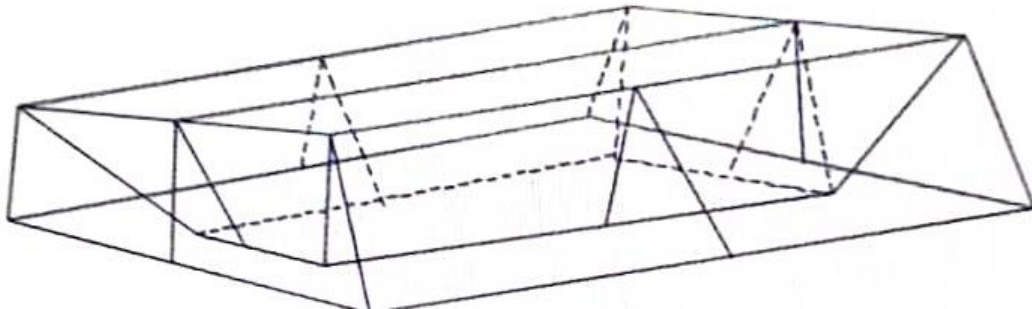


Figure III. 5: Conception de nouveau prototype de la serre canarienne

III.3.4. Construction et configuration de l'infrastructure

La construction de notre structure de serre canariennes, y compris les côtés, le toit et le sol, a été lancée (Figure III- 6).



Figure III. 6: (A) Soudure au poteau, (B) Serrage des câbles et (C) Couverture

III.3.5. Revêtement

Un film de polyéthylène stabilisé de haute qualité (180 μm), offrant une excellente protection UV+IR pendant deux saisons, a été sélectionné comme matériau de revêtement pour notre prototype.



Figure III. 7: Type de couverture

III.3.6. Construction des côtés

La méthode de ventilation consiste à enrouler les côtés (longueur = 4.50 et largeur = 1.20), permettant ainsi à l'air de circuler. L'admission d'air se fait d'un côté ou des deux côtés, et peut être facilement ajustée en fonction de la température, des vents dominants et de la pluie. Pendant les périodes de chaleur excessive, il peut être nécessaire d'enrouler les côtés jusqu'au sommet. Ils

doivent être recouverts d'un fin filet attaché à la serre en plastique, permettant ainsi une circulation d'air libre tout en empêchant le passage des insectes et l'accumulation de poussière.

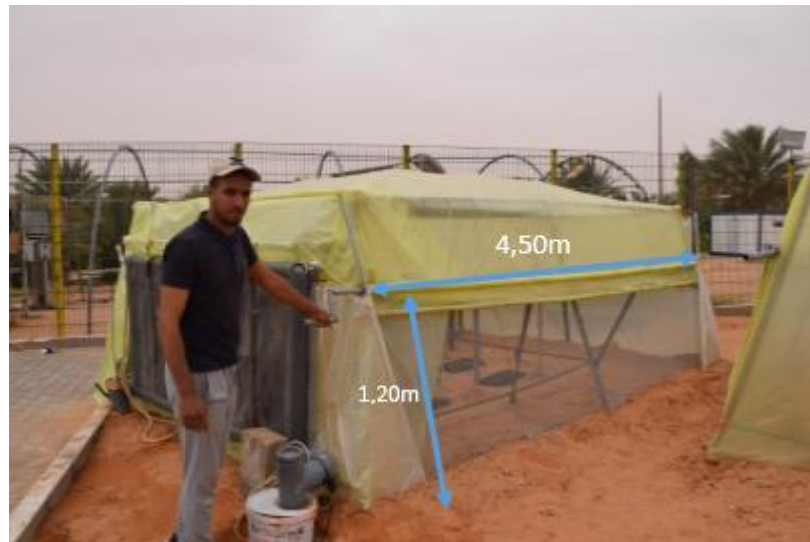


Figure III. 8: Ventilation manuelle (cotés)

III.4. Système de refroidissement (Pad) et ventilation

Le Système de refroidissement (Pad) et ventilation est une technique très efficace utilisée dans les serres pour maintenir des conditions intérieures optimales. Consiste de pad poreux (remplie de fibre de palmier) installés dans le nord de la serre avec les dimensions suivant (1.90×1.10 m avec une épaisseur de 0.08 m).

L'eau est continuellement pompée sur ce pad, ce qui crée un effet de refroidissement par évaporation. Lorsque l'air pénètre dans la serre à l'aide de trois ventilateurs à vitesse variable, contrôlés manuellement, il traverse la surface humide (PAD), ce qui permet de réduire sa température et d'augmenter l'humidité ambiante de manière significative. Ce système de refroidissement par évaporation contribue à maintenir un climat optimal dans la serre, favorisant ainsi la croissance saine des plantes et assurant des conditions propices à la culture. Les ventilateurs à vitesse variable permettent un contrôle précis de la quantité d'air qui entre dans la serre, offrant ainsi une flexibilité dans la gestion des conditions environnementales. Grâce à ce processus de refroidissement par évaporation, la serre peut maintenir une température agréable tout en maintenant un niveau d'humidité adapté, ce qui est essentiel pour la santé et la productivité des plantes.

