



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et
Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

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

N°d'enregistrement

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

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Électromécanique

Spécialité: Maintenance industriel

Thème

Conception et analyse expérimentale d'un system de gestion
d'air de séchage pour un séchoir solaire indirect

Présenté par :

Krami Azeddine et Hachani Abdelhamid Rida

Soutenue publiquement le : 12/09/2023

Devant le jury composé de:

Mr. Faouzi Akermi	Maitre-assistant A	Univ. Ghardaïa	Président
Mr. Bachir Dadda	Maitre de recherche A	U.R.A.E.R	Examineur
Mr. Ahmed Badji	Doctorant	U.R.A.E.R	Examineur
Mr. Salah Bouhoun	Ingénieur de recherche	U.R.A.E.R	Encadreur
Mr. Abdelouahab Benseddik	Maitre de recherche A	U.R.A.E.R	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Abstract

This Master's thesis presents an exhaustive investigation on the design, development, and experimental analysis of an innovative air flow management system for an indirect solar dryer. The main objective of this research was to solve the problem of non-homogeneous drying of food within the drying cabinet of the solar dryer. To overcome this challenge, a sophisticated system was designed, implementing butterfly valves controlled by an Arduino board to alternately direct the airflow up and down the drying cabinet. The development of this solar dryer was carried out within the Applied Research Unit in Renewable Energies.

The results obtained are remarkable, highlighting the significant impact of this innovative solution on the homogeneity of drying. Data analysis reveals significantly reduced water content differences between shelves in the drying cabinet compared to a dryer without the valve management system. For example, the difference in water content between shelves 1 and 2 in the dryer equipped with the valve management system is zero (0%), while in the dryer without this system, it is 4.65%. Significantly, these differences are even greater between the shelves in the dryer without the system, going up to 62.79% between shelves 3 and 4, while they are considerably reduced, reaching 20.88% between the same shelves in the dryer with the system.

These results demonstrate the effectiveness of the proposed solution to solve the problem of drying homogenization in the drying cabinet. This promising advance offers considerable prospects for the application of this technology in the field of solar food drying. The work accomplished represents a significant contribution to research in renewable energies and paves the way for future innovations in this constantly evolving field.

Keywords: Indirect solar dryer, Arduino, experimental analysis, design and development, airflow, solar energy.

Résumé

Ce mémoire de Master présente une enquête exhaustive sur la conception, le développement, et l'analyse expérimentale d'un système novateur de gestion du flux d'air destiné à un séchoir solaire indirect. L'objectif principal de cette recherche a été de résoudre le problème du séchage non homogène des aliments au sein de la chambre de séchage du séchoir solaire. Pour surmonter ce défi, un système sophistiqué a été conçu, mettant en œuvre des vannes papillon contrôlées par une carte Arduino pour diriger alternativement le flux d'air vers le haut et vers le bas de l'armoire de séchage. La mise au point de ce séchoir solaire a été réalisée avec minutie au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables.

Les résultats obtenus sont remarquables, mettant en évidence l'impact significatif de cette solution innovante sur l'homogénéité du séchage. L'analyse des données révèle des différences de teneur en eau entre les étagères de l'armoire de séchage nettement réduites par rapport à un séchoir sans le système de gestion des vannes. Par exemple, la différence de teneur en eau entre les étagères 1 et 2 dans le séchoir équipé du système de gestion des vannes est nulle (0 %), tandis que dans le séchoir sans ce système, elle est de 4.65 %. De manière significative, ces différences sont encore plus importantes entre les étagères dans le séchoir sans le système, allant jusqu'à 62.79 % entre les étagères 3 et 4, tandis qu'elles sont considérablement réduites, atteignant 20.88 % entre les mêmes étagères dans le séchoir avec le système.

Ces résultats démontrent l'efficacité de la solution proposée pour résoudre le problème de l'homogénéisation du séchage dans l'armoire de séchage. Cette avancée prometteuse offre des perspectives considérables pour l'application de cette technologie dans le domaine du séchage solaire des aliments. Le travail accompli représente une contribution significative à la recherche en énergies renouvelables et ouvre la voie à de futures innovations dans ce domaine en constante évolution.

Mots-clefs : Séchoir solaire indirect, Arduino, analyse expérimentale, conception et développement, flux d'air, énergie solaire.

ملخص

تقدم مذكرة التخرج هذه دراسة شاملة لتصميم، تطوير وتحليل تجريبي لنظام إدارة تدفق الهواء المبتكر للمجفف الشمسي غير المباشر. كان الهدف الرئيسي من هذا البحث هو حل مشكلة التجفيف غير المتجانس للأغذية داخل غرفة التجفيف بالمجفف الشمسي. للتغلب على هذا المشكلة، تم تصميم نظام متطور، حيث يتم تنفيذ صمامات فراشة يتم التحكم فيها بواسطة لوحة Arduino لتوجيه تدفق الهواء بالتناوب لأعلى ولأسفل خزانة التجفيف. لقد تم تطوير هذا المجفف الشمسي بدقة متناهية ضمن وحدة الأبحاث التطبيقية في الطاقات المتجددة.

النتائج التي تم الحصول عليها جيدة، مما يسלט الضوء على التأثير الكبير لهذا الحل المبتكر على تجانس التجفيف. يكشف تحليل البيانات عن انخفاض كبير في اختلافات محتوى الماء بين الرفوف في خزانة التجفيف مقارنة بالمجفف الذي لا يحتوي على نظام إدارة الصمامات. على سبيل المثال، الفرق في محتوى الماء بين الرفين 1 و 2 في المجفف المجهز بنظام إدارة الصمام هو صفر (0%)، بينما في المجفف بدون هذا النظام يكون 4.65%. ومن الجدير بالذكر أن هذه الاختلافات أكبر بين الرفوف في المجفف بدون النظام، حيث تصل إلى 62.79% بين الرفين 3 و 4، في حين تقل بشكل كبير، حيث تصل إلى 20.88% بين نفس الرفوف في المجفف مع النظام.

توضح هذه النتائج فعالية الحل المقترح لحل مشكلة تجانس التجفيف في خزانة التجفيف. يوفر هذا التقدم الواعد أفاقاً كبيرة لتطبيق هذه التكنولوجيا في مجال تجفيف الطعام بالطاقة الشمسية. يمثل العمل المنجز مساهمة كبيرة في البحث في مجال الطاقات المتجددة وبمهد الطريق للابتكارات المستقبلية في هذا المجال المتطور باستمرار..

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي غير مباشر، الأردوينو، تحليل تجريبي، تصميم وتطوير، تدفق الهواء، الطاقة الشمسية.

Remerciement :

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude, en particulier à Dieu tout-puissant, pour nous avoir dotés de la détermination, de la santé robuste et de la résilience nécessaires tout au long de notre parcours académique pour parvenir à cet accomplissement. Notre gratitude s'étend également à nos parents qui nous ont soutenus. Cette étape a pu être franchie grâce au soutien et à la motivation de nombreuses personnes. En quelques mots, nous souhaitons leur adresser nos remerciements les plus sincères. Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude à nos professeurs de mémoire de maîtrise, les professeurs **Abdel Wahab BenSeddik** et **Bouhoun Salahi** et **Ahmed Badji**, pour nous avoir fait l'honneur de nous confier ce travail important dans le cadre de nos efforts académiques et de recherche. En outre, nous adressons nos sincères remerciements et notre reconnaissance à des personnes telles que "**Mahfoud ben Abderrahman**", "**Kharrafi Mohammad Abdel Basset**", "**Ahmed Badji**" et "**Djamal Daoud**", qui nous ont apporté une aide inestimable tout au long de ce projet. En outre, nous tenons à remercier l'équipe dévouée du Laboratoire de l'énergie et des systèmes agricoles pour son soutien continu et les efforts qu'elle a déployés pour nous aider à atteindre nos objectifs de recherche.*

Dédicace :

Trouver un mot ou une phrase pour exprimer le profond sentiment d'appréciation et de gratitude que je ressens est un défi

- ❖ *à mes parents bien-aimés, qui m'ont toujours apporté tout le soutien nécessaire à mes projets et à mon parcours éducatif, ainsi que leur affection et leur empathie inébranlables.*
- ❖ *À mes frères et sœurs chéris, dont l'aide m'a été précieuse.*
 - ❖ *À tous mes amis et camarades de classe de la spécialisation en énergies renouvelables.*
- ❖ *Aux membres dévoués de l'équipe URAER à Ghardaïa.*

Table des matières

IX	Table de Figures	
1.....	Introduction générale	
4.....	Généralités sur les séchoirs	1
4.....	Séchage :	1.1
4.....	Définition :	1.1.1
4.....	Historique :	1.1.2
5.....	Domaines d'utilisations :	1.1.3
6.....	Mécanisme de séchage :	1.1.4
	Principe de fonctionnement du	1.1.5
	6	séchoir solaire :
7.....	Classification des séchoirs solaires :	1.2
7.....	Les séchoirs solaires naturels :	1.2.1
8.....	Les séchoirs solaires directs :	1.2.2
8.....	Les séchoirs solaires indirects :	1.2.3
9.....	Les séchoirs solaires mixtes :	1.2.4
9.....	Les séchoirs solaires hybrides :	1.2.5
	Séchoirs solaires à	1.2.6
	10	convection naturelle (séchoirs passifs) :
	Séchoirs solaires à	1.2.7
	10	convection forcée (séchoirs actifs) :
	Phénomènes qui se produisant au	1.3
	11	cours du séchage :
11.....	Réaction biochimique :	1.3.1
11.....	Phénomènes mécaniques :	1.3.2
12.....	Transfert physique :	1.3.3
12.....	Terminologie de séchage :	1.4
12.....	Humidité:	1.4.1

12.....	Taux d'humidité :	1.4.2
12.....	États de siccité :	1.4.3
12.....	Taux d'humidité à l'équilibre :	1.4.4
Les paramètres influents sur la		1.5
12	cinétique de séchage :	
13 Influence de la température de l'air (Ta) :		1.5.1
13..... Influence de l'humidité de l'air (Ha) :		1.5.2
Influence de la vitesse de l'air de		1.5.3
13	séchage (Va) :	
13.... Influence de taux de recyclage de l'air :		1.5.4
13..... Le calibre du produit à sécher :		1.5.5
Influence de L'épaisseur du		1.5.6
13	produit à sécher (Ep) :	
14.....	Les modes de séchage :	1.6
14.....	Séchage Thermique :	1.6.1
16.....	Séchage non thermiques :	1.6.2
Les avantages et Inconvénients du séchage :		1.7
16		
16.....	Les avantages :	1.7.1
17.....	Les inconvénients :	1.7.2
19 État de l'art sur les séchoirs solaires indirect :		2
32.....	Matériel et méthode :	3
32.....	Introduction	3.1
32.....	Montage expérimentale :	3.2
33.....	Le séchoir solaire	3.2.1
38.....	Système d'acquisition :	3.2.2
43.....	Le système de control	3.2.3
46.....	Protocole de séchage :	3.2.4

48.. Acquisition de données de température :	3.2.5
49.... Gestion et contrôle de l'air de séchage :	3.2.6
50..... Conclusion :	3.3
52..... Résultats et discussions :	4
52..... Description de la zone d'étude :	4.1
Différentes	4.2
54 positions des thermocouples dans les chambres de séchage :	
Performance	4.3
54 thermique de deux séchoirs solaires indirects sans produits:	
Différentes positions du thermocouple dans le collecteur :.....	4.3.1
57.....	
Performance thermique des deux	4.3.2
58 capteurs solaires :	
Séchage de tomates	4.4
60 dans deux modèles de séchoir solaire indirect :	
Cinétique de séchage des	4.4.1
60 tomates au 16 juillet 2023 :	
62..... Discussion des Résultats	4.5
65..... Conclusion et les perspectives	5
67..... Références	

Table de Figures

Figure 1.1 1Séchage solaire direct des abricots sur une surface extérieure de béton ...	7
Figure 1.2 Le principe d'un séchoir solaire direct	8
Figure 1.3 Le principe d'un séchoir solaire indirect.	9
Figure 2.1 Schéma de l'installation expérimental	19
Figure 2.2 (a) Un absorbeur à plaque plate avec stockage thermique sécheur solaire convectif naturel,(b) Vue intérieure d'un séchoir montrant le stockage thermique et les plateaux de séchage en lit compact de PCM.....	20
Figure 2.3 Vue schématique d'un absorbeur à plaques flat avec stockage thermique dans un séchoir solaire à convection naturelle.....	20
Figure 2.4 Dispositif expérimental (a) vue schématique ; (b) vue picturale	21
Figure 2.5 Schéma de l'installation expérimentale.....	22
Figure 2.6 Vue photographique du séchage du fenugrec a dans un séchoir solaire indirect à convection forcée et en plein soleil, b vue intérieure du séchoir solaire indirect.....	23
Figure 2.7 (a) Schéma d'un séchoir solaire indirect avec la configuration considérée dans cette étude et (b) volume de contrôle dans la chambre de séchage.....	24
Figure 2.8 a) Vue schématique du dispositif expérimental ; b) Capteur solaire plan.	25
Figure 2.9 Sécheur solaire indirect (ITSD) avec surface d'absorption ondulée en V couplée à un conduit trapézoïdal.....	26
Figure 2.10 (a) Séchoir solaire indirect passif avec cheminée et (b) séchoir solaire indirect avec cheminée - trois parties principales	26
Figure 2.11 Principales parties du séchoir solaire : (a) le capteur solaire expérimental (sans couvercle) et (b) la chambre de séchage.....	27
Figure 2.12 a) Représentation schématique 3D symétrique des différents composants du séchoir solaire ; b) Représentation 3D symétrique du domaine d'écoulement avec indication des conditions aux limites (toutes les dimensions sont exprimées en mètres).	28
Figure 2.13 Vue schématique du séchoir solaire utilisé pour la modélisation et de ses pièces	29
Figure 2.14 (a) Laine d'aluminium, (b) Absorbeur tubulaire, (c) Absorbeur tubulaire modifié.....	29
Figure 2.15 photo d'un système de séchage solaire indirect.....	30

Figure 2.16 Schéma du séchoir solaire indirect actif.	30
Figure 3.1 Vue générale du séchoir solaire proposé	32
Figure 3.2 Schéma illustratif du support des capteurs solaires.....	34
Figure 3.3 Capteur d'absorption solaire.....	35
Figure 3.4 Photographie d'une armoire de séchage avec 4 étagères	36
Figure 3.5 Les conduites et le système de gestion de l'air.....	37
Figure 3.6 Ventilateur 4715MS-23T-B5A	38
Figure 3.7 Système d'acquisition et de traitement des données par Keithley 2701	38
Figure 3.8 Armoire d'acquisition	39
Figure 3.9 Unité d'acquisition Keithly 2701.....	40
Figure 3.10 Unité d'acquisition Keithly 2701.....	41
Figure 3.11 Thermocouple type K	41
Figure 3.12 Boîte de jonctions	42
Figure 3.13 Capteur RTD PT100.....	43
Figure 3.14 schéma général du système de contrôle par Arduino avec programme proteus 8.0.....	44
Figure 3.15 La carte ArduinoMega 2560	45
Figure 3.16 La constitution de la carte Arduino MEGA 2560	45
Figure 3.17 a- Vanne motorisée avec un moteur pas à pas b-Moteur pas à pas 28BYJ-48 avec son circuit drive.....	46
Figure 3.18 Figure 3- 18 schéma représentant le protocole de séchage du tomate	48
Figure 3.19 Algorithme de gestion du séchoir implémenté dans Arduino	49
Figure 4.1 Photographie de la plate-forme d'expérimentation d'URAER.....	52
Figure 4.2 Situation géographique de la province de Ghardaïa.....	53
Figure 4.3 Figure IV.3 Différentes positions des thermocouples dans les chambres de séchage des séchoirs solaires de type indirect. (a) sans système de la gestion des vannes, (b) muni de système de la gestion des vannes.....	54
Figure 4.4 courbe thermique de la chambre de séchage d'un séchoir sans système de la gestion des vannes.....	55
Figure 4.5 Courbe thermique de la chambre de séchage d'un séchoir muni de système de la gestion des vannes.....	56
Figure 4.6 Différentes positions des thermocouples dans le capteur pour les deux modèles de séchoir solaire de type indirect à plaque galvanisée. (a) amélioré, (b) simple	57

Figure 4.7 Courbe thermique pour un capteur solaire simple	58
Figure 4.8 Courbe thermique pour un capteur solaire améliorer	59
Figure 4.9 Variation de la teneur en eau dans le temps pour les tomates.....	61
Figure 4.10 Variation de la teneur en eau dans le temps pour les tomates.....	62

Introduction

Générale

Introduction générale

Contexte

Alors que la population mondiale continue d'augmenter, la demande de technologies durables de conservation et de transformation des aliments devient de plus en plus pressante. Le séchage solaire, alimenté par l'abondante ressource énergétique du soleil, présente une solution viable et respectueuse de l'environnement à ce défi. Cependant, le succès du séchage des produits alimentaires dans les séchoirs solaires se heurte souvent à un obstacle important : un séchage non homogène.