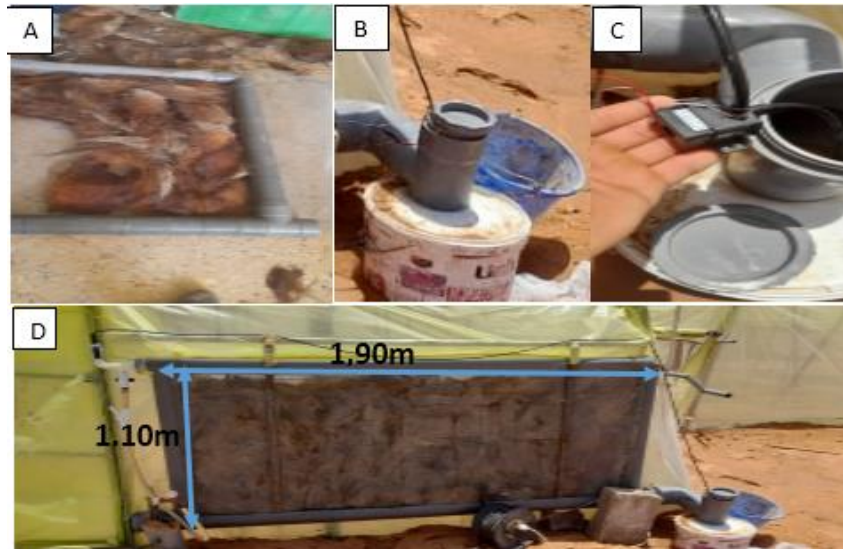


Figure III. 9:(A) préparation (pad),(B) System récupération ,(C) Pompe,(D) PAD



Figure III. 10:ventilateurs à vitesse variable, contrôlés manuellement

III.5. Système d'acquisition et traitement de prototype des données

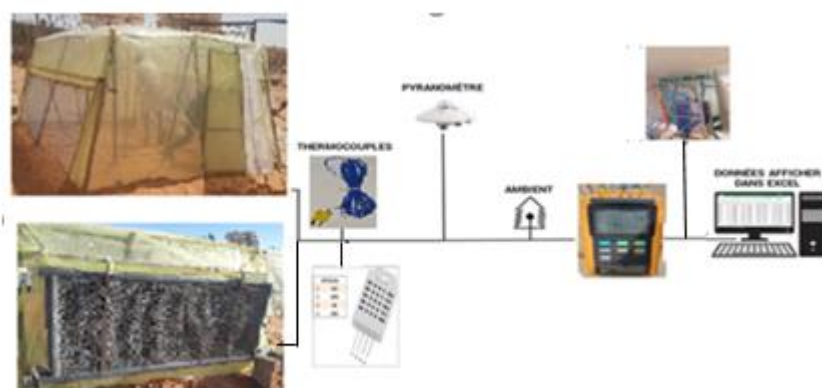


Figure III. 11: système d'acquisition de prototype des données

Le système d'acquisition de prototype de la serre implique l'intégration de divers composants, notamment des thermocouples, des sondes DHT22 et un enregistreur de données (12 Channel Thermocouple Data Logger) avec une carte SD. Ce système est conçu pour capturer et enregistrer des données environnementales cruciales dans la serre pour une analyse et un contrôle plus approfondi. Les thermocouples sont des capteurs de température stratégiquement placés à

différents endroits de la serre. Ces thermocouples sont connectés à l'enregistreur de données de thermocouple à 12 canaux, qui agit comme la plaque tournante centrale pour la collecte de données. En plus de la surveillance de la température, les sondes DHT22 sont utilisées pour mesurer à la fois la température et les niveaux d'humidité dans la serre. Ces sondes sont également connectées à l'enregistreur de données, permettant une surveillance environnementale complète. L'enregistreur de données à thermocouple à 12 canaux joue un rôle essentiel dans ce système d'acquisition. Il a la capacité d'enregistrer simultanément les lectures de température de plusieurs thermocouples. L'enregistreur est équipé d'un emplacement pour carte SD, lui permettant de stocker les données collectées directement sur la carte mémoire. Une fois les données enregistrées, la carte SD peut être retirée de l'enregistreur de données et insérée dans un ordinateur pour la récupération et l'analyse des données. Cela nous a permis de surveiller les conditions environnementales, d'identifier des modèles, de prendre des décisions éclairées et d'optimiser les performances de la serre.



Figure III. 12: Installation des capteurs et système d'acquisition des données

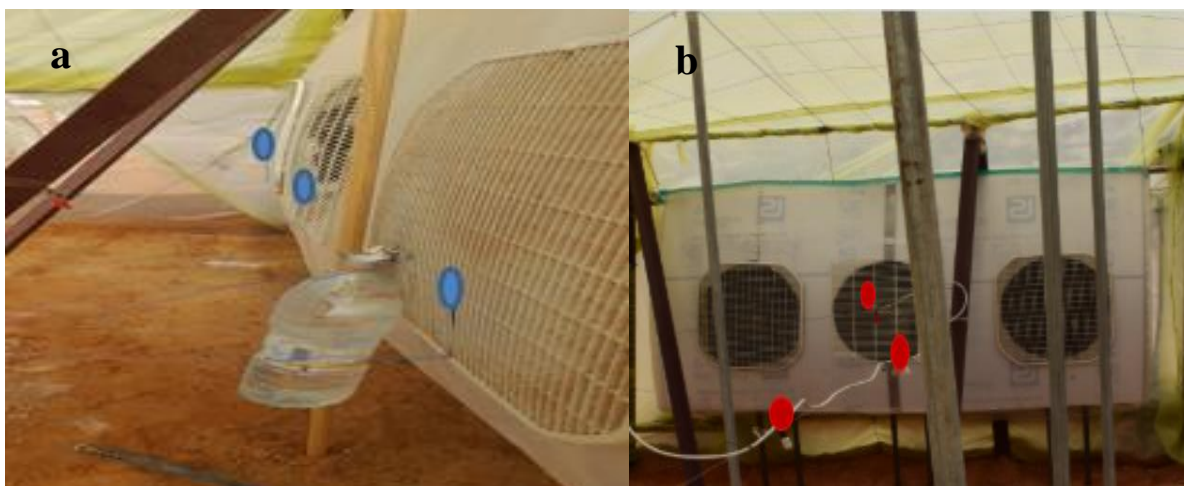


Figure III. 13: Position des capteurs a) thermocouples, b) DHT22

III.5.1. Capteur de température et humidité

Le DHT22 est un capteur de base pour la température et humidité. Il utilise l'effet capacitif pour la détection d'humidité relative et une thermistance pour la mesure de la température. Ce capteur fournit une information numérique en sortie, information communiquée régulièrement.

Les caractéristiques suivantes :

- ✓ Alimentation et E/S de 3 à 5 V
- ✓ Consommation de courant maximale de 2,5 mA pendant la conversion (lors de la demande de données)
- ✓ Convient aux mesures d'humidité de 0 à 100 % avec une précision de 2 à 5 %
- ✓ Convient aux mesures de température de -40 à 80 °C avec une précision de $\pm 0,5$ °C
- ✓ Fréquence d'échantillonnage maximale de 0,5 Hz (une fois toutes les 2 secondes)
- ✓ Taille du boîtier : 15,1 mm x 25 mm x 7,7 mm
- ✓ 4 broches avec un espacement de 0,1 pouce

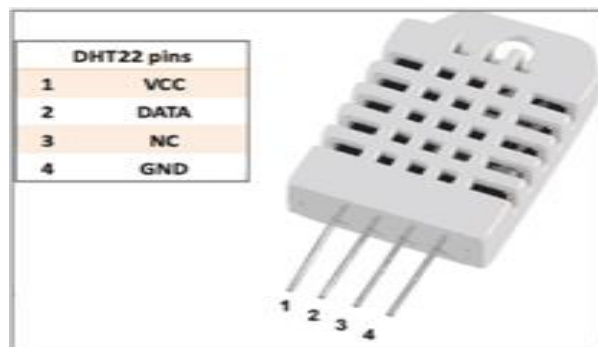


Figure III. 14:Capteur DHT22

III.5.2. Rayonnement solaire

Un rayonnement solaire se compose de deux parties distinctes. La première partie, fixe, comprend un pyromètre de type EKO qui mesure le rayonnement solaire global sur un plan horizontal, ainsi qu'un pyromètre différentiel de type EPPLEY qui mesure l'irradiance sur un plan incliné de 32°, orienté vers le sud. La seconde partie, mobile, est équipée d'un pyréliomètre pointant vers le disque solaire pour mesurer le rayonnement direct, ainsi que d'un pyranomètre de type EKO avec une boule pare-soleil pour mesurer l'éclairement diffus sur un plan horizontal.



Figure III. 15 Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement:

III.5.3. Carte Arduino

Il s'agit d'une plateforme de développement électronique à carte unique connue sous le nom de Board Développement, qui intègre un microcontrôleur programmable et un circuit électronique open-source. Son objectif est de simplifier l'intégration de l'électronique interactive dans différents projets spécialisés. Arduino est couramment utilisé dans la création de projets électroniques interactifs et la construction de capteurs environnementaux, notamment ceux de température, de vent, de lumière, et bien plus encore. De plus, Arduino peut être connecté à diverses applications logicielles sur un ordinateur personnel, permettant une interaction fluide.



Figure III. 16: Carte Arduino Méga

III.6. Méthodologie

Les expériences ont été menées aux mois de mai et juin avec un débit d'air constant de 1,4 m/s. Un matériau naturel de la région (fibre de palmier) a été testé. Les températures de bulbe sec et de bulbe humide de l'air à l'entrée et la température de bulbe sec à la sortie ont été mesurées à l'aide de thermocouples et enregistrées à l'aide d'un enregistreur de données (12 thermocouples Channel) figure 16. L'efficacité de saturation de pad de refroidissement a été calculée à l'aide de la relation suivante telle que mentionnée dans [53]

$$\eta_s = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T'1)} \times 100$$

Où :

T1 : est la température de bulbe sec de l'air à l'entrée de la serre,

T1' : est la température de bulbe humide de l'air à la sortie de la serre (intérieur)

T2 : est la température de bulbe sec de l'air à la sortie de la serre (intérieur).

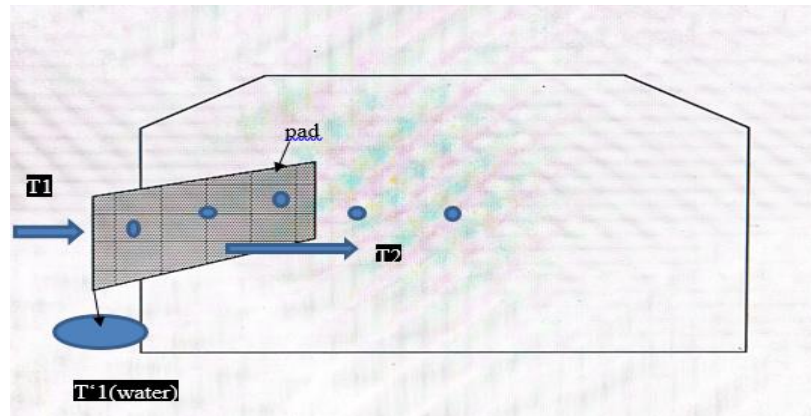


Figure III. 17: Positionnement des thermocouples dans le prototype de la serre développée.

III.7. Conclusion

En conclusion, le processus de création d'une serre contrôlée présente plusieurs défis qui nécessitent une réflexion approfondie et une expertise. Construire une serre contrôlée implique d'équilibrer divers facteurs, tels que la température, l'humidité, la lumière et la ventilation, pour créer un environnement optimal pour la croissance des plantes. Atteindre cet équilibre peut être une tâche complexe, mais avec les bonnes connaissances et techniques, c'est certainement possible.