Le séchage non homogène fait référence à une répartition inégale de l'air de séchage et de la température dans la chambre de séchage. Ce phénomène peut conduire à des vitesses de séchage incohérentes et à une qualité de produit final sous-optimale. Dans le contexte du séchage solaire, qui repose sur la nature intermittente de la lumière solaire, il est primordial de remédier au séchage non homogène pour garantir l'efficacité et l'efficacité du processus de séchage.

Énoncé du problème

L'objectif de ce mémoire de Master est d'aborder le problème du séchage non homogène des produits alimentaires dans la chambre de séchage d'un séchoir solaire indirect. La répartition inégale de l'air et de la température de séchage a été identifiée comme un goulot d'étranglement majeur dans l'utilisation efficace de l'énergie solaire à des fins de séchage.

Solution proposée

En réponse à ce défi, ce projet de Master propose une solution de pointe : un système de gestion du flux d'air de séchage qui peut alterner de manière efficace et dynamique la direction du flux d'air entre le haut et le bas de l'armoire de séchage. Ce système est contrôlé par des vannes papillon, elles-mêmes gérées par une carte Arduino. L'approche innovante vise à obtenir un environnement de séchage plus uniforme au sein de la chambre, améliorant ainsi l'efficacité globale du séchage et la qualité des produits alimentaires séchés.

Objectifs de la recherche

- ✓ Concevoir et développer un nouveau système de gestion du flux d'air de séchage pour un séchoir solaire indirect.
- ✓ Construire un prototype de séchoir solaire équipé du nouveau système de gestion du flux d'air gérées par une carte Arduino.
- ✓ Mener une série d'expériences complètes pour évaluer les performances et l'efficacité du système.
- ✓ Analyser les résultats expérimentaux pour évaluer l'efficacité du système à obtenir un séchage homogène

Importance de la recherche

La mise en œuvre réussie de ce système de gestion du flux d'air de séchage a le potentiel de révolutionner la technologie de séchage solaire. En atténuant les défis associés au séchage non homogène, cela peut améliorer considérablement l'efficacité et la fiabilité des séchoirs solaires. Cela contribuera à son tour à la préservation durable des ressources alimentaires, à la réduction du gaspillage alimentaire et à l'autonomisation des communautés des régions ayant un accès limité aux sources d'énergie conventionnelles.

Structure de la thèse

Cette thèse est organisée en plusieurs chapitres, chacun abordant différents aspects de la recherche. Le chapitre 1 donne un aperçu de la problématique et des objectifs de la recherche, tandis que le chapitre 2 passe en revue la littérature pertinente et les travaux antérieurs dans le domaine. Les chapitres suivants approfondissent la conception et le développement du système de gestion du flux d'air de séchage, la configuration et les méthodologies expérimentales, ainsi que l'analyse des résultats expérimentaux. La thèse se termine par une discussion des résultats, de leurs implications et des pistes potentielles pour des recherches futures.

Chapitre 1

Généralités sur les séchoirs

Généralités sur les séchoirs

1 Généralités sur les séchoirs

1.1 Séchage :

1.1.1 Définition :

Le séchage est un processus qui implique l'élimination de l'eau d'une substance humide par évaporation. Cette substance peut être à l'état solide ou liquide au départ, mais le résultat final est un produit solide. Le séchage se distingue ainsi de la concentration des liquides par évaporation, qui aboutit à un liquide concentré. Tout au long du processus de séchage, l'eau présente dans le matériau se dissipe progressivement dans l'air ambiant grâce à deux mécanismes : l'évaporation et la diffusion. L'apparition de ces phénomènes dépend des propriétés du gaz impliqué, comme (l'air ou la vapeur surchauffée) environnant à savoir[1]:

- Sa température.
- Son humidité relative.
- Sa vitesse.
- Sa pression.
- Débit

1.1.2 Historique :

Le séchage est une méthode ancestrale de conservation de divers produits agricoles et alimentaires tels que les céréales, les graines, le fourrage, la viande et le poisson séchés, les figues et les noix. Il est également utilisé dans la production de matériaux tels que les briques d'argile séchées, les céramiques et les poteries avant cuisson, ainsi que pour les textiles, y compris les processus de lavage et de teinture, et le traitement des peaux. Dans ces applications traditionnelles, le séchage "naturel" à l'air ambiant reste largement pratiqué, tandis que le séchage "artificiel" avec apport d'énergie n'est qu'une technique complémentaire parmi d'autres. Le séchage artificiel offre des avantages tels qu'une plus grande régularité face à des conditions météorologiques imprévisibles ou la création de nouveaux produits et services, tels que le lait ou le café secs instantanés et les pâtes sèches de longue durée[2].

Généralités sur les séchoirs

1.1.3 Domaines d'utilisations :

Industrie agroalimentaire :

Le séchage joue un rôle crucial dans la production et la conservation de nombreux produits alimentaires.

Il s'agit d'un processus courant utilisé pour éliminer l'humidité des produits alimentaires.

L'objectif du séchage peut varier : il peut s'agir d'une étape essentielle dans la production du produit alimentaire ou d'un moyen de le conserver.

Dans l'industrie alimentaire, il existe moins de 200 types distincts de séchoirs industriels utilisés à cette fin. On peut citer par exemple :

- ✓ les pâtes alimentaires
- ✓ le sucre cristallisé est obtenu par évaporation
- ✓ les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation
- ✓ le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché
- ✓ jusqu'à devenir du sel raffiné.
- ✓ Certains produits en poudre : cacao, lait.

Industrie papetière :

Le papier est produit en séchant la pâte à papier sur des rouleaux chauffés qui tournent.

Industrie du bois :

Le bois fraîchement abattu et scié contient généralement une quantité importante d'humidité, ce qui le rend impropre à une utilisation immédiate en raison du risque de changements dimensionnels et de déformations du bois[3]

Matériaux de construction

- Briques, carrelages...

Généralités sur les séchoirs

L'industrie céramique :

- assiettes, bols, plats...

La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique[4]:

- levure en poudre
- antibiotiques
- séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage.
- séchage des noyaux qui assurent l'élaboration des formes intérieures des pièces Ob- tenues par moulage.

1.1.4 Mécanisme de séchage :

Pour faciliter le processus de séchage, il est essentiel d'introduire de l'air chaud et sec dans l'environnement du produit. Cela permet un échange de chaleur et d'humidité entre l'air et le produit humide. L'air chauffé transfère une partie de son énergie thermique au produit, ce qui fait que la surface du produit a une pression partielle d'eau plus élevée que celle de l'air de séchage. Par conséquent, la matière est transférée de la surface solide à l'air de séchage. Par conséquent, deux facteurs cruciaux doivent être contrôlés pour gérer efficacement les processus de séchage[5]:

- 1) Le transfert de chaleur est nécessaire pour fournir la quantité de chaleur latente nécessaire à la vaporisation.
- 2) L'eau ou la vapeur d'eau se déplace à travers le produit humide afin de l'extraire des produits.

1.1.5 Principe de fonctionnement du séchoir solaire :

Les principes sous-jacents utilisés dans un séchoir solaire peuvent être résumés comme suit[6] :

- Conversion de la lumière en chaleur : Un séchoir solaire utilise une surface noire pour améliorer l'efficacité de la conversion de la lumière du soleil en chaleur.
- Rétention de la chaleur : L'air à l'intérieur du séchoir est séparé de l'environnement extérieur pour assurer une rétention efficace de la chaleur. Pour ce faire, on utilise un matériau solide transparent, tel qu'un sac en

Généralités sur les séchoirs

plastique ou un couvercle en verre, qui laisse pénétrer la lumière du soleil tout en retenant la chaleur convertie à l'intérieur.

- Égalisation de la température : La conception du séchoir solaire permet de maintenir des températures constantes, quelles que soient les conditions extérieures, y compris les jours froids, venteux ou chauds.
- Transfert de chaleur vers les aliments : les sécheurs à convection naturelle et les sécheurs à convection forcée utilisent le mouvement de l'air chauffé pour transférer la chaleur vers les aliments à sécher.
- En résumé, un séchoir solaire maximise la conversion de la lumière en chaleur, piège et retient la chaleur générée, assure des températures uniformes et utilise le transfert de chaleur par convection pour sécher efficacement les aliments.

1.2 Classification des séchoirs solaires :

Les sécheurs solaires sont généralement classés en différents groupes en fonction de leurs méthodes de chauffage ou de fonctionnement en plusieurs catégories [7]:

- Les séchoirs naturels
- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes.

1.2.1 Les séchoirs solaires naturels :

La méthode traditionnelle de séchage, également appelée séchage à l'air, est une technique de conservation des aliments largement pratiquée et durable dans de nombreux pays. Sa popularité tient à sa simplicité et à l'abondance du rayonnement solaire. Le séchage à l'air est reconnu comme l'une des méthodes les plus anciennes et les plus répandues de conservation des aliments, permettant un stockage de longue durée de divers produits alimentaires[8].



Figure 1.1 Séchage solaire direct des abricots sur une surface extérieure de béton

Généralités sur les séchoirs

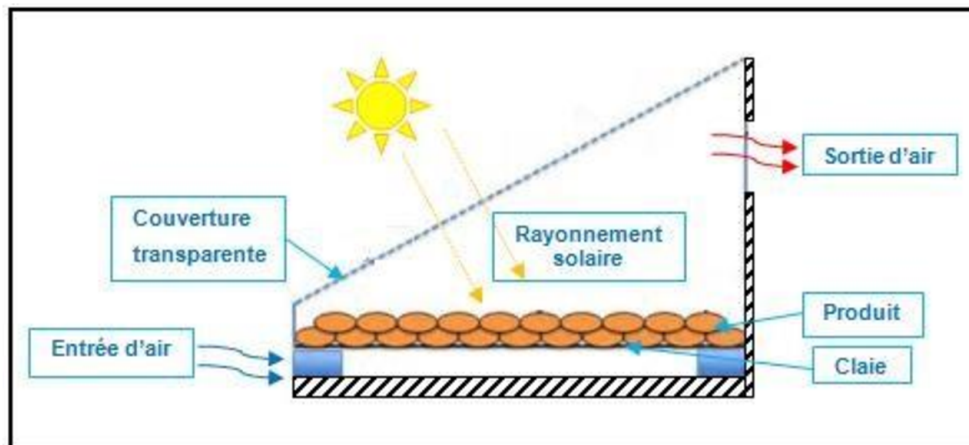


Figure 1.2 Le principe d'un séchoir solaire direct

1.2.2 Les séchoirs solaires directs :

Ces séchoirs utilisent l'exposition directe du produit aux rayons du soleil. Ils se caractérisent par leur simplicité, car ils se composent d'une seule unité servant à la fois de chambre de séchage et de capteur solaire. La conception de ces séchoirs peut varier en fonction de facteurs tels que le type de produit et les exigences en matière de capacité de séchage. Le modèle le plus courant est un séchoir solaire doté d'une surface transparente inclinée, positionnée à un angle spécifique en fonction de son emplacement et généralement orientée vers le sud (comme le montre la Figure 1.2). La chaleur est générée par le produit lui-même grâce à l'absorption du rayonnement solaire, facilitée par la surface transparente qui recouvre la chambre de séchage[9].

1.2.3 Les séchoirs solaires indirects :

Cette conception de séchoir solaire est considérée comme la plus ancienne et comprend deux composants principaux : un collecteur solaire avec un couvercle transparent au sommet et une unité de séchage avec un couvercle opaque également au sommet. Ces composants sont connectés de manière séquentielle, comme le montre la Figure 1.3. Dans l'armoire de séchage, la récolte est placée en une couche relativement fine qui recouvre l'ensemble de l'armoire. L'air nécessaire au séchage est généré en le chauffant dans un collecteur solaire plat de base. Cet air chauffé s'élève ensuite naturellement à travers la couche de culture en raison des différences de température, créant des forces de flottabilité et facilitant le processus de séchage[9, 10].

Généralités sur les séchoirs

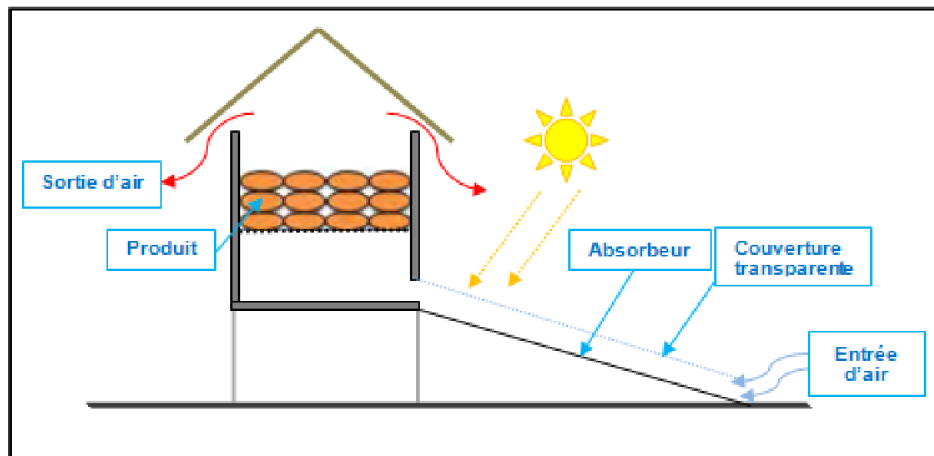


Figure 1.3 Le principe d'un séchoir solaire indirect.

1.2.4 Les séchoirs solaires mixtes :

La chaleur nécessaire au séchage dans ces séchoirs provient du double effet du rayonnement solaire direct sur les produits et de l'utilisation d'air préchauffé dans des collecteurs. Les processus impliqués dans les transferts de chaleur et de vapeur d'eau dans ces séchoirs sont complexes et encore relativement peu connus.

1.2.5 Les séchoirs solaires hybrides :

Outre l'énergie solaire, ces séchoirs intègrent des sources d'énergie auxiliaires telles que le mazout, l'électricité ou le bois pour assurer un chauffage ou une ventilation efficace de l'air.

Dans ce cas, l'énergie solaire est souvent utilisée pour préchauffer l'air.

Ces systèmes relativement plus coûteux sont généralement réservés aux applications commerciales ou à grande échelle, où la qualité et le rendement du produit final ne dépendent pas des conditions météorologiques.

Les techniques de séchage couramment utilisées dans les applications industrielles sont les suivantes[11]:

- ✓ Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- ✓ Le séchage à la vapeur surchauffée.
- ✓ Le séchage par pompe à chaleur.

Généralités sur les séchoirs

- ✓ Le séchage par chambre chaude.
- ✓ Le séchage sous vide.

1.2.6 Séchoirs solaires à convection naturelle (séchoirs passifs) :

Les séchoirs solaires passifs fonctionnent uniquement à l'énergie solaire et ne nécessitent pas de circulation d'air mécanique. Ils sont appelés sécheurs passifs, par opposition aux sécheurs actifs qui utilisent des moyens mécaniques pour faire circuler l'air. Dans ces séchoirs, l'air est chauffé par l'énergie solaire et circule naturellement à travers ou autour du produit à sécher, sous l'effet de la force de flottaison ou de la pression du vent, individuellement ou en combinaison. Ces séchoirs sont particulièrement utiles dans les zones rurales. Ils offrent des performances supérieures et améliorent considérablement la qualité du séchage par rapport au séchage en plein soleil. Voici quelques avantages des séchoirs solaires à convection naturelle par rapport aux méthodes de séchage en plein soleil.

- Une surface de séchage plus petite est nécessaire pour sécher un volume équivalent de produit.
- La qualité des produits séchés est améliorée car ils sont protégés de la lumière directe du soleil, des insectes et des champignons.
- Des taux de séchage plus rapides permettent d'augmenter la production.
- Les produits séchés à l'énergie solaire ont une valeur commerciale plus élevée que les produits séchés à l'air libre, en particulier pour la consommation locale.

1.2.7 Séchoirs solaires à convection forcée (séchoirs actifs) :

Un séchoir solaire actif utilise principalement l'énergie solaire comme source de chaleur, mais incorpore des ventilateurs motorisés et/ou des pompes pour la circulation forcée de l'air de séchage. L'énergie solaire est utilisée seule ou en combinaison avec l'électricité et les combustibles fossiles pour chauffer l'air de séchage, les ventilateurs électriques facilitant la circulation de l'air. Par conséquent, le transfert de chaleur dans ces séchoirs se fait principalement par convection forcée. La disponibilité de différents systèmes de chauffage de l'air dans les séchoirs à convection forcée accroît leur flexibilité, même lorsque l'énergie solaire n'est pas accessible. Lorsque l'énergie solaire est abondante, elle peut être utilisée exclusivement pour la déshydratation ou servir de chaleur d'appoint en utilisant des

Généralités sur les séchoirs

chauffages électriques ou des combustibles fossiles. Cette chaleur d'appoint permet d'atténuer les effets de la fluctuation de la production d'énergie des capteurs solaires, qui peut parfois entraîner une prolifération microbienne lorsque la chaleur solaire n'est pas disponible. Les systèmes de séchage qui intègrent ce mécanisme de chauffage auxiliaire sont appelés sécheurs solaires hybrides. Les sécheurs solaires à convection forcée peuvent être classés en trois grandes catégories : les sécheurs intégraux, les sécheurs distribués et les sécheurs mixtes. Les sécheurs actifs intégraux intègrent le capteur solaire dans le toit et/ou les murs de la chambre de séchage/stockage. Dans un séchoir solaire actif distribué, le capteur solaire et la chambre de séchage sont des unités séparées. Les sécheurs de type mixte, bien que moins courants, combinent certaines caractéristiques des modèles intégral et distribué[4].