L'une des principales difficultés dans la construction d'une serre contrôlée est la gestion de la température. Le maintien de la plage de température idéale pour la croissance des plantes nécessite un système de chauffage et de refroidissement fiable, ainsi qu'une isolation pour minimiser les pertes de chaleur. De plus, les variations de température tout au long de la journée et des différentes saisons doivent être prises en compte, ce qui nécessite l'utilisation de capteurs de température et d'humidité pour bien gérer les conditions climatiques.

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats et les discussions d'une série de campagnes expérimentales menées dans des conditions météorologiques variables dans la région de Ghardaïa. L'objectif de ces expériences était d'évaluer les performances thermiques d'un nouveau prototype de serre canarienne équipé d'un système de refroidissement par évaporation utilisant des fibres de palmier dattier.

Les expériences ont été menées du 27 février au 07 juin 2023 dans la plateforme expérimentale d'applications des énergies renouvelables en de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa. Les expériences ont été conçues pour refléter les conditions météorologiques réelles de fonctionnement de la région de Ghardaïa. L'objectif principal de l'étude était d'analyser le comportement thermique des prototypes de serre solaires canariennes, avec et sans système de refroidissement.

Les caractéristiques du système de refroidissement par évaporation à base de fibres de palmier ont été étudiées sur des périodes de trois à huit jours consécutifs. Les performances thermiques des prototypes de serre solaires canariennes, avec et sans système de refroidissement, ont été mesurées en fonction des températures observées à différentes positions. Le débit massique d'air et le débit massique d'eau ont été fixé à 0.44 kg/h et 2.5 L/min respectivement afin de maintenir une constance dans les conditions expérimentales. Les résultats obtenus lors de ces expériences seront discutés en détail, mettant en évidence les performances thermiques des prototypes de serre solaires avec et sans système de refroidissement. L'analyse des données permettra de tirer des conclusions sur l'efficacité du système de refroidissement par évaporation à base de fibres de palmier dans le contexte spécifique de la région de Ghardaïa.

IV.2. Conditions météorologiques réelles de fonctionnement

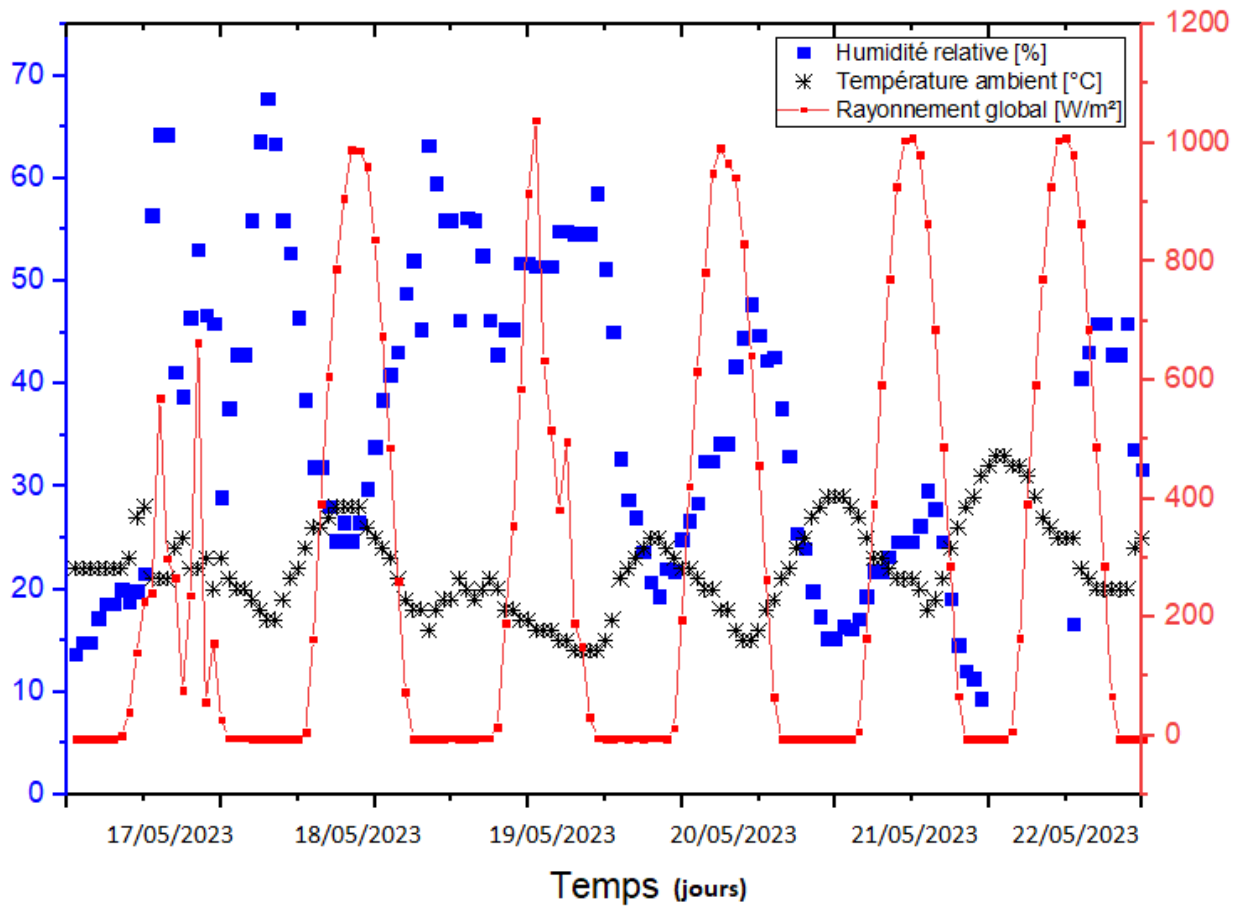


Figure IV. 1: Conditions météorologiques réelles de fonctionnement du 17/05/2023 au 22/05/2023

La figure IV-1, indique que la valeur moyenne de l'humidité relative à l'extérieur était de 36,38%. L'humidité relative à l'intérieur de la serre a progressivement diminué avec le temps jusqu'à 10 % et commencer à augmenter par la suite jusqu'à 64%. Ces résultats suggèrent une tendance générale de diminution de l'humidité relative à l'intérieur des serres tout au long de la journée, avec les valeurs les plus élevées enregistrées tôt le matin et les valeurs les plus basses atteintes à 15h00. Cette diminution peut être attribuée à des facteurs tels que l'évaporation, la ventilation et l'absorption d'humidité par les matériaux des serres. La hausse ultérieure de l'humidité relative à 18h00 indique probablement une augmentation de l'humidité ambiante ou l'activation d'un système de refroidissement dans les serres, ce qui peut aider à réguler l'humidité à des niveaux plus élevés. Cependant, pour une analyse plus approfondie de ces données, il serait nécessaire de consulter la figure spécifique mentionnée, ainsi que d'examiner d'autres facteurs et mesures liés à l'humidité, tels que la température et les conditions de ventilation.

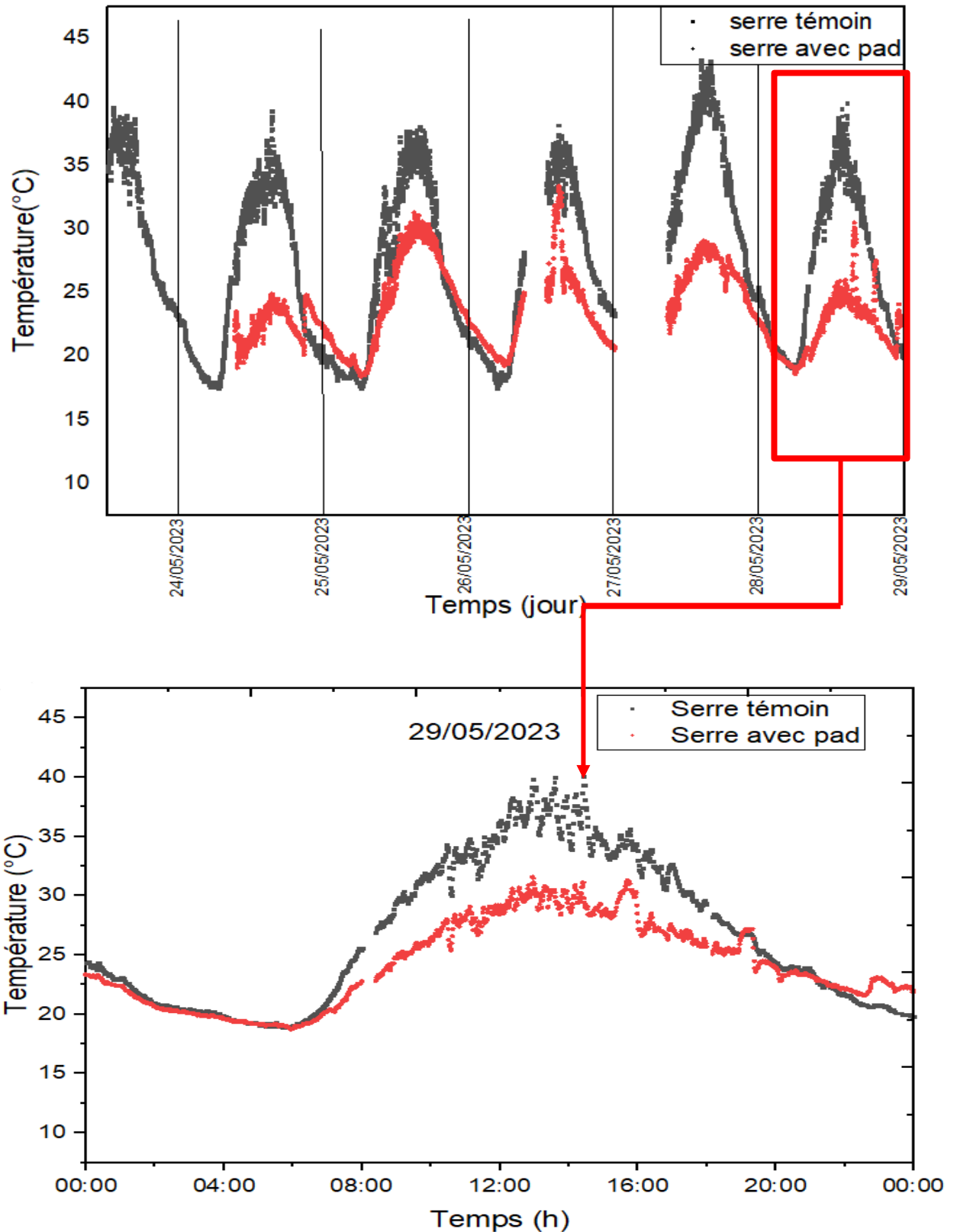


Figure IV. 2: Présente les variations de température au centre de la serre au cours de la journée.

La figure IV-2 Variation de la température en fonction de temps aux centre des serres canariennes, avec et sans système de refroidissement (PAD) pour une période du 24 Mai au 01

Jun 2023. Il est clair que la température a progressivement augmenté avec le temps, passant de 23 °C et 26 °C à 8h00 du matin à 29,5 °C et 35 °C à 12h00. La température est restée au-dessus de ces niveaux élevés jusqu'à ce qu'elle atteigne son maximum de 31 °C et 39,5 °C à 14h00. Par la suite, elle a commencé à diminuer progressivement, atteignant 26 °C et 29 °C à 18h00 pour les deux serres, avec et sans système de refroidissement (pad), respectivement.