1.3 Phénomènes qui se produisant au cours du séchage :

La dynamique de l'eau et des autres composants interagit en fonction de leur mobilité, ce qui entraîne des réactions, des changements physiques et des événements mécaniques au cours des processus de séchage, de stockage et de consommation.

1.3.1 Réaction biochimique :

Ces interactions englobent toute une série de phénomènes, notamment les réactions de Maillard, l'oxydation des vitamines et des graisses, la dénaturation des protéines et les réactions enzymatiques.

1.3.2 Phénomènes mécaniques :

Pour maintenir la qualité du produit final, il est essentiel de conduire le processus de séchage en préservant ses caractéristiques intrinsèques. Les phénomènes mécaniques inhérents au séchage entraînent souvent des modifications dans la plupart des produits agroalimentaires:

- ✓ Les phénomènes de migration de solutés vers la surface;
- ✓ Migration de matière Grasse;
- ✓ Le croutage, les fissures;
- ✓ Les déformations.

Généralités sur les séchoirs

1.3.3 Transfert physique :

Au cours du processus de séchage, les produits agroalimentaires subissent diverses modifications, notamment la réduction de l'activité de l'eau, l'apparition de la transition vitreuse, la fonte des graisses, l'évaporation des constituants volatils et la migration ou la rétention des composés volatils.

1.4 Terminologie de séchage :

1.4.1 Humidité:

Ce terme décrit l'humidité ou le liquide présent dans une substance solide, liquide ou pâteuse qui doit être éliminé lors de la procédure de séchage.

1.4.2 Taux d'humidité :

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

1.4.3 États de siccité :

Un corps sec ou séché est typiquement le résultat obtenu par le processus de séchage, mais il n'a pas nécessairement une teneur en humidité nulle.

1.4.4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Lorsqu'un objet humide est introduit dans une enceinte spacieuse dont la température et l'humidité relative sont constantes, sa teneur en humidité atteint un état stable appelé valeur d'équilibre. Cette valeur est influencée par plusieurs facteurs, notamment les propriétés de l'humidité et du matériau qu'elle traverse, ainsi que la température et la pression partielle à l'intérieur de l'enceinte[12].

1.5 Les paramètres influents sur la cinétique de séchage :

- ✓ Température de l'air de séchage (T_a)
- ✓ Humidité relative de l'air de séchage (H_r)
- ✓ La vitesse de l'air de séchage (V_a)
- ✓ Le taux de recyclage de l'air de séchage
- ✓ Le calibre du produit à sécher
- ✓ L'épaisseur du produit à sécher (E_p)

Généralités sur les séchoirs

1.5.1 Influence de la température de l'air (T_a) :

La température de l'air de séchage joue un rôle important dans la détermination de la vitesse du processus de séchage. Cette influence peut être attribuée à deux facteurs. Premièrement, l'apport de chaleur au produit augmente lorsque la température de l'air est plus élevée, ce qui favorise un séchage plus rapide. Deuxièmement, la température du produit lui-même augmente en raison de la température plus élevée de l'air, ce qui renforce encore le processus de séchage. Par conséquent, la conductivité de l'eau à l'intérieur du produit devient plus prononcée et contribue à la vitesse de séchage globale[13].

1.5.2 Influence de l'humidité de l'air (H_a) :

La teneur en humidité de l'air a un impact significatif sur la cinétique de séchage de produits spécifiques. Cette influence est particulièrement prononcée au début du processus de séchage et diminue progressivement à mesure que la température de l'air augmente.

1.5.3 Influence de la vitesse de l'air de séchage (V_a) :

La vitesse de l'air a un effet bénéfique sur la cinétique de séchage, en particulier dans les premières phases du processus. Toutefois, pour les produits dont la cinétique de séchage est principalement régie par la migration interne de l'eau, l'impact de la vitesse de séchage de l'air devient minime[14].

1.5.4 Influence de taux de recyclage de l'air :

Le recyclage joue un rôle crucial dans les opérations de séchage car, malgré une humidité plus élevée, l'air sortant du séchoir conserve une température plus élevée.

1.5.5 Le calibre du produit à sécher :

La vitesse de déshydratation est influencée par la vitesse de diffusion intracellulaire de l'eau, qui dilue le jus cellulaire. Cette vitesse de diffusion dépend à son tour de l'épaisseur du fruit. Les caractéristiques de séchage des dattes dépendent de leurs caractéristiques morphologiques spécifiques. Par conséquent, afin de simuler les conditions réelles des dattes dans l'industrie, le fruit entier est utilisé.

1.5.6 Influence de L'épaisseur du produit à sécher (E_p) :

Lorsque l'épaisseur d'un matériau augmente, la vapeur d'eau doit parcourir une plus grande distance, ce qui ralentit considérablement la vitesse de séchage[14].

Généralités sur les séchoirs

1.6 Les modes de séchage :

1.6.1 Séchage Thermique :

❖ Au soleil

Le séchage au soleil a gagné en popularité dans les régions arides et semi-arides où règnent des conditions climatiques favorables, telles qu'un ensoleillement important, de faibles précipitations et une faible humidité. Cette méthode consiste à sécher les produits directement sur le sol, sur des nattes, sur des rochers plats ou sur les toits.

Cette approche présente deux avantages principaux pour les communautés : une main-d'œuvre minimale et l'absence d'investissement. Cependant, elle donne souvent des résultats médiocres. Les produits sont susceptibles d'être contaminés par le sable et la poussière, ainsi que par les attaques d'animaux, d'insectes et de micro-organismes, ce qui entraîne des pertes importantes. En outre, un séchage inadéquat peut entraîner une détérioration, soit par un séchage excessif, soit par un séchage insuffisant, ce qui compromet gravement la qualité globale des produits.

❖ Séchage à l'air libre :

Le séchage à l'air se fait à l'ombre avec une circulation d'air naturelle. La température moyenne à l'intérieur de la chambre de séchage est maintenue à $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Le processus de séchage est principalement régi par la convection naturelle.

❖ Séchage par entraînement :

Lorsqu'un produit humide est exposé à un flux de gaz suffisamment chaud et sec, généralement de l'air, une disparité de température et de pression partielle apparaît. Cette disparité a deux objectifs :

Le gaz fournit au produit l'énergie nécessaire à sa vaporisation.

L'eau s'évapore sans atteindre le point d'ébullition en raison du gradient de pression partielle de l'eau.

La conduction et la convection facilitent le transfert de la vapeur d'eau du produit vers le milieu environnant, après quoi elle est emportée par le gaz.

Généralités sur les séchoirs

❖ Séchage par ébullition :

Le séchage par ébullition a lieu lorsqu'il y a un transfert de chaleur intense vers le produit, résultant d'une différence de température importante entre la source de chaleur et le produit. Ce transfert de chaleur se produit par conduction sur une surface chaude, ainsi que dans les séchoirs à cylindres et autres systèmes similaires. Dans ces circonstances, la température du produit augmente jusqu'à ce que la pression de la vapeur d'eau à l'intérieur du produit égale ou dépasse la pression atmosphérique environnante.

❖ Le séchage à l'étuve :

Dans cette méthode de séchage, l'air chauffé est utilisé pour établir un contact avec le matériau humide, ce qui favorise le transfert de chaleur et de masse. La convection joue un rôle prédominant dans ce processus. Il est essentiel de spécifier la température souhaitée pour le four, le temps de séjour requis et la taille de l'échantillon à tester. Le choix de ces critères, en particulier la taille et le temps de séjour, doit être ajusté en fonction du rapport surface/volume du matériau à sécher.

❖ Le séchage par micro-onde :

Le chauffage par micro-ondes consiste à utiliser des ondes électromagnétiques pour générer de la chaleur dans le matériau à sécher. Le fonctionnement d'un four à micro-ondes est simple :

L'énergie électrique est fournie pour alimenter le magnétron, qui convertit l'énergie électrique en un champ électromagnétique. Les ondes produites sont ensuite dirigées à travers un guide d'ondes, un tube métallique rectangulaire, vers un agitateur d'ondes. De là, les ondes pénètrent dans l'enceinte métallique où l'aliment ou le matériau à chauffer est placé sur un plateau tournant. Cette configuration permet à l'aliment ou au matériau d'être exposé aux ondes, ce qui leur permet de pénétrer dans la substance et d'atteindre les molécules d'eau qu'elle contient.

Généralités sur les séchoirs

1.6.2 Séchage non thermiques :

❖ La lyophilisation

La lyophilisation est une méthode de conservation utilisée pour les denrées alimentaires périssables ainsi que pour les substances biologiques et chimiques délicates. Il s'agit d'un produit qui a été préalablement congelé, ce qui permet à l'eau de passer directement de l'état solide (glace) à l'état de vapeur sans passer par l'étape de la fonte. Cette transformation d'état est appelée "sublimation". Après la phase de sublimation, il y a une période de séchage au cours de laquelle une partie de l'eau liée est désorbée à des températures de plus en plus élevées.

Dans une atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide, ce processus fonctionne selon des principes proches de l'ébullition. Toutefois, le séchage peut également se produire en présence de gaz incondensables dans l'atmosphère environnante, la pression de vapeur dans le gaz externe n'étant alors qu'une pression partielle.

❖ Le séchage osmotique :

Dans le domaine de la transformation des fruits et légumes, la déshydratation osmotique est une technique utilisée pour diminuer la teneur en eau des produits. Ce processus consiste à immerger des fruits ou des légumes entiers ou en tranches dans une solution hypertonique contenant du sucre et/ou du sel.

Le principe sous-jacent de l'osmose explique le mouvement de l'eau et des solutés qui se produit lorsque deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable. Il est alimenté par la différence de pression osmotique entre les deux composants concernés.

1.7 Les avantages et Inconvénients du séchage :

Le séchage, comme les autres méthodes de conservation thermique, présente à la fois des avantages et des inconvénients[15].

1.7.1 Les avantages :

- ✓ Le séchage présente plusieurs avantages en tant que méthode de conservation, notamment sa simplicité et ses rendements généralement élevés.

Généralités sur les séchoirs

- ✓ Les aliments déshydratés peuvent être conservés pendant de longues périodes, grâce à la désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- ✓ le séchage réduit l'activité de l'eau, ce qui inhibe la croissance des micro-organismes.
- ✓ permet de minimiser les pertes de récoltes.
- ✓ produits séchés permet de réduire les coûts, le poids réduit des produits séchés permet de diminuer les coûts financiers et environnementaux liés au transport.

1.7.2 Les inconvénients :

- Le séchage peut entraîner la perte d'arômes, de vitamines et de pigments.
- Le séchage peut également déclencher des réactions de brunissement et de durcissement de la surface. Il peut entraîner des modifications irréversibles de la texture et diminuer la capacité de réhydratation du produit séché.
- Le séchage peut entraîner une perte de composants volatils et des changements dans la répartition de l'humidité dans le produit.
- Le séchage peut être coûteux, notamment en termes de consommation d'énergie. Il est donc important de comprendre tous les facteurs qui peuvent influencer le séchage, en particulier la vitesse de séchage, afin de minimiser les coûts associés à ce processus.

.

Chapitre02

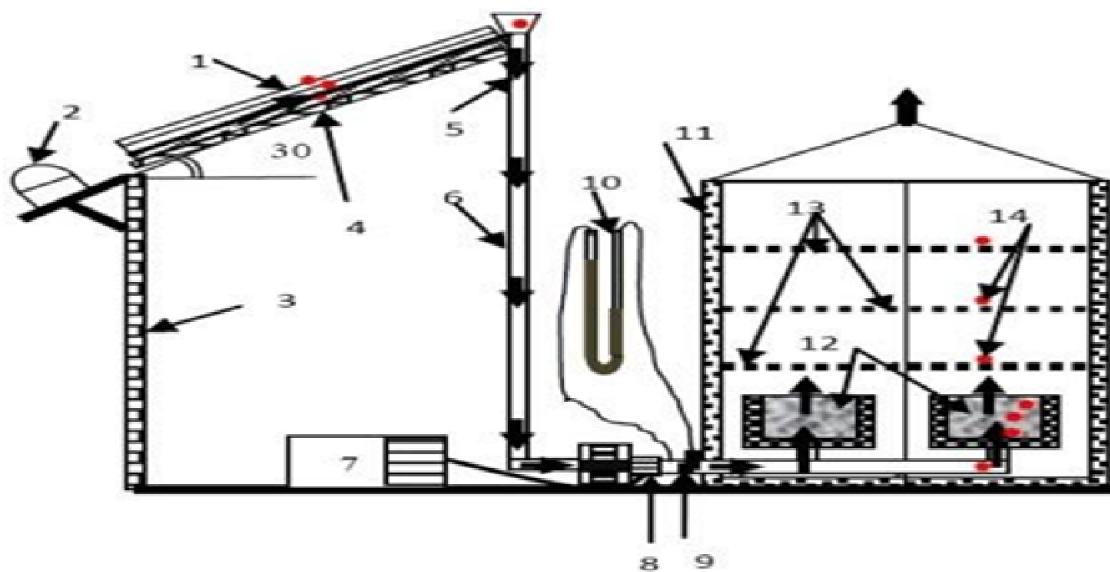
Etat de l'art

2 État de l'art sur les séchoirs solaires indirect :

Pendant des siècles de vie l'homme utilise plusieurs méthodes de séchage pour atteindre le résultat souhaité avec les plus simples méthodes et dans une période de temps plus court avec les différents moyens dans différentes régions et terrain.

Nous apporterons n ce chapitre de nombreuses recherches et expériences pour différents chercheur expliquer les moyens des séchages et comment il a travaillé[16].

S. M. Shalaby et M. A. Bek(2015): l'objectif était de sécher le laurier-rose en utilisant un séchoir solaire indirect (ISD) avec l'aide d'un matériau à changement de phase (PCM) comme moyen de stockage de l'énergie. L'expérience visait à maintenir la température de séchage du laurier-rose à un niveau prescrit de $50 \pm 2,5$ °C.



1- Chauffe-air solaire ; 2-Pyranomètre ; 3-Mur de la pièce ; 4-Toit de la pièce; 5- Air en circulation ; 6-Tube en PVC ; 7-Inverseur ; 8-Moteur à induction triphasé couplé à un ventilateur ; 9-Tube de Pitot ; 10-Manomètre à tube en U ; 11-Compartiment de séchage ; 12- PCM ; 13-Rayons ; 14-Positions du thermocouple.

Figure 2.1 Schéma de l'installation expérimental

Dilip Jain et Pratibha Tewari(2015)[17]:ont mis au point un séchoir solaire qui vise à surmonter les limites des méthodes traditionnelles de séchage en plein soleil en utilisant le maximum de rayonnement solaire disponible. Le séchoir intègre un matériau à changement de phase (MCP) en lit compact, qui permet de stocker

l'énergie thermique sous forme de chaleur latente et de chaleur sensible pendant la journée. Cette énergie stockée était ensuite libérée après le coucher du soleil, ce qui permettait de maintenir une température de séchage comprise entre 40 et 45 degrés Celsius. En prolongeant la période de séchage, ce système offre un processus de séchage plus efficace et mieux contrôlé que les méthodes conventionnelles.