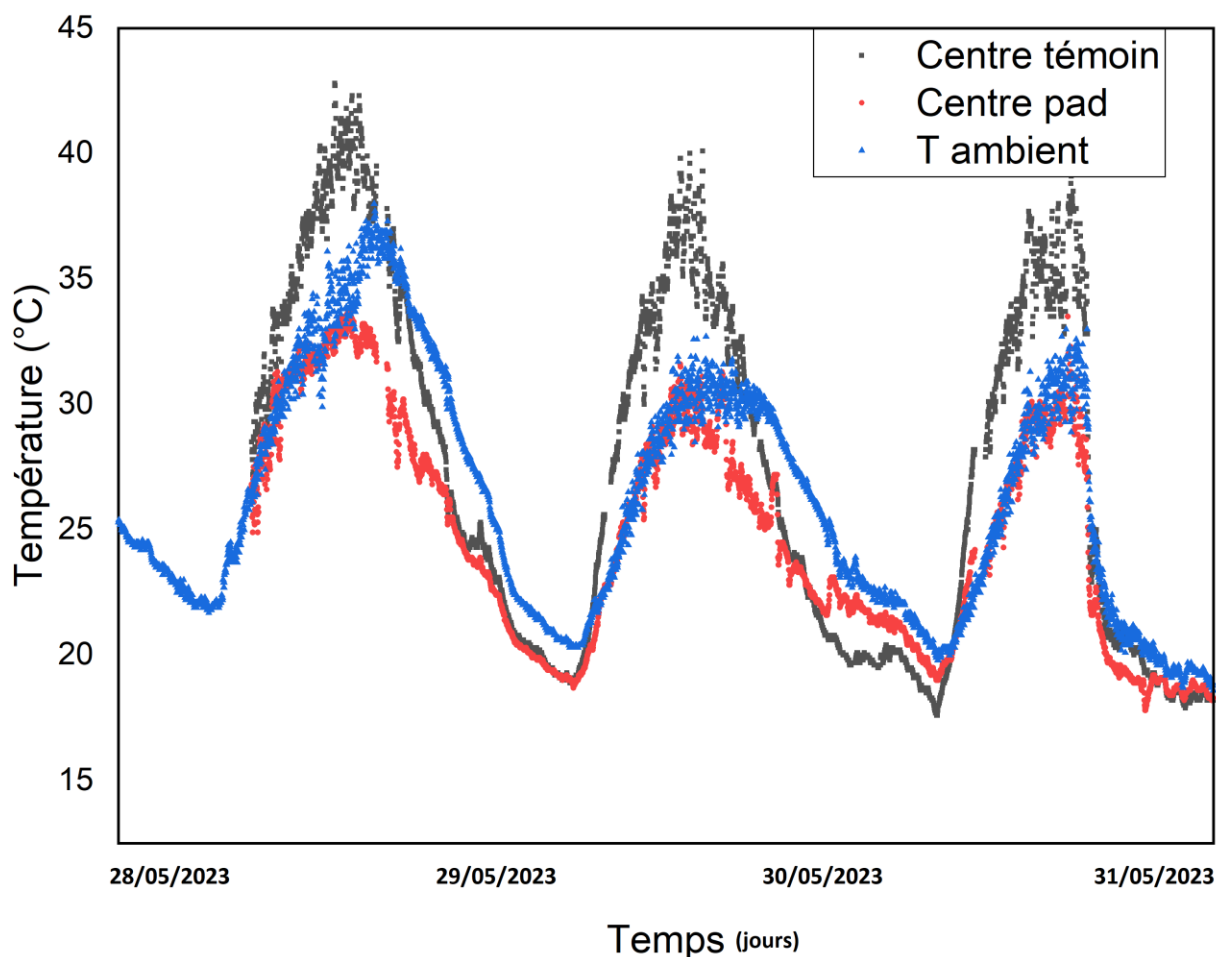


Figure IV. 3:Variation de la température en fonction de temps aux centre des serre canariennes, avec et sans système de refroidissement (PAD) pour une période 3 du 28 mai au 31 mai 2023

La figure IV-3 présente l'évaluation expérimentale de la température ambiante et de la température intérieure de la serre, en comparant les résultats obtenus sans système de refroidissement PAD (Pad and Fan) et avec le système de refroidissement mis en œuvre. L'expérience a été menée sur une période de trois jours, et les températures maximales enregistrées dans la serre étaient de 31°C avec le système de refroidissement et de 41°C sans le système. La figure montre clairement l'impact significatif du système de refroidissement PAD sur la température intérieure de la serre. Sans le système de refroidissement, la température de la serre a atteint un maximum de 41°C, indiquant un environnement potentiellement préjudiciable à la croissance et à la productivité des

plantes. Des températures élevées peuvent provoquer un stress thermique, entraînant une réduction des taux de photosynthèse, un flétrissement et même des dommages ou la mort des plantes.

Ces conditions sont particulièrement défavorables aux cultures thermosensibles et peuvent entraîner des pertes de rendement. En revanche, lorsque le système de refroidissement PAD était activé, la température de la serre était efficacement contrôlée, atteignant un maximum de 31°C. Cette réduction de température de 10 degrés Celsius démontre l'efficacité du système de refroidissement à maintenir un environnement plus favorable à la croissance des plantes. En réduisant la température, le système de refroidissement aide à atténuer les effets négatifs du stress thermique et crée des conditions plus optimales pour la photosynthèse, la transpiration et la santé globale des plantes.