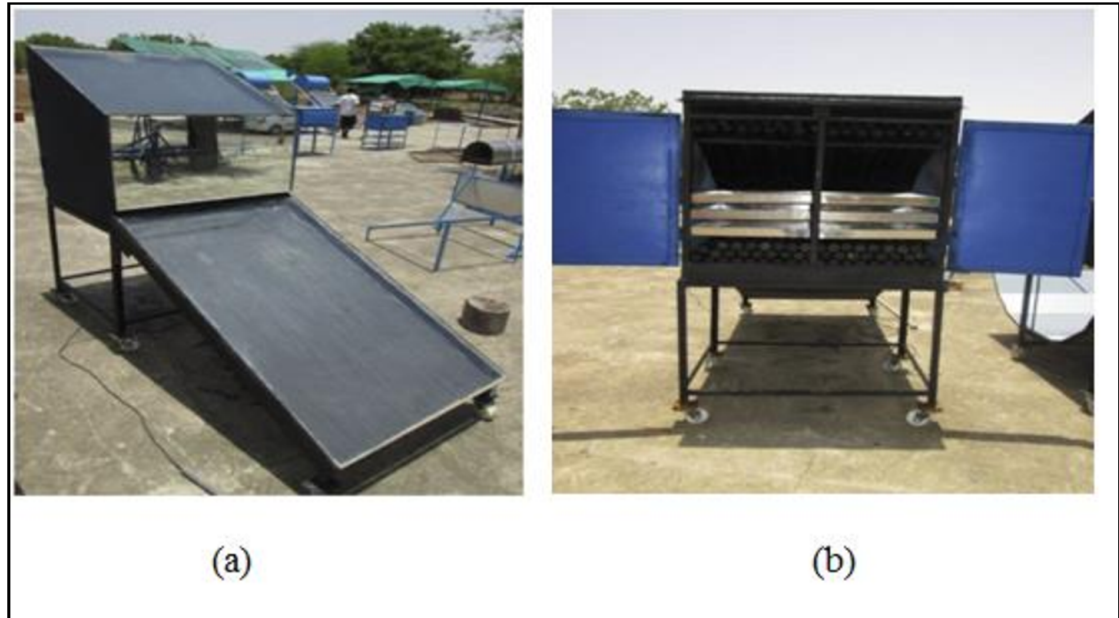


Figure 2.2 (a) Un absorbeur à plaque plate avec stockage thermique sécheur solaire convectif naturel, (b) Vue intérieure d'un séchoir montrant le stockage thermique et les plateaux de séchage en lit compact de PCM.

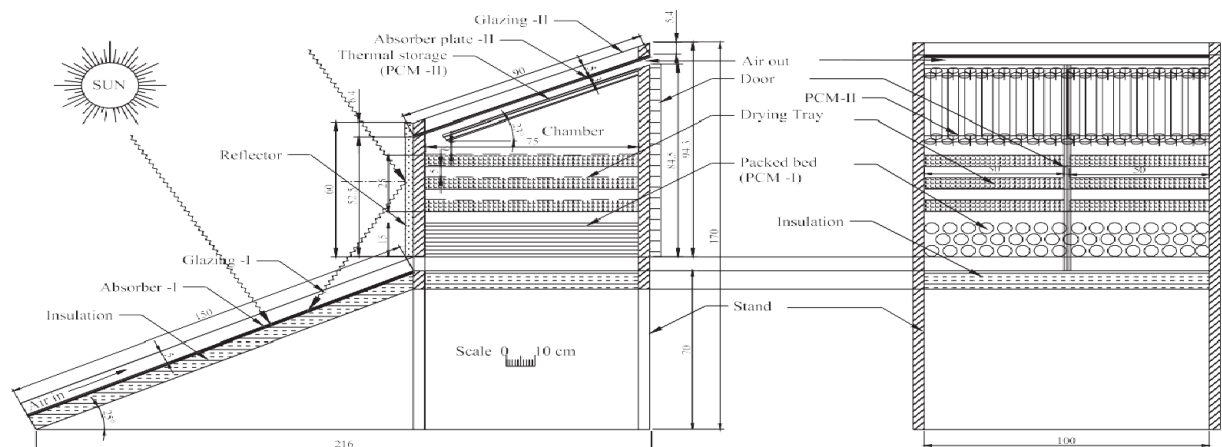


Figure 2.3 Vue schématique d'un absorbeur à plaques flat avec stockage thermique dans un séchoir solaire à convection naturelle.

S.K. Sansaniwal et M. Kumar(2015)[18]: un séchoir solaire indirect à convection naturelle a été conçu et construit pour étudier le comportement de séchage des rhizomes de gingembre. Les chercheurs ont cherché à déterminer le coefficient de

transfert de chaleur par convection et le taux d'élimination de l'humidité au cours du processus de séchage.

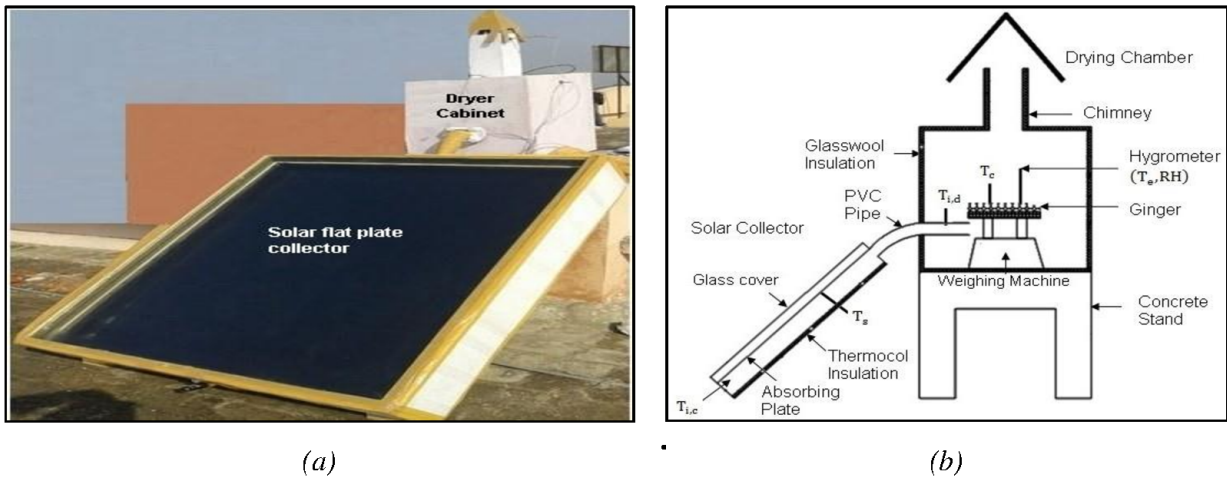


Figure 2.4 Dispositif expérimental (a) vue schématique ; (b) vue picturale

Mennouche, et al(2015)[19]: ont conçu et construit un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect spécialement destiné au séchage des arachides (*Arachis hypogaea L.*) à Ouargla, en Algérie. L'objectif était d'étudier le processus de séchage des arachides dans les conditions climatiques locales.

Vinay Narayan Hegde, et al(2015)[20]: ont conçu, fabriqué et évalué les performances d'un séchoir solaire spécialement conçu pour le séchage des bananes. L'objectif était de développer un séchoir solaire indirect de type actif qui soit respectueux de l'environnement, rentable et adapté au séchage de divers produits agricoles.

Le séchoir solaire a été construit à l'aide de matériaux disponibles localement, biodégradables et peu coûteux. Il se compose d'un chauffe-air solaire à plaque plate avec trois couches d'isolation, d'une chambre de séchage et d'un ventilateur avec un

régulateur pour contrôler le flux d'air à l'intérieur du système.

Vijayan et al(2016)[21]: a développé un séchoir solaire à convection forcée indirecte intégré à un support poreux de stockage de chaleur sensible pour le séchage de la courge amère. L'objectif était d'étudier l'effet du stockage thermique poreux et du débit massique de l'air sur les performances du système de séchage.

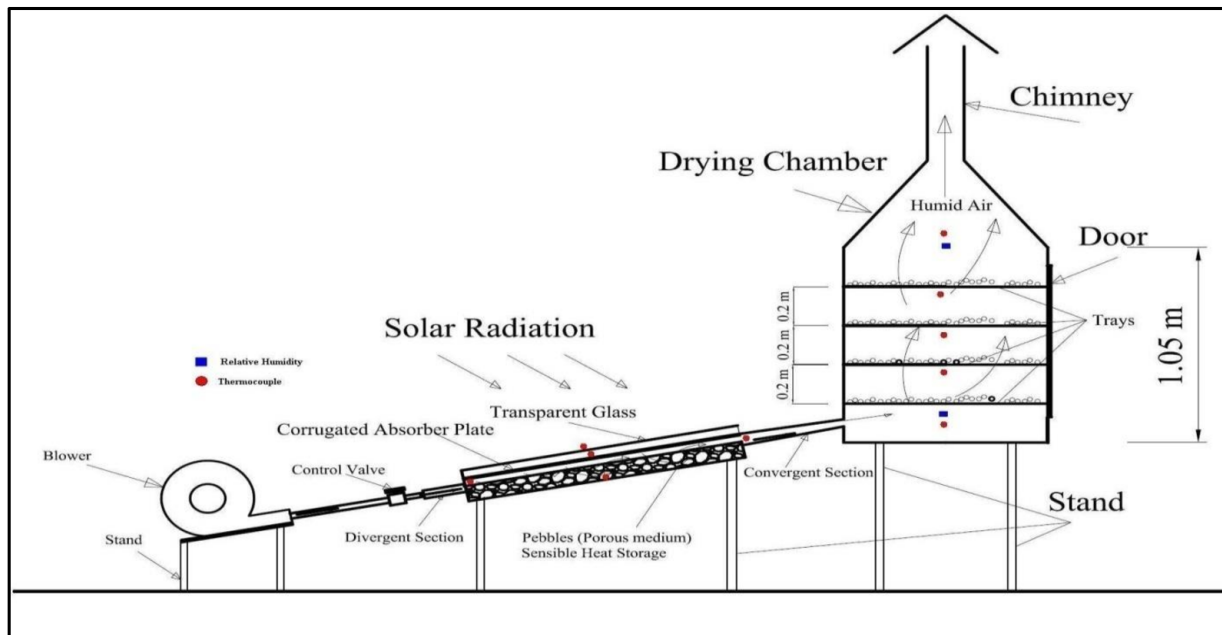


Figure 2.5 Schéma de l'installation expérimentale

Blanco-Cano et al(2016)[22]:se sont concentrés sur la modélisation du processus de séchage en couche mince des pommes Granny Smith à l'aide d'un séchoir solaire indirect. Ils ont effectué

une analyse thermogravimétrique (TGA) pour déterminer la cinétique de séchage des pommes à différentes températures constantes.

Vipin Shrivastava et Anil Kumar(2016)[23]: les chercheurs ont entrepris de comparer le séchage du fenugrec (une herbe médicinale) dans deux conditions différentes : un séchoir solaire indirect et un séchage en plein soleil. Le coefficient de transfert de chaleur par convection, qui est un paramètre crucial dans la conception des systèmes de séchage solaire, a été la principale variable étudiée.



Figure 2.6 Vue photographique du séchage du fenugrec a dans un séchoir solaire indirect à convection forcée et en plein soleil, b vue intérieure du séchoir solaire indirect.

Blanco-Canoç et al(2016)[24]: une étude sur le taux d'évaporation maximal réalisable dans un séchoir solaire indirect à petite échelle. Ils ont cherché à modéliser les processus de transfert de chaleur et de masse qui ont lieu dans la chambre de séchage et ont proposé une expression analytique pour le calcul de l'efficacité du ramassage sur la base des résultats du modèle.

Pour commencer leur analyse, les auteurs ont développé un modèle mathématique pour décrire le transfert de chaleur et de masse qui se produit pendant le processus de séchage dans le séchoir solaire. Ce modèle leur a permis de comprendre les facteurs influençant le taux d'évaporation et sa relation avec les différents paramètres.

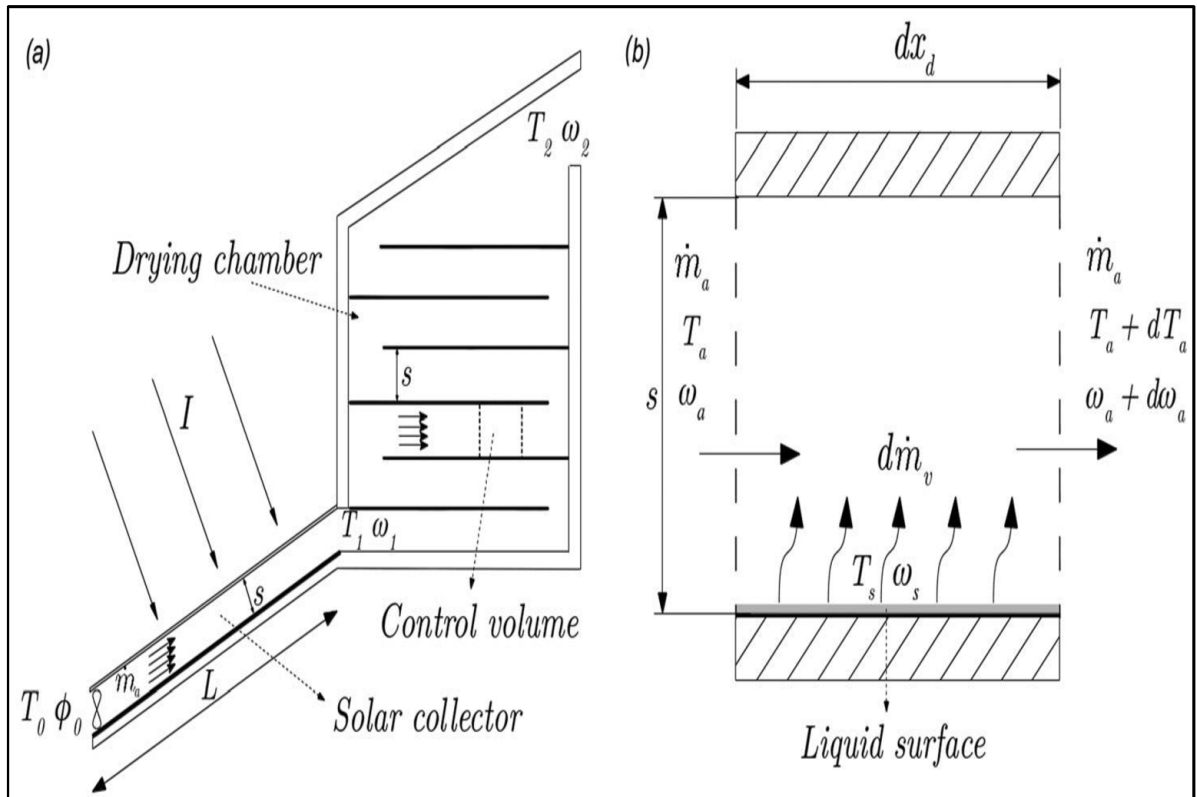


Figure 2.7 (a) Schéma d'un séchoir solaire indirect avec la configuration considérée dans cette étude et (b) volume de contrôle dans la chambre de séchage.

Lingayat, A., et al(2017)[25]:s'est concentrée sur la conception, le développement et l'évaluation des performances d'un séchoir solaire de type indirect spécialement conçu pour le séchage des bananes. Cette étude a été motivée par l'augmentation des prix et la pénurie de combustibles fossiles, ainsi que par la volonté de réduire la consommation de combustibles dans le processus de séchage. L'énergie solaire a été choisie comme source d'énergie alternative en raison de son abondance et de sa disponibilité.

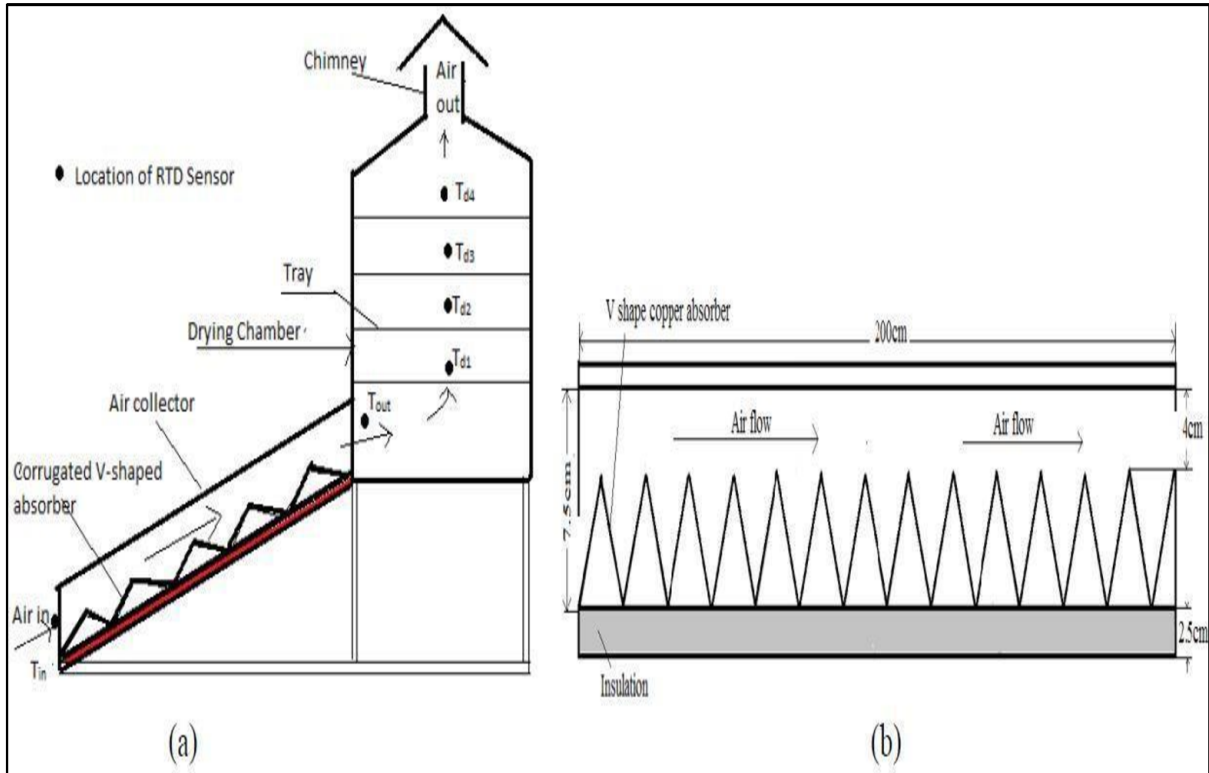


Figure 2.8 a) Vue schématique du dispositif expérimental ; b) Capteur solaire plan.

Hajar Essalhi, et al (2017)[26]: ont proposé une nouvelle conception pour l'absorbeur d'un collecteur d'air solaire utilisé dans un séchoir solaire indirect. L'absorbeur est construit à l'aide de deux plaques d'aluminium ondulées qui sont fixées ensemble pour former des cylindres parallèles, ce qui permet la circulation de l'air le long du collecteur. Les chercheurs ont mené des essais expérimentaux spécifiquement axés sur le séchage des poires, qui ont été réalisés au laboratoire de l'énergie solaire et de l'environnement situé à la Faculté des sciences de Rabat.

Castillo-Télez et al (2017)[27]: avait pour objectif d'étudier le processus de déshydratation d'une variété spécifique de piment rouge appelée "costeño" (*Capsicum annum* L.). Le piment costeño est connu pour ses qualités sensorielles et est couramment utilisé dans l'industrie alimentaire. L'étude expérimentale a été menée à l'Instituto de Energías Renovables (IER) de l'Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) à Temixco, Morelos, au Mexique.

Pour effectuer la déshydratation, des températures contrôlées de 45 °C, 55 °C et 65 °C ont été utilisées. Deux méthodes de séchage différentes ont été utilisées : un four de

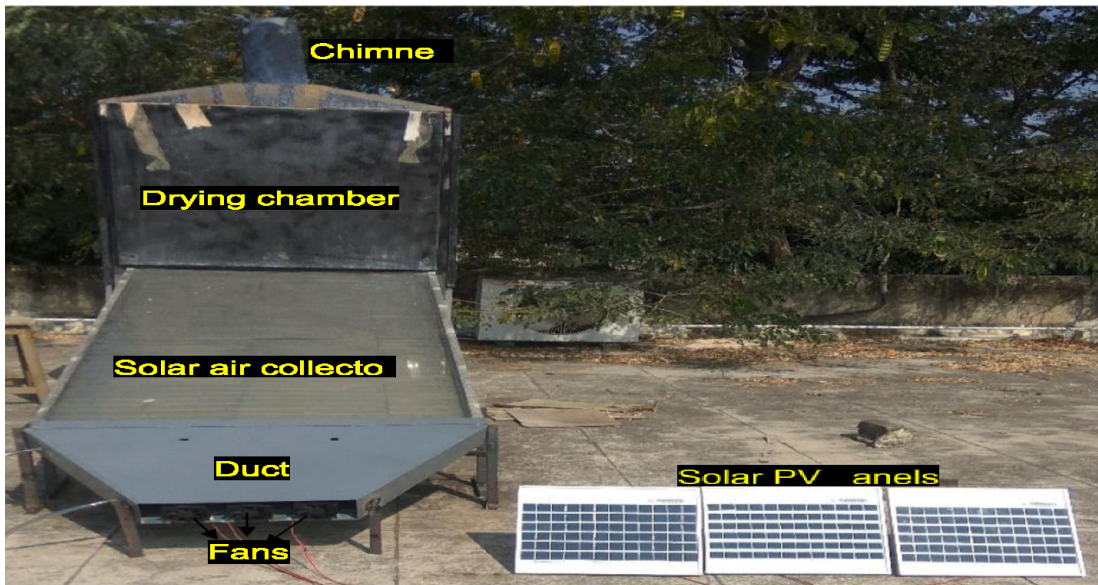


Figure 2.9 Sécheur solaire indirect (ITSD) avec surface d'absorption ondulée en V couplée à un conduit trapézoïdal.

laboratoire et un séchoir solaire indirect de type tunnel. L'objectif était de déterminer la cinétique de séchage et d'optimiser le processus.

Goud, M et al (2019)[29]: a développé un séchoir solaire de type indirect (ITSD) qui utilise des panneaux solaires photovoltaïques (PV) pour alimenter les ventilateurs d'entrée, favorisant ainsi la circulation de l'air à l'intérieur du séchoir. L'objectif principal était d'étudier la cinétique de séchage de deux types de légumes : le piment vert (*Capsicum Annum*) et le gombo (*Abelmoschus Esculentus*), tout en évaluant les performances du séchoir solaire de type indirect.

Tedesco, F et al (2019)[30]: a porté sur la conception, la construction et l'analyse d'un séchoir solaire indirect passif avec une cheminée. L'objectif de l'étude était d'examiner les performances du collecteur solaire et de valider les résultats de la simulation informatique par rapport aux données pratiques.

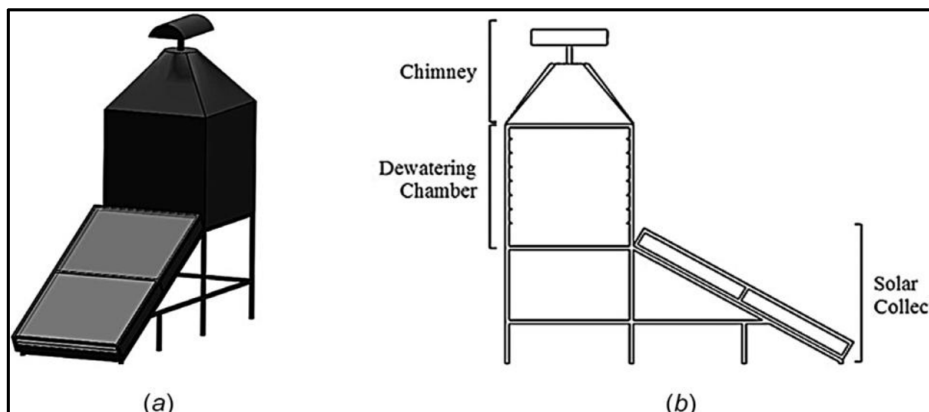


Figure 2.10 (a) Séchoir solaire indirect passif avec cheminée et (b) séchoir solaire indirect avec cheminée - trois parties principales

Azouma, Y. O et al (2019)[31]: a mené une étude sur l'application à l'échelle industrielle d'un processus de séchage solaire convectif pour les ananas, dans le cadre d'une stratégie d'économie circulaire pour les pays en développement. L'objectif était de développer un concept d'énergie renouvelable qui utilise efficacement un système simple de production de biogaz et un système de séchage en deux étapes, qui peut être mis en œuvre dans les conditions spécifiques des pays en développement, avec le Togo comme exemple.

L'étude s'est concentrée sur le processus de séchage solaire, qui joue un rôle essentiel dans la stratégie proposée. Pour étudier ce processus, les chercheurs ont construit un séchoir solaire portable fonctionnant en mode de chauffage indirect. Le séchoir a ensuite été modifié pour améliorer ses performances.

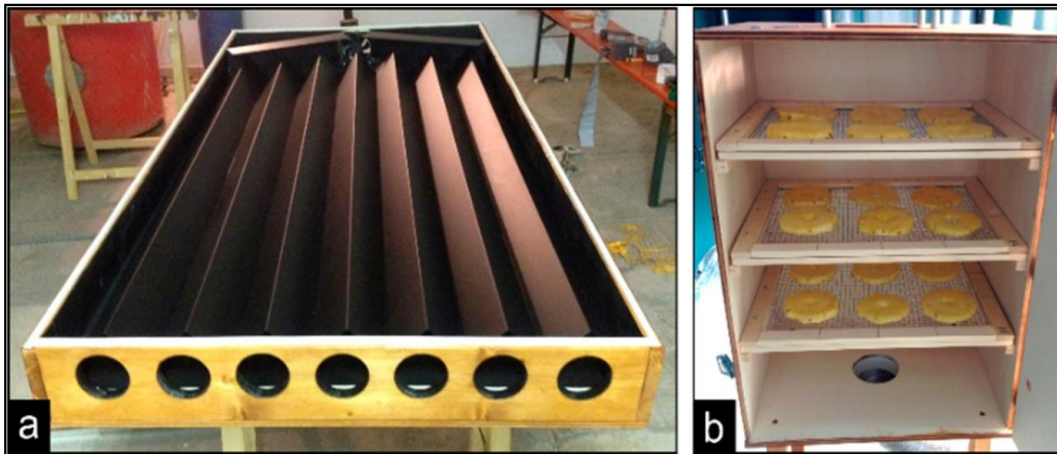


Figure 2.11 Principales parties du séchoir solaire : (a) le capteur solaire expérimental (sans couvercle) et (b) la chambre de séchage.

Demissie, P et al (2019)[32]: a conçu, développé et modélisé un séchoir solaire indirect pour aliments. Le séchoir se compose de plusieurs éléments, dont un collecteur solaire, une chambre de séchage avec huit étagères disposées en deux colonnes, une cheminée d'évacuation et un ventilateur alimenté par l'énergie solaire. La sortie du séchoir a été conçue selon une géométrie de pyramide tronquée afin de minimiser la précipitation de l'eau condensée et de permettre un chauffage supplémentaire de l'air de séchage à la sortie.

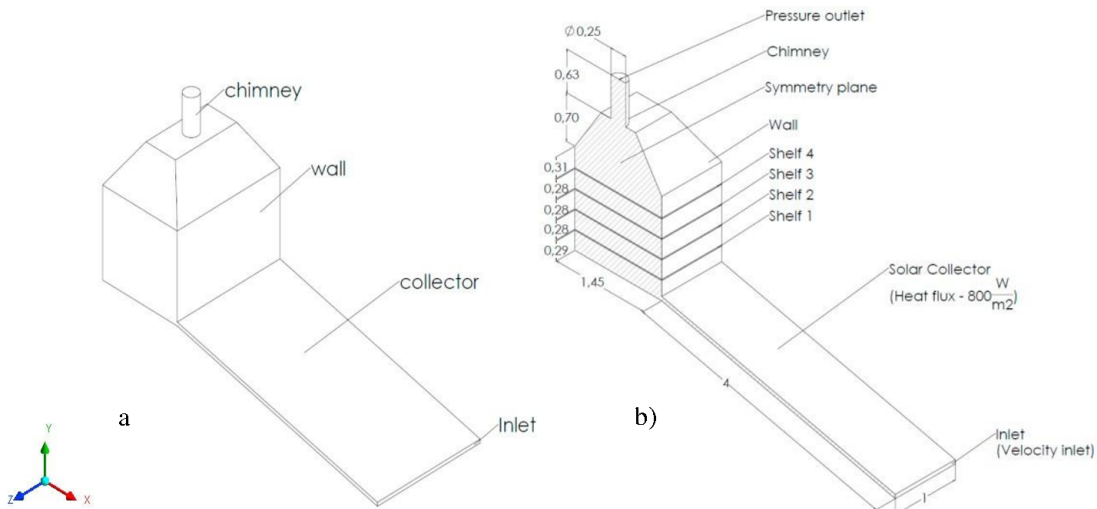


Figure 2.12 a) Représentation schématique 3D symétrique des différents composants du séchoir solaire ; b) Représentation 3D symétrique du domaine d'écoulement avec indication des conditions aux limites (toutes les dimensions sont exprimées en mètres).

solaires : le séchoir solaire indirect à double passage (DPISD) et le séchoir solaire indirect à double passage avec modification de l'absorbeur à mailles (DPISDMA). L'objectif principal de l'étude était d'améliorer l'efficacité thermique du collecteur d'air solaire à double passage en y intégrant des mailles de fer. Ils ont mené des expériences en utilisant des échantillons de fruits de pépino (*Solanum muricatum* L.) de deux épaisseurs différentes.

Hatami, S et al (2020)[34]: a porté sur l'analyse énergétique et exergétique d'un séchoir solaire indirect, utilisé à des fins de déshydratation. L'objectif était de développer un modèle dynamique qui prenne en compte différents facteurs tels que le rayonnement solaire, les variations de température, la cinétique de réduction de l'humidité et les changements de température du matériau de séchage.

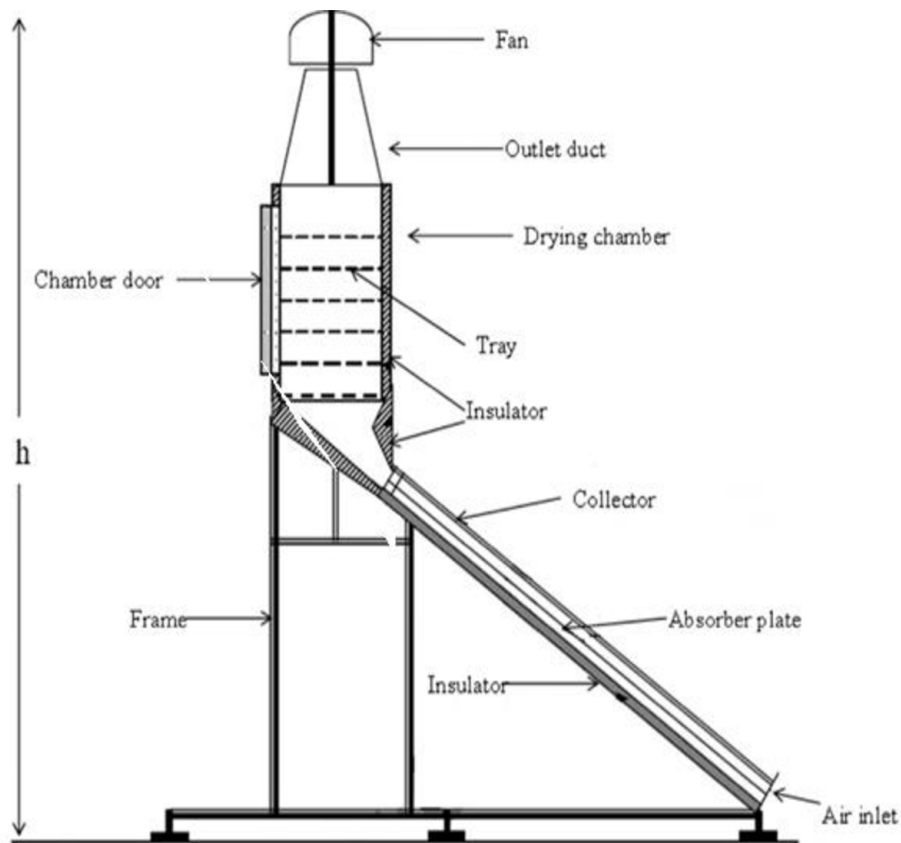


Figure 2.13 Vue schématique du séchoir solaire utilisé pour la modélisation et de ses pièces

Sözen, A et al (2021)[35]: s'est concentrée sur l'amélioration des performances thermiques d'un séchoir solaire indirect en incorporant un absorbeur de type tube rempli de laine d'aluminium. L'objectif était d'améliorer le processus de séchage et de réduire le temps de séchage.

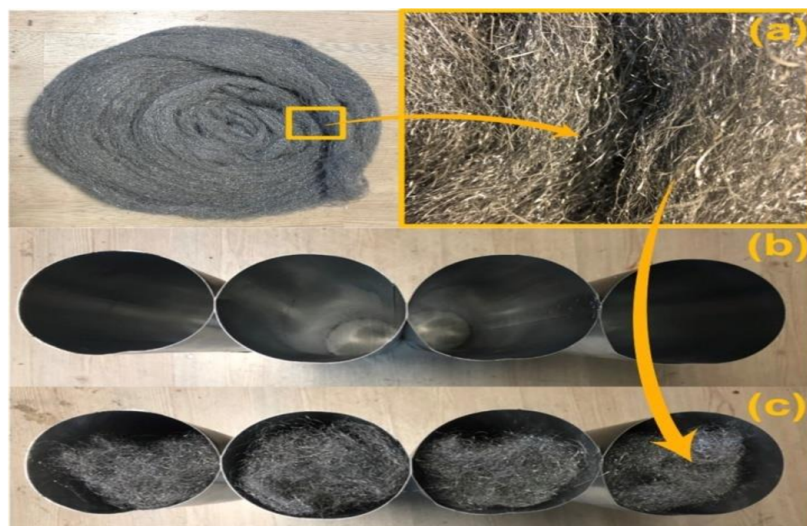


Figure 2.14 (a) Laine d'aluminium, (b) Absorbeur tubulaire, (c) Absorbeur tubulaire modifié.