La différence de température de 10°C entre les deux scénarios souligne l'importance de mettre en place un système de refroidissement adapté dans les serres. Le système de refroidissement PAD joue un rôle crucial dans le maintien de niveaux de température optimaux, car une chaleur excessive peut avoir des effets néfastes sur la croissance et le développement des plantes. La capacité de réguler et de contrôler la température à l'intérieur de la serre permet d'optimiser la production agricole et d'améliorer le rendement global et la qualité.

Ces résultats indiquent une augmentation significative de la température à l'intérieur de la serre au fur et à mesure que la journée avance, atteignant des niveaux élevés à midi. La présence du système de refroidissement (pad) semble avoir un effet bénéfique sur la température, permettant une légère réduction par rapport à la serre sans système de refroidissement. Cependant, même avec le système de refroidissement, les températures restent relativement élevées tout au long de la journée.

IV.3. Conclusion

Ces constatations soulignent l'importance d'une gestion adéquate de la température dans les serres, en particulier pendant les heures de pointe de chaleur. Des stratégies de refroidissement supplémentaires pourraient être nécessaires pour maintenir des conditions optimales pour la croissance des plantes. Il serait intéressant de poursuivre les recherches pour évaluer l'efficacité d'autres méthodes de refroidissement et leur impact sur les températures à l'intérieur de la serre.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Ce projet de Master présente les résultats d'une étude expérimentale portant sur un nouveau prototype de serre canarienne (échelle 1/50) équipé d'un système de refroidissement par évaporation utilisant des fibres de palmier dattier. Ce prototype a été conçu et installé sur la plateforme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa. Les résultats observés dans le prototype sont encourageants, démontrant que le système de refroidissement est capable d'éviter complètement la surchauffe de la serre pendant l'été. Cette technique représente donc la solution la plus adaptée pour créer des microclimats confortables ou acceptables dans des conditions ambiantes extrêmes.

Les fibres de palmier dattier se révèlent être un matériau alternatif efficace pour le refroidissement par évaporation en raison de leur grand potentiel et de leur capacité élevée de rétention d'eau, ainsi que de leur abondance, de leur faible coût, de leur caractère écologique et de leur longue durée de vie. Comparé aux autres matériaux étudiés dans la littérature, le PAD en fibres de palmier dattier se positionne comme un choix judicieux, offrant de meilleures performances dans les zones caractérisées par des conditions climatiques chaudes et sèches. En somme, il est évident que le nouveau système de refroidissement par évaporation est plus efficace lorsque les températures ambiantes sont élevées. De plus, il est très économe en énergie et n'émet aucun polluant dans l'environnement.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que ce système représente une alternative efficace aux systèmes de climatisation conventionnels, avec des coûts d'exploitation inférieurs, dans les régions au climat chaud et aride.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de Master ne constituent qu'une première étape dans l'étude des systèmes de refroidissement par évaporation intégrés dans le prototype de serre canarienne. Des travaux de recherche expérimentaux et théoriques supplémentaires devront donc être entrepris à l'avenir afin de réduire la température de la serre à des niveaux favorables à la croissance des plantes. Enfin, une étude expérimentale combinée à une simulation numérique s'avère également très utile pour optimiser le prototype de serre canarienne et permettre une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui se produisent.

Références

1. Soussi, M., et al., Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*, 2022. **12**(3): p. 626.
2. Davies, P.A. and C. Paton, The seawater greenhouse in the United Arab Emirates: Thermal modelling and evaluation of design options. *Desalination*, 2005. **173**(2): p. 103-111.
3. Davies, P.A., A solar cooling system for greenhouse food production in hot climates. *Solar Energy*, 2005. **79**(6): p. 661-668.
4. Amani, M., et al., Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, 2020. **181**: p. 115979.
5. Gorjian, S., et al., A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 2021. **285**: p. 124807.
6. Garnaud, F., et al. New field methods for a maximum lift gas efficiency through stability. in *European Production Operations Conference and Exhibition*. 1996. OnePetro.
7. DAHEM, M.E., et al., Développement & étude de raccordement des puits de la région de Gassi-Touil.
8. Clement, N.R. and J.M.J.B. Gould, Pyranine (8-hydroxy-1, 3, 6-pyrenetrisulfonate) as a probe of internal aqueous hydrogen ion concentration in phospholipid vesicles. 1981. **20**(6): p. 1534-1538.
9. Anonyme, A. (1987). Les Travaux de la Cellule 1. COURRIER DE LA CELLULE ENVIRONNEMENT INRA, 1(1).
10. Kechir, M. and H. Mahfoudi, Acquisition et transmission sur bus CAN des paramètres bioclimatiques d'une serre agricole. 2012, Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene USTHB.
11. Amouri, K., et al., Microstructure and mechanical properties of Al-nano/micro SiC composites produced by stir casting technique. 2016. **674**: p. 569-578.
12. Issam, S. Mémoire de Master.
13. Serres, T. (2016). Ordoliberalism beyond borders: The EU and Algeria's human capital. Robert Schuman Centre for Advanced Studies Research Paper No. RSCAS, 42.
14. Wells, C.M., Greenhouse Climate Control: an integrated approach: J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. Van de Braak (Editors) Wageningen Pers, Wageningen, 1995; 279 pp.; \$XX; ISBN 90-74134-17-3. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1997. **17**(3): p. 317-318.