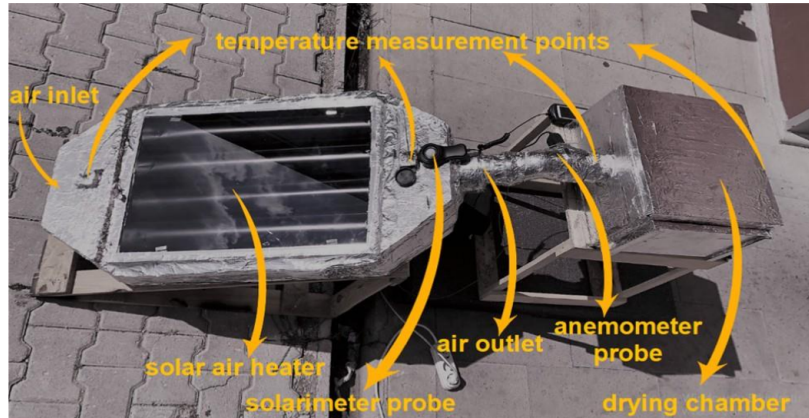


Figure 2.15 Photo d'un système de séchage solaire indirect.

Singh, S et al (2022)[36]: a conçu et évalué un nouveau séchoir solaire indirect à mode actif pour les produits agricoles. Le séchoir utilise un collecteur à tubes sous vide à flux continu très efficace pour le chauffage de l'air. Il intègre un ventilateur à courant continu alimenté par un module photovoltaïque (PV) pour faciliter la circulation forcée de l'air à l'intérieur du séchoir.

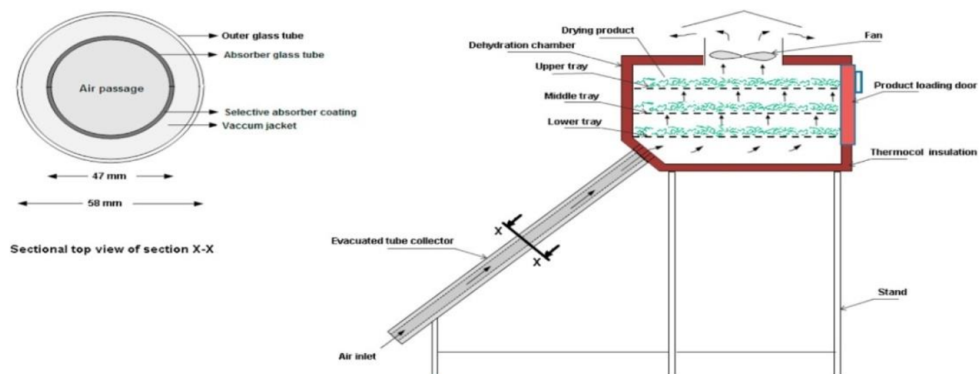


Figure 2.16 Schéma du séchoir solaire indirect actif.

Chapitre03

Matériel et

Méthode

3 Matériel et méthode :

3.1 Introduction

Dans ce chapitre; nous donnerons une description de notre séchoir solaire avec les améliorations apportées pour résoudre le problème de l'homogénéité de l'air dans la chambre de séchage. Nous décrivons aussi le système de gestion de l'air à base d'Arduino, et celui d'acquisition de données.

On commence d'abord par donner le montage expérimental et le matériel utilisé, puis on passe à la méthode de travail. Le prototype a été réalisé à la plateforme expérimentale des systèmes énergétique pour l'agriculture au sein de l'URAER.

3.2 Montage expérimentale :

L'objectif de ce travail expérimental est de concevoir et d'optimiser un système de gestion de l'air chaud d'un séchoir solaire indirect. L'air chaud est conduit à l'aide de conduite en plastique, vers la chambre de séchage des deux côtés du haut et du bas. Chaque tube est équipé d'une vanne contrôlée afin de gérer l'air chaud.

Une image de la configuration expérimentale est présentée à la (Figure 3.1).



Figure 3.1 Vue générale du séchoir solaire proposé

L'assemblage se compose de deux tubes en plastique d'une diamètre 125 mm avec un T et deux Y à 125 mm Ces tubes relie le canal de collecte avec les deux ouvertures de l'armoire de séchage (haut et bas). A chaque ouverture on trouve une vanne de sortie une vanne d'entrée de l'air. Le ventilateur avec régulateur est utilisé pour absorber de l'air du capteur solaire vers l'armoire de séchage à travers ces tubes. Le montage est composé d'une partie séchage, et une partie acquisition et contrôle.

3.2.1 Le séchoir solaire

Le séchoir solaire est l'élément essentiel de notre système solaire. Il est composé de capteur solaire, armoire de séchage, d'un support et des conduites d'air(Figure 3.1).

3.2.1.1 Le support

Le support est considéré comme un élément clé du processus de séchage, car il porte le capteur solaire et l'orienté vers le soleil selon un angle spécifique. Cet angle permet de maximiser l'absorption de la lumière du soleil et de chauffer l'air à l'intérieur pour un séchage rapide des légumes et des fruits. En outre, le support sert à fixer la boîte de jonction (Figure 3.2).

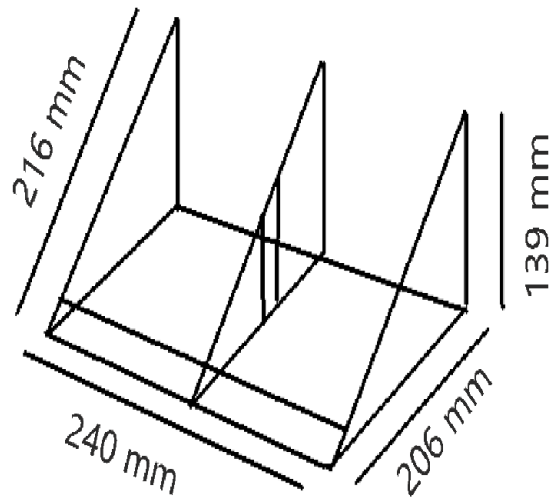


Figure 3.2 Schéma illustratif du support des capteurs solaires

3.2.1.2 Capteur d'absorption solaire

La **Error! Reference source not found.** illustre un séchoir solaire indirect qui absorbe la lumière du soleil à travers une plaque métallique recouverte de peinture noire. Cette plaque est recouverte d'une enveloppe en verre qui empêche la chaleur émise par la plaque métallique de s'échapper. Elle est renforcée et fixée sur les bords pour empêcher la pénétration de la poussière et de la saleté. En bas, il y a une entrée d'air sensible qui permet à l'air d'entrer jusqu'à ce qu'il soit consommé(Figure 3.3).

Le capteur est constitué de : un cadre , un plaque aluminium peint en noir , cadre interne qui porte la plaque aluminium en avant et permet le passage de l'air par derrière et une porte le recouvre du haut .

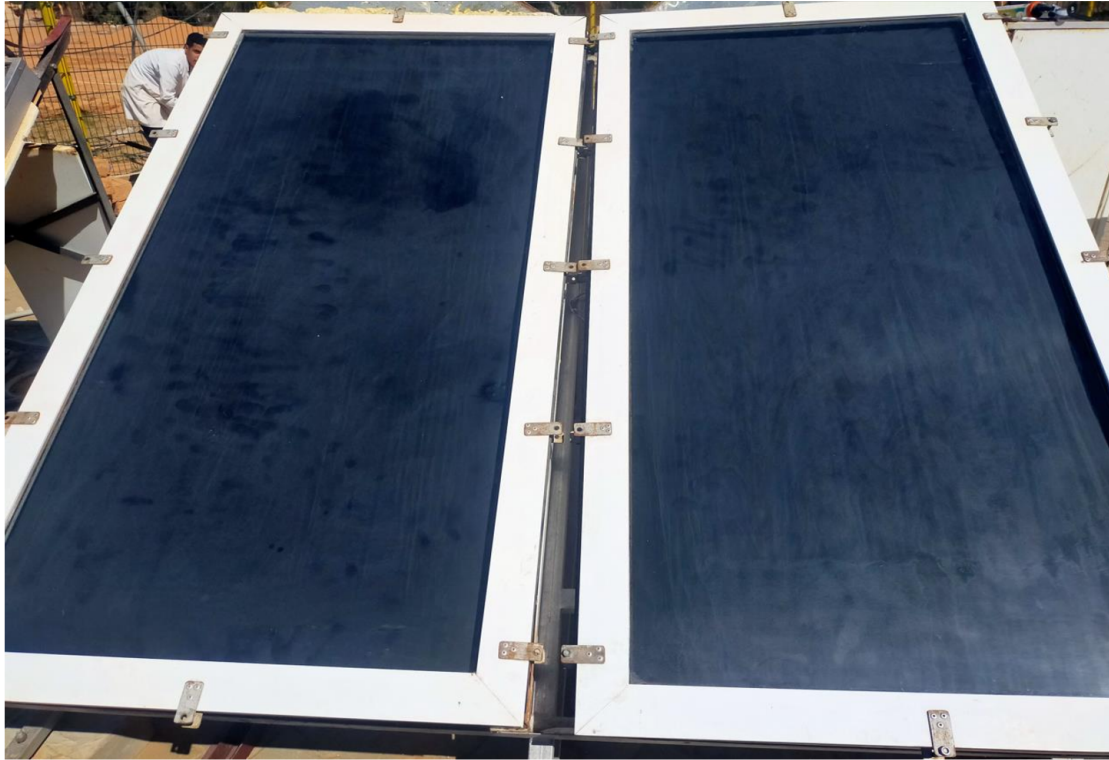


Figure 3.3 Capteur solaire indirect

3.2.1.3 Armoire de séchage

Elle est de hauteur 1.17m, de longueur 0.55m, et de largeur 0.55m, Cette chambre comporte 4 étagères sur lesquelles est posé le produit à sécher. La chambre comporte une entrée et sortie commune de chaque côté. L'air chauffé peut entrer du haut vers le bas, ou prendre le chemin inverse du bas vers le haut.

On utilise l'armoire pour protéger le produit sécher des facteurs externes et garde l'air chaud à l'intérieure(Figure 3.4).



Figure 3.4 Photographie d'une armoire de séchage avec 4 étagères

3.2.1.4 Les conduites :

Ce modèle contient 4 portes contrôlées par Arduino qui s'ouvrent et se ferment automatiquement selon le programme requis.

La connexion entre le collecteur et la chambre de séchage se fait par des tuyaux, de sorte qu'elle est reliée à une sortie circulaire à laquelle est connecté un tube de dérivation en forme de lettre (T), un côté est connecté par le haut et l'autre côté. Se fait par le bas. A chaque entrée il y a un tube de dérivation en forme de (Y) qui reçoit l'air absorbé d'un côté. L'air sort de l'autre côté alternativement et automatiquement selon le programme installé sur l'Arduino (Figure 3.5).



Figure 3.5 Les conduites et le système de gestion de l'air

3.2.1.5 Ventilateur

Le ventilateur (Figure 3.6) est situé à la sortie du capteur solaire. Il permet d'aspirer l'air chaud du capteur solaire et le souffler à travers les conduites vers la chambre de séchage. Il fonctionne en permanence pour assurer la circulation de l'air et éviter l'apparition de moisissures dans le produit à l'intérieur de la chambre. Ventilateur résume les principales caractéristiques du ventilateur.

Tableau 3-1 Caractéristiques du ventilateur

Tension nominale	230V - AC
Débit, métrique	2.9m ³ /min
Vitesse	2900t/min
Courant	120mA
Puissance	15W
Gamme de produit	4715MS



Figure 3.6 6Ventilateur 4715MS-23T-B5A

3.2.2 Système d'acquisition :

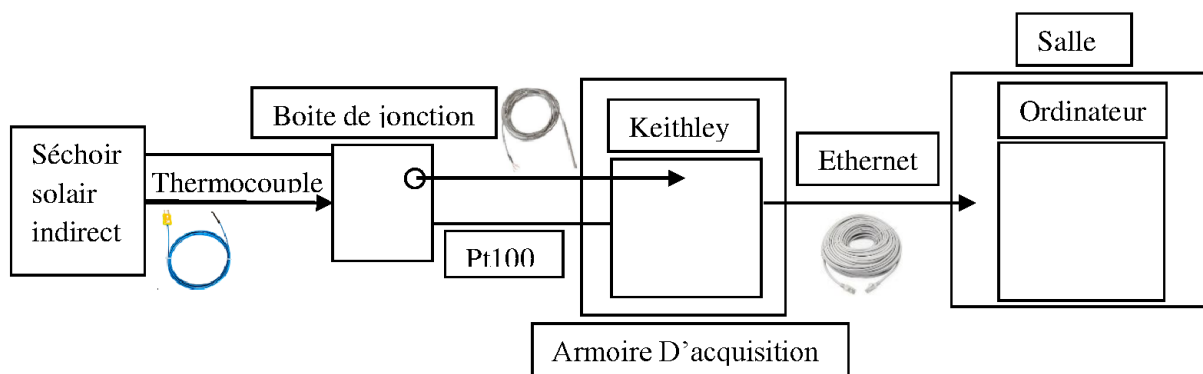


Figure 3.7 Système d'acquisition et de traitement des données par keithley 2701

3.2.2.1 Armoire d'acquisition :

Nous avons utilisé la chambre pour protéger le dispositif acquisition, et les fils électriques pour alimenter le prototype de la poussière, saleté et pluie. Son but est de recevoir tous les fils associés aux capteurs de températures et envoyer les mesures à l'ordinateur(Figure 3.8).



Figure 3.8 Armoire d'acquisition

3.2.2.2 Unité d'acquisition Keithly :

Le modèle 2701 de Keithly est le premier système de mesure et de contrôle multipoint de l'industrie qui intègre entièrement la résolution et la sensibilité de la qualité de l'instrument avec la capacité de mise en réseau longue distance Ethernet (Figure 3.9 et Figure 3.10).

Cela permet des mesures sensibles dans un environnement d'acquisition de données distribuée à l'aide de communications standard de l'industrie longue distance. Elle supporte plusieurs modules qui contiennent jusqu'à 40 canaux (40 mesure à la fois). Elle permet de mesurer des tensions, des courant, des résistances, des températures (PT100, thermocouple K, J, T...).



Figure 3.9 Unité d'acquisition Keithly 2701

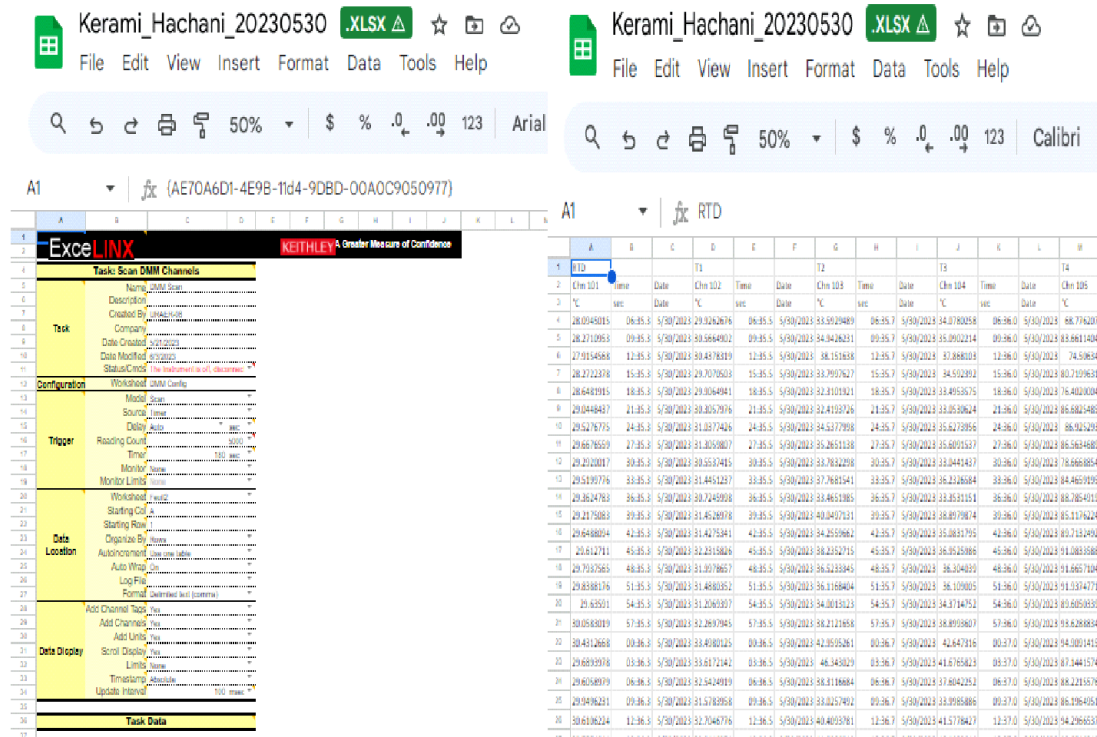


Figure 3.10 Unité d'acquisition Keithly 2701

3.2.2.3 Thermocouple :

C'est un composant électrique utilisé pour mesurer les températures. Ce type de pièce de mesure est d'une grande importance pour la mesure de températures de grande valeur. Ses avantages comprennent faibles coûts de fabrication, une conception robuste et une facilité d'utilisation, en particulier lorsqu'il est utilisé dans des systèmes modulaires complexes et variables (Figure 3.11).



Figure 3.11 Thermocouple type K

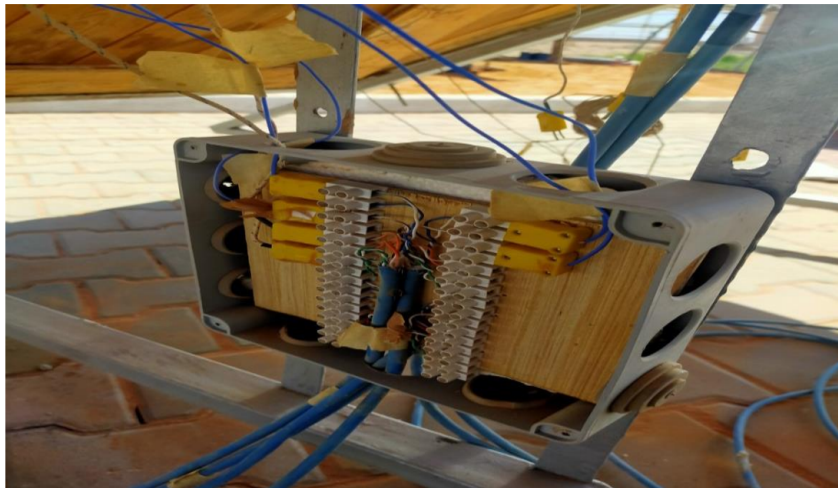


Figure 3.12 Boite de jonctions

3.2.2.4 Boite de jonction :

La boîte de jonction est installée au bas du support pour collecter les fils de thermocouple les connecter aux fils de compensation en cuivre (Figure 3.12). Ces fils de compensation servent à raccorder les thermocouples à l'acquisition qui se trouve à une distance qui dépasse la longueur des fils de thermocouple. La température dans la boîte de jonction (la température de jonction) est mesurée par une RTD et elle est transmise à l'acquisition pour compenser la température de thermocouple. En outre, elle sert à protéger ces fils des éléments naturels.

3.2.2.5 Pt100:

Les RTD – ou détecteurs de température à résistance – sont des capteurs de température qui contiennent une résistance qui change de valeur de résistance lorsque sa température change. Le RTD le plus populaire est le Pt100. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années pour mesurer la température dans les laboratoires et les processus industriels, et ont acquis une réputation de précision, de répétabilité et de stabilité.

La plupart des éléments RTD consistent en une longueur de fil enroulé fin enroulé autour d'un noyau en céramique ou en verre. L'élément est généralement assez fragile, il est donc souvent placé à l'intérieur d'une sonde gainée pour le protéger. L'élément RTD est fabriqué à partir d'un matériau pur dont la résistance à différentes

températures a été documentée. Le matériau a un changement prévisible de résistance à mesure que la température change; c'est ce changement prévisible qui est utilisé pour déterminer la température.

Le pt100 est l'un des capteurs de température les plus précis. Non seulement il offre une bonne précision, mais il offre également une excellente stabilité et répétabilité. Les pt100 sont également relativement insensibles au bruit électrique et donc bien adaptés à la mesure de la température dans les environnements industriels, en particulier autour des moteurs, générateurs et autres équipements haute tension (Figure 3.13).



Figure 3.13 Capteur RTD PT100

3.2.3 Le système de control

Le système de control permet de contrôler et de gérer le chemin de l'air chaud. Il contient un microcontrôleur, et des vannes motorisées actionnées par des moteurs pas-à-pas(Figure 3.14).

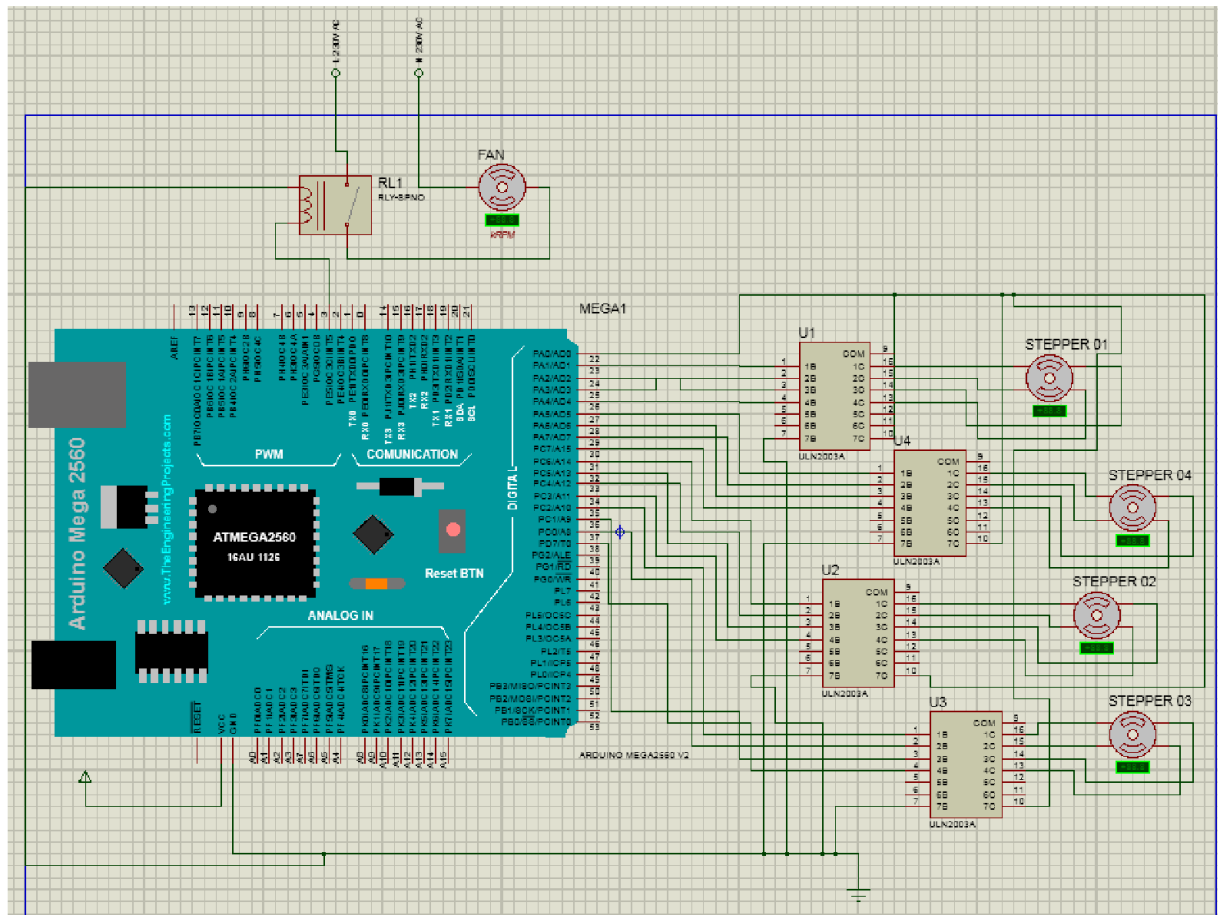


Figure 3.14 schéma général du système de contrôle par Arduino avec programme proteus 8.0

3.2.3.1 La carte ArduinoMéga 2560

La carte ArduinoMega 2560 (Figure 3.15) , est une carte de prototypage rapide construite autour du microcontrôleur ATmega2560. La carte ArduinoMega est cadencée à 16 MHz (grâce à l'oscillateur à cristaux qui lui est associé) et possède une mémoire flash de 256 Ko, une mémoire vive de 8 Ko et une mémoire EEPROM de 4 Ko. Le microcontrôleur permet aussi à la carte Méga de disposer de 54 broches d'E/S numérique (dont 15 peuvent servir de sortie PWM) et de 16 broches analogiques. La Figure 3.16 illustre la constitution d'une carte Arduino Méga 2560 ainsi les types de ces broches.

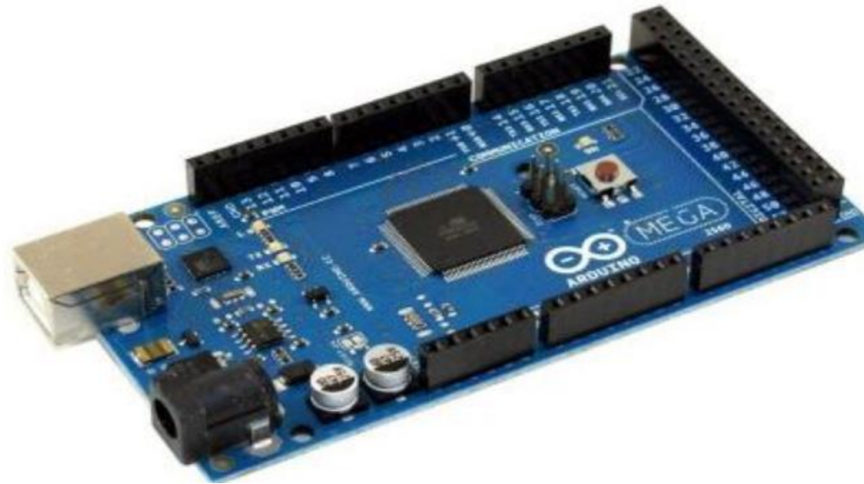


Figure 3.15 La carte ArduinoMega 2560

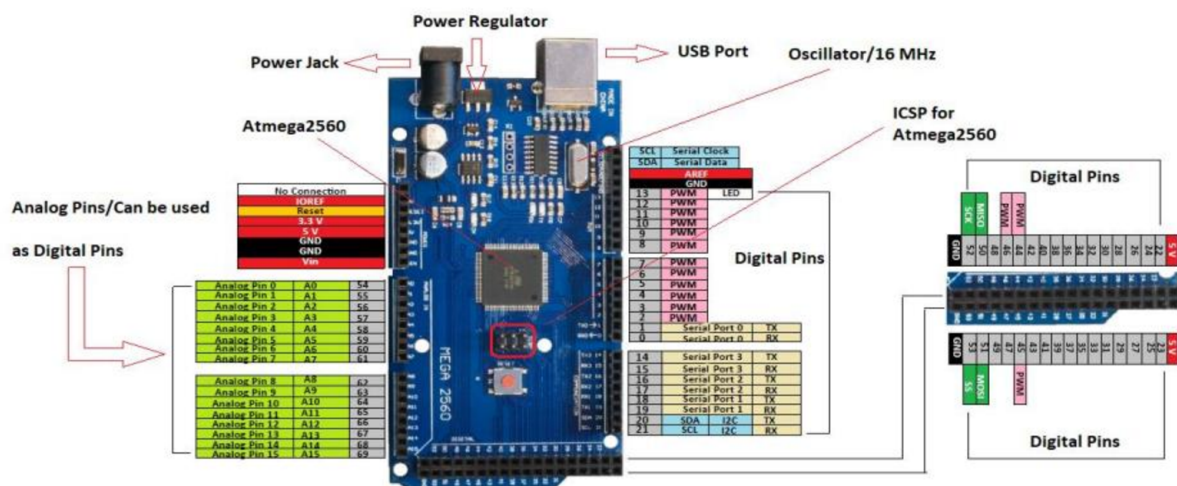


Figure 3.16 La constitution de la carte Arduino MEGA 2560

Nous utilisons l'arduino méga 2560 pour ses avantages par rapport à l'autre modèle , nous mentionnerons quelques caractéristiques au suivant :

Caractéristiques :

- Microcontrôleur ATmega2560
- Tension de fonctionnement 5V
- Tension d'entrée (recommandée) 7-12 V
- Tension d'entrée (limites) 6-20 V
- Broches d'E / S numériques 54 (dont 14 fournissent une sortie PWM)
- Broches d'entrée analogique 16

- Courant CC par broche E / S 40 mA
- Courant CC pour 3,3 V Pin 50 mA
- Mémoire flash 256 Ko dont 8 Ko utilisés par le chargeur de démarrage
- SRAM 8 Ko
- EEPROM 4 Ko
- Vitesse d'horloge 16 MHz

3.2.3.2 Moteur pas à pas 28BYJ-48

Le moteur pas à pas est un moteur unipolaire à 4 enroulement avec réducteur et drive basé sur un ULN2003A permettant de contrôler directement le moteur avec un microcontrôleur : arduino le moteur est alimenté 5V à courant continu sans balais dans lequel la rotation est divisée en un certain nombre de pas qui résultent de la structure du moteur. Généralement, une rotation d'arbre complète de 360° est



Figure 3.17 a- Vanne motorisée avec un moteur pas à pas b- Moteur pas à pas 28BYJ-48 avec son circuit drive

divisée en 2048 pas, ce qui signifie qu'un seul pas d'arbre est effectué tous IMéthode :

3.2.4 Protocole de séchage :

3.2.4.1 Le principe de fonctionnement :

L'air est aspiré à travers une ouverture inférieure du capteur solaire par un ventilateur situé au-dessus de l'entrée solaire sensible. L'entrée est recouverte de plaques métalliques reliées au capteur solaire et à la sortie d'air. Le séchoir solaire absorbe la lumière du soleil émise par la plaque métallique peinte en noir, ce qui réchauffe l'air qui passe en dessous et le fait monter. L'air chauffé est ensuite distribué par des tuyaux vers les chambres de séchage. Le contrôle du flux d'air est assuré par des

moteurs qui agissent comme des vannes, ouvrant et fermant les portes pour réguler l'air utilisé dans le processus de séchage.

Avant le séchage, nous préparons 8, Les moules sont presque égaux en taille et en formels moules sont pesés dans le but d'éliminer l'excès de poids lors de la mise en place du matériau à sécher. Ensuite, nous préparons le matériau à sécher, puis nous en prélevons deux échantillons et le mettons dans chaque moule et le pesons, puis le coupons en petits morceaux et presque égaux, puis nous mettons 4 moules dans chaque pièce.

Nous pesons les échantillons après 10 minutes, Le processus d'examen et de pesée est effectué à chaque fois 10 minutes de plus que la fois précédente.

3.2.4.2 Préparation de l'échantillon de tomate :

Nous avons choisi la tomate en raison de son utilisation beaucoup dans notre vie quotidienne et c'est ce qui nous permet de le sécher et de le conserver plus longtemps ; On prend une quantité de tomate, nous la trions et lavons à l'eau froide du robinet. elles sont réparties uniformément sur les étagères de l'armoire de séchage pour chaque séchoir et en mettons une quantité dans les quatre paniers affins que nous puissions les peser à différentes périodes de temps de séchage pour obtenir de courbes de séchage cinétiques pour extraire les résultats et comparer les deux séchoir solaire indirect améliorer et à séchoir solaire indirect simple. La tomate est découpée en tranche pour faciliter l'opération de séchage.

Prélever un petit échantillon de la tomate préparé, puis couper 1 à 2 cm d'épaisseur, ces en mai le dans 5 panier et pesons après sécher dans le séchoir du labo durant 72h après en l'extrayons et pesons, pour déterminer la cinétique de séchage, nous avons procédé avec le protocole suivant :

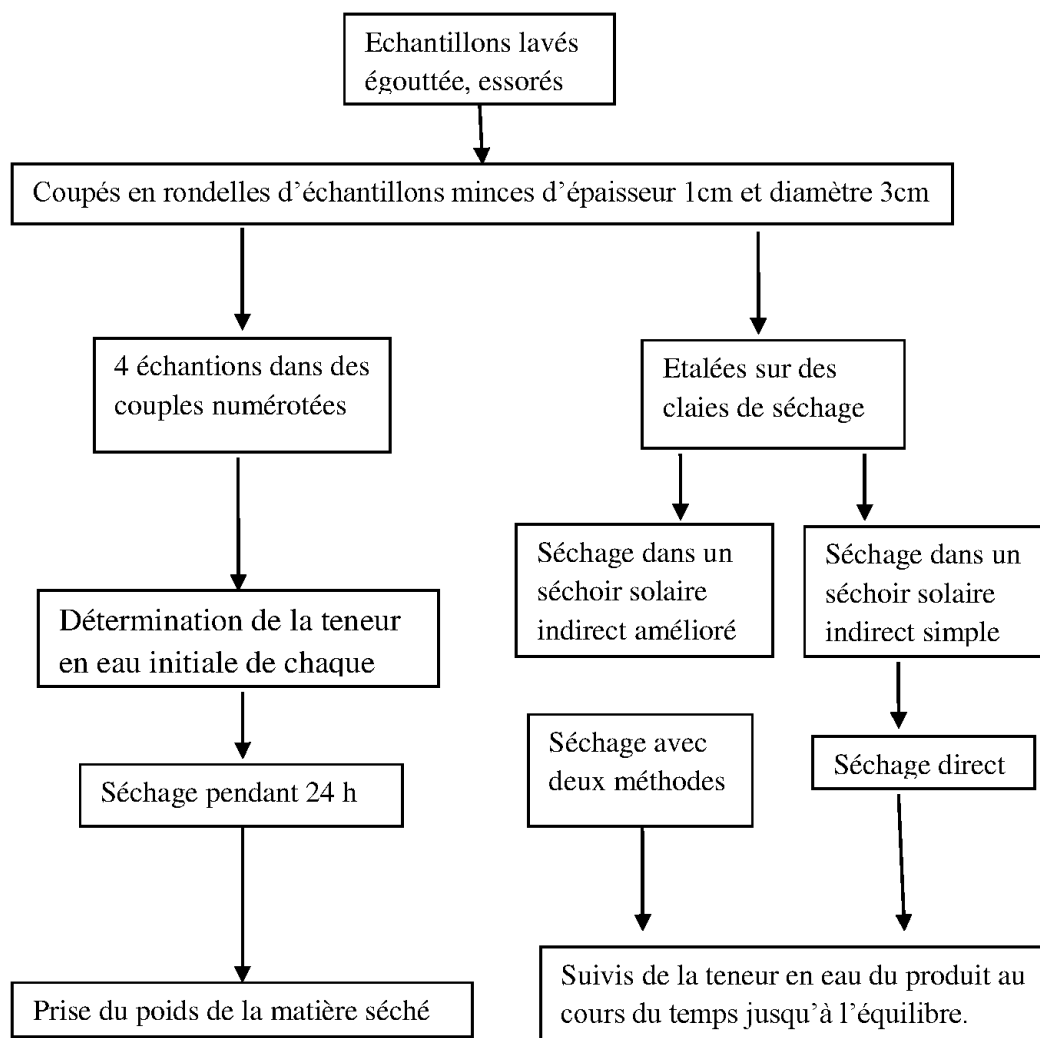


Figure 3.18 Figure3- 18schéma représentant le protocole de séchage du tomate

3.2.5 Acquisition de données de température :

Les signaux sont envoyés au keithley via un thermocouple placé à plusieurs endroits différents, Dans le boîtier de capteurs et de dérivation et à l'intérieur de la chambre de séchage Lorsque les signaux sont reçus, ils sont envoyés à l'ordinateur via les threads réseau et y sont traduits. Les données sont enregistrées dans l'ordinateur toutes les 3 minutes pour connaître les résultats de température à mesurer.