15. Sultan, M., et al., Steady-state investigation of water vapor adsorption for thermally driven adsorption based greenhouse air-conditioning system. *Renewable Energy*, 2016. **86**: p. 785-795.
16. Vadiee, A. and V. Martin, Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(7): p. 5087-5100.
17. Mortensen, L.M., Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses. *Scientia Horticulturae*, 1987. **33**(1): p. 1-25.
18. Vox, G., et al., Sustainable greenhouse systems. *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*; Salazar, A., Rios, I., Eds, 2010: p. 1-78.
19. Drake, B.G., M.A. González-Meler, and S.P. Long, More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual review of plant biology*, 1997. **48**(1): p. 609-639.
20. Papisolomontos, A., W. Baudoin, and N. Litaladio, 1. Regional Working Group on Greenhouse Crop Production in the Mediterranean Region: History and development. *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops*, 2013. **46**(3): p. 1.
21. Möttus, M., et al., Photosynthetically active radiation: measurement and modeling, in *Solar energy*. 2013, Springer. p. 140-169.
22. Zhang, S., et al., Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 2020. **274**: p. 122695.
23. Yousefi, M.R., et al. A hybrid neuro-fuzzy approach for greenhouse climate modeling. in *2010 5th IEEE International Conference Intelligent Systems*. 2010.
24. Paraforos, D.S. and H.W. Griepentrog, Multivariable greenhouse climate control using dynamic decoupling controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013. **46**(18): p. 305-310.
25. van Beveren, P.J.M., et al., Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy*, 2015. **159**: p. 509-519.
26. Choab, N., et al., Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 2019. **191**: p. 109-137.
27. Sethi, V.P., On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 2009. **83**(1): p. 21-38.
28. Kacira, M., S. Sase, and L. Okushima, Effects of Side Vents and Span Numbers on Wind-Induced Natural Ventilation of a Gothic Multi-Span Greenhouse. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2004. **38**(4): p. 227-233.
29. Ganguly, A. and S. Ghosh, A review of ventilation and cooling technologies in agricultural greenhouse application. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 2011. **2**(1).

30. Santosh, D., et al., Micro climate control in greenhouse. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017. **6**(3): p. 1730-1742.
31. Kolokotsa, D., et al., Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses. *Energy Conversion and Management*, 2010. **51**(1): p. 155-168.
32. Kittas, C., M. Karamanis, and N. Katsoulas, Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 2005. **37**(8): p. 807-812.
33. Nikolaou, G., et al., Effects of cooling systems on greenhouse microclimate and cucumber growth under Mediterranean climatic conditions. *Agronomy*, 2019. **9**(6): p. 300.
34. Sethi, V.P. and S.K. Sharma, Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 2007. **81**(12): p. 1447-1459.
35. Sethi, V.P. and S.K. Sharma, Greenhouse heating and cooling using aquifer water. *Energy*, 2007. **32**(8): p. 1414-1421.
36. Albright, L.D. and M.L. Behle, An air-liquid-air heat exchanger for greenhouse humidity control. *Transactions of the ASAE*, 1984. **27**(5): p. 1524-1530.
37. Buchholz, M., Innovative technologies and practices to reduce water consumption. *Unlocking the Potential of Protected Agriculture in the Countries of the Gulf Cooperation Council—Saving Water and Improving Nutrition*, 2021: p. 85-95.
38. Maslak, K. and S. Nimmermark, Thermal energy use for dehumidification of a tomato greenhouse by natural ventilation and a system with an air-to-air heat exchanger. *Agricultural and Food Science*, 2017. **26**(1): p. 56-66.
39. Ganguly, A., D. Misra, and S. Ghosh, Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse. *Energy and Buildings*, 2010. **42**(11): p. 2036-2043.
40. Ghani, S., et al., Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2019. **12**(1): p. 48-70.
41. du Plessis, E., T. Workneh, and M. Laing, Greenhouse cooling systems and models for arid climate. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 18*, 2015: p. 181-215.
42. Ishii, M., et al. Effects of natural ventilation rate on temperature and relative humidity in a naturally ventilated greenhouse with high pressure fogging system. in *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant 1037*. 2013.
43. Ahmed, E.M., et al., Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. 2011. **18**(1): p. 45-51.

44. Kouchakzadeh, A. and A.J.A.E.I.C.J. Brati, The evaluation of bulk charcoal as greenhouse evaporative cooling pad. 2013. **15**(2): p. 188-193.
45. Aziz, R.A., et al., Comparison on cooling efficiency of cooling pad materials for evaporative cooling system. 2018. **1**: p. 61-68.
46. Ghoulem, M., et al., Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. 2019. **183**: p. 121-150.
47. Nada, S., et al., Experimental investigation of energy and exergy performance of a direct evaporative cooler using a new pad type. 2019. **203**: p. 109449.
48. Yıldız, G., et al., Exergy, sustainability and performance analysis of ground source direct evaporative cooling system. 2022. **31**: p. 101810.
49. Sellam, S.-H., et al., *Experimental performance evaluation of date palm fibers for a direct evaporative cooler operating in hot and arid climate*. 2022. **35**: p. 102119.
50. Abdullah, A.J.B. and Environment, *Experimental study of natural materials for an evaporative cooling design in hot-arid climate*. 2022. **207**: p. 108564.
51. Mahmood, D.M. and I.M.A.J.R.i.E. Aljubury, *Experimental investigation of a hybrid photovoltaic evaporative cooling (PV/EC) system performance under arid conditions*. 2022. **15**: p. 100618.
52. Khater, E.-S.J.A.o.A.S., Moshtohor, *Performance of Evaporative Cooling System As Influenced By Air Speed and Pad Height*. 2022. **60**(3): p. 711-728.
53. Gairaa, K., & Bakelli, Y. (2013). Solar energy potential assessment in the Algerian south area: Case of Ghardaïa region. *Journal of Renewable Energy*, 2013.
54. Zergoun, Y., et al., *Species composition, abundance and diversity of grasshoppers (Insecta: Orthoptera) in three date palm groves in the Mzab valley, Northern Sahara, Algeria*. 2018. **33**(10): p. 97-111.