3.2.6 Gestion et contrôle de l'air de séchage :

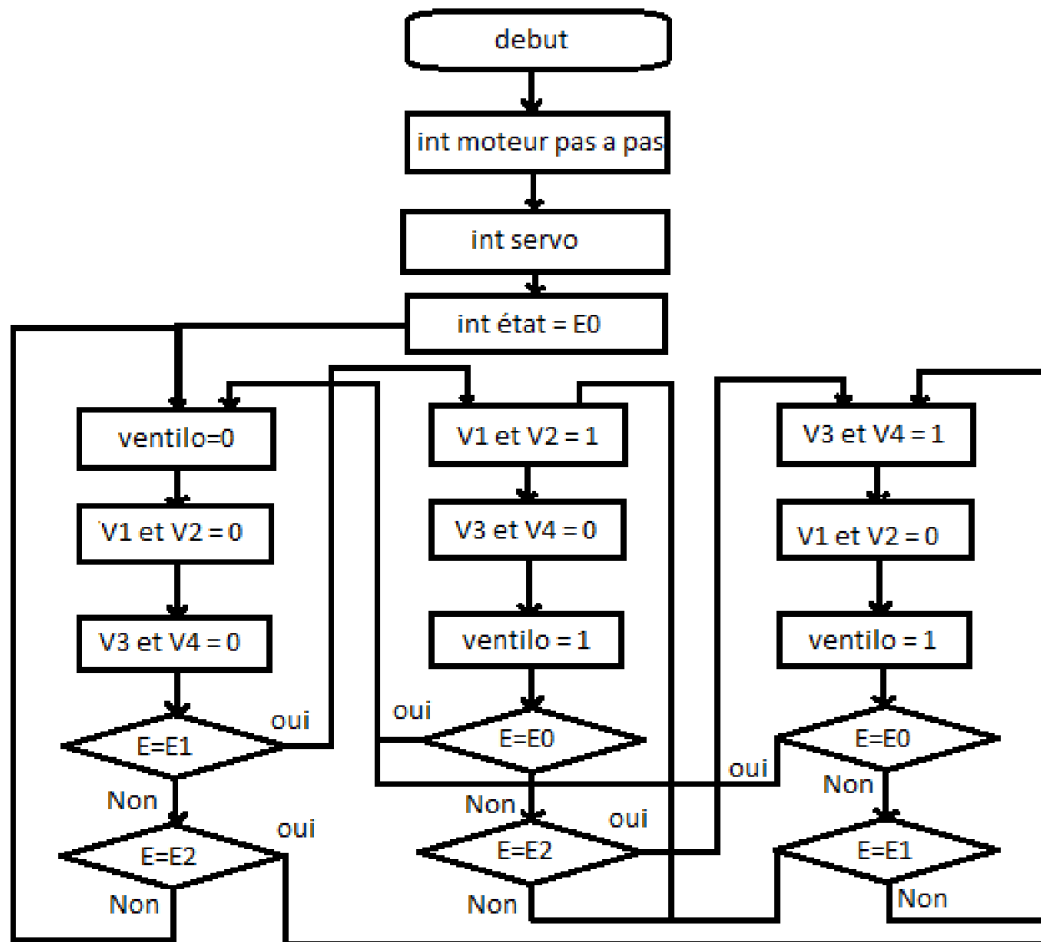


Figure 3.19 Algorithme de gestion du séchoire implémenté dans Arduino

La Figure 3.19 représente la structure organisationnelle du mécanisme Arduino et sa gestion des ventilateurs, portes, etc., à l'aide d'un moteur, et cela se fait à l'aide d'un servomoteur.

Nous expliquerons comment créer une structure organisationnelle pour le mécanisme Arduino comme suit :

Tout d'abord, l'Arduino est alimenté, puis il allume les moteurs les uns après les autres, puis on allume le moteur

Dans l'état initial, toutes les portes sont fermées et le moteur est arrêté

Dans le premier cas, les portes 1 et 2 s'ouvrent, les portes 3 et 4 restent fermées, puis on allume le ventilateur.

Dans le deuxième cas, les portes 1 et 2 se ferment et les portes 3 et 4 s'ouvrent en même temps, et le ventilateur reste en marche ; Le processus reste cyclique entre le premier et le deuxième cas.

3.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit le séchoir solaire indirecte que nous avons, conçu ainsi le système de gestion de l'air chaud. Nous avons décrit aussi le protocole de séchage et le fonctionnement de système de contrôle et d'acquisition.

Chapitre 4

Résultats et discussions

4 Résultats et discussions :

Les expériences ont eu lieu sur la plate-forme expérimentale de Ghardaïa, située à une latitude de 32,37 degrés nord et une longitude de 3,77 degrés ouest. Ces expériences ont été menées dans le but d'examiner les performances thermiques de deux séchoirs solaires indirects identique avec et sans système de gestion des vannes. Les tests ont été effectués dans des conditions opérationnelles réalistes propres à la région de Ghardaïa. L'objectif principal de l'étude était d'analyser les caractéristiques de séchage des tomates sur une période de quatre jours consécutifs. L'évaluation de l'efficacité thermique des séchoirs solaires indirects, avec et sans produits, a été réalisée en évaluant l'efficacité du système et en surveillant les températures de l'air dans les séchoirs.



Figure 4.1 Photographie de la plate-forme d'expérimentation d'URAER.

La région est exposée aux fluctuations météorologiques, il pleut souvent et les vents soufflent rarement en raison de conditions météorologiques défavorables.

4.1 Description de la zone d'étude :

Ghardaïa est située dans une région aride et desséchée du sud de l'Algérie, à environ 600 kilomètres au sud de la capitale (voir figure IV.2). Elle est définie par une position géographique à 32°36 de latitude nord et 3°48 de longitude est, avec une altitude de 450 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette région est réputée pour

son ensoleillement abondant, avec un pourcentage particulièrement élevé d'heures de clarté. La moyenne annuelle du rayonnement solaire sur un plan horizontal dépasse les 6 000 Wh/m², et le soleil brille plus de 3 000 heures par an. Les hivers à Ghardaïa peuvent être extrêmement froids, marqués par des tempêtes de sable occasionnelles provenant du sud-ouest vers la fin de la saison, qui peuvent créer d'importantes perturbations dues à la poussière. Les étés, quant à eux, connaissent des températures caniculaires pouvant dépasser 45 degrés Celsius, tandis que les hivers sont relativement plus frais. Les gelées sont rares et légères.

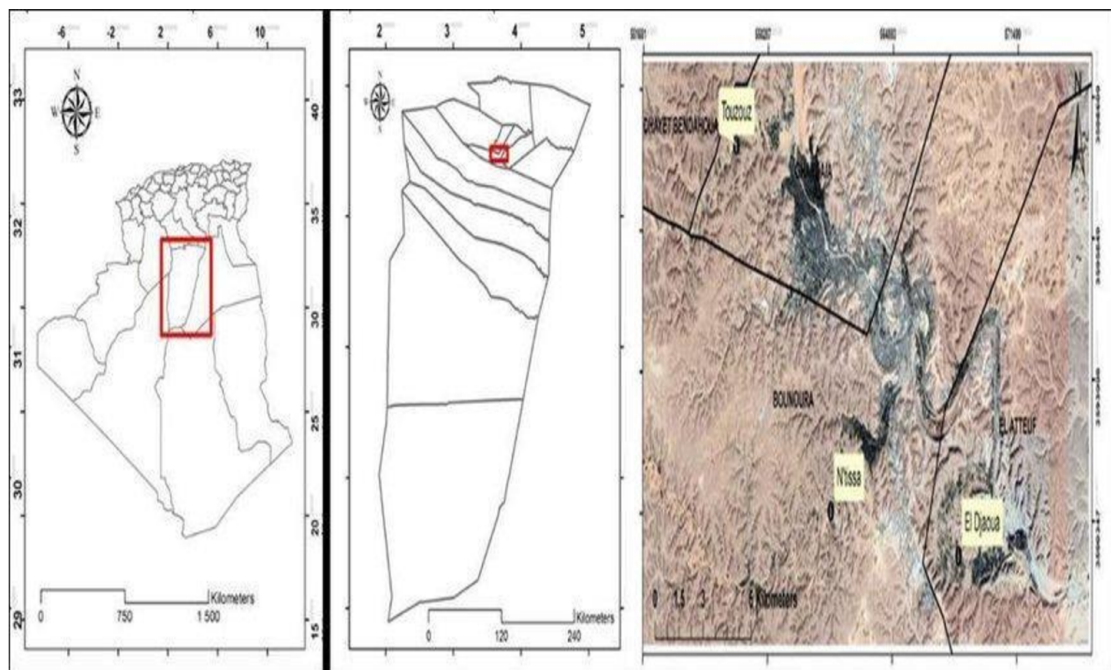


Figure 4.2 Situation géographique de la province de Ghardaïa.

4.2 Différentes positions des thermocouples dans les chambres de séchage :

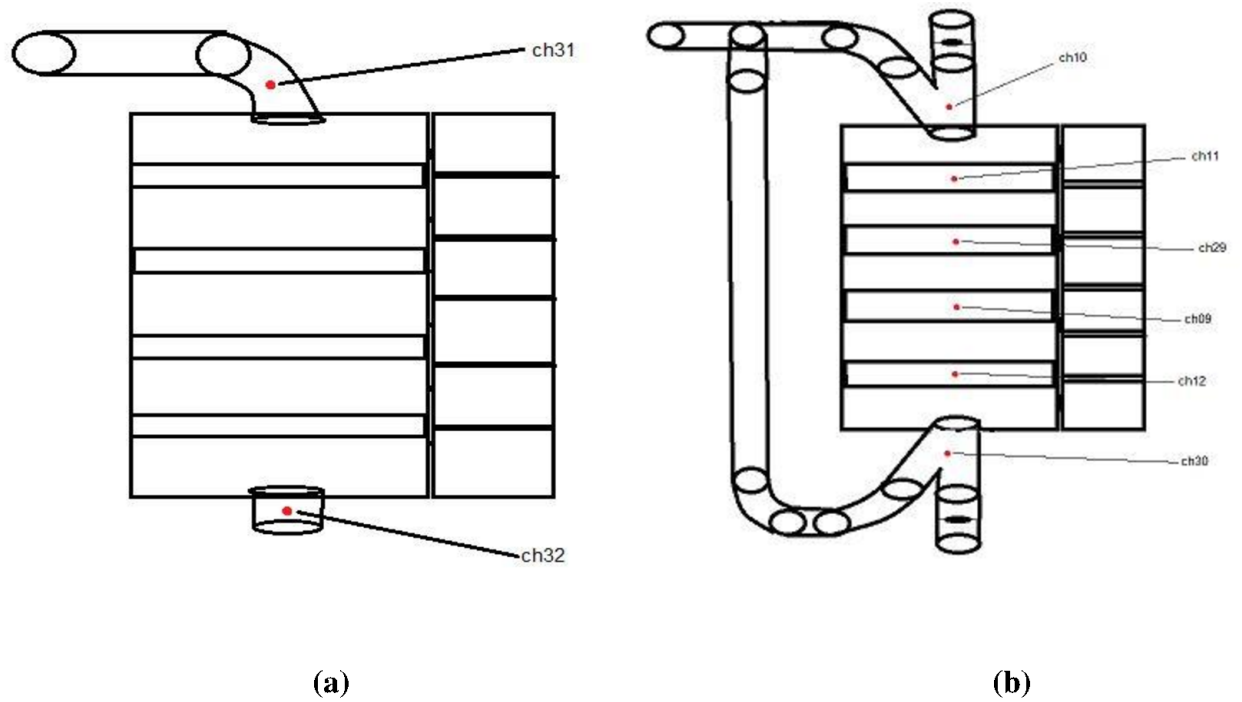


Figure 4.3 Figure IV.3 Différentes positions des thermocouples dans les chambres de séchage des séchoirs solaires de type indirect. (a) sans système de la gestion des vannes, (b) muni de système de la gestion des vannes.

4.3 Performance thermique de deux séchoirs solaires indirects sans produits:

- ❖ Chambre de séchoir sans système de la gestion des vannes (simple):

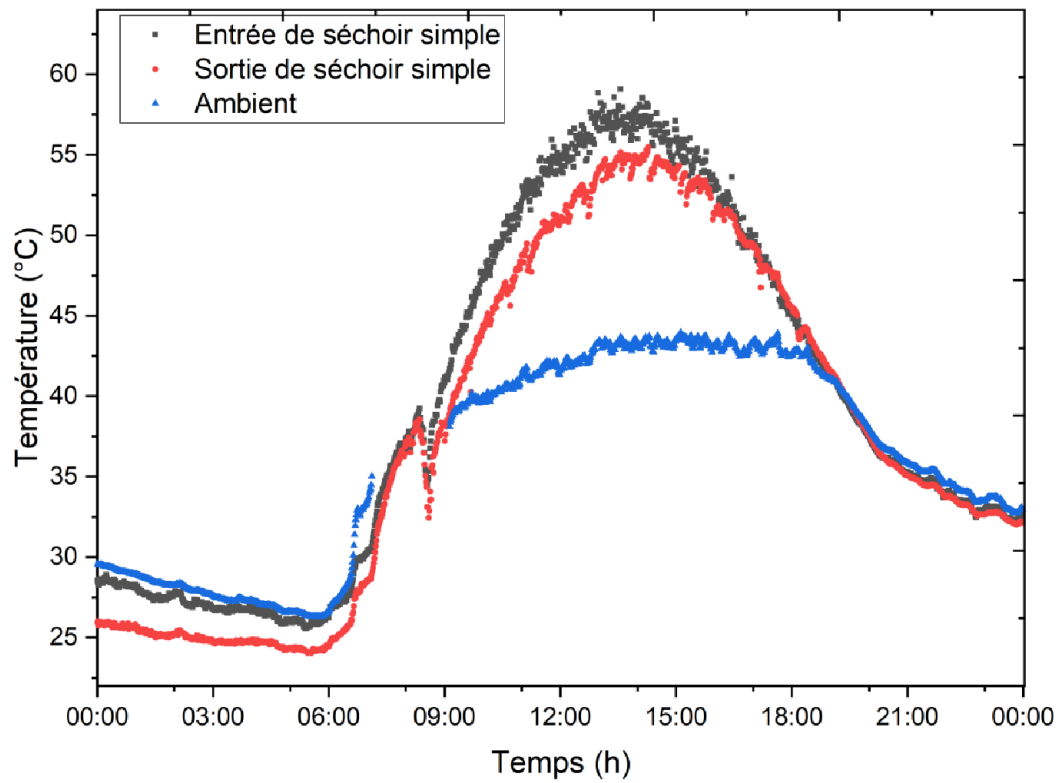


Figure 4.4 courbe thermique de la chambre de séchage d'un séchoir sans système de la gestion des vannes

La figure 4.4 montre des changements de température en fonction du temps pour l'entrée et la sortie dans le séchoir solaire indirect simple ceci est comparé de l'air ambiant pendant une journée entière.

Chambre de séchoir muni de système de la gestion des vannes(amélioré):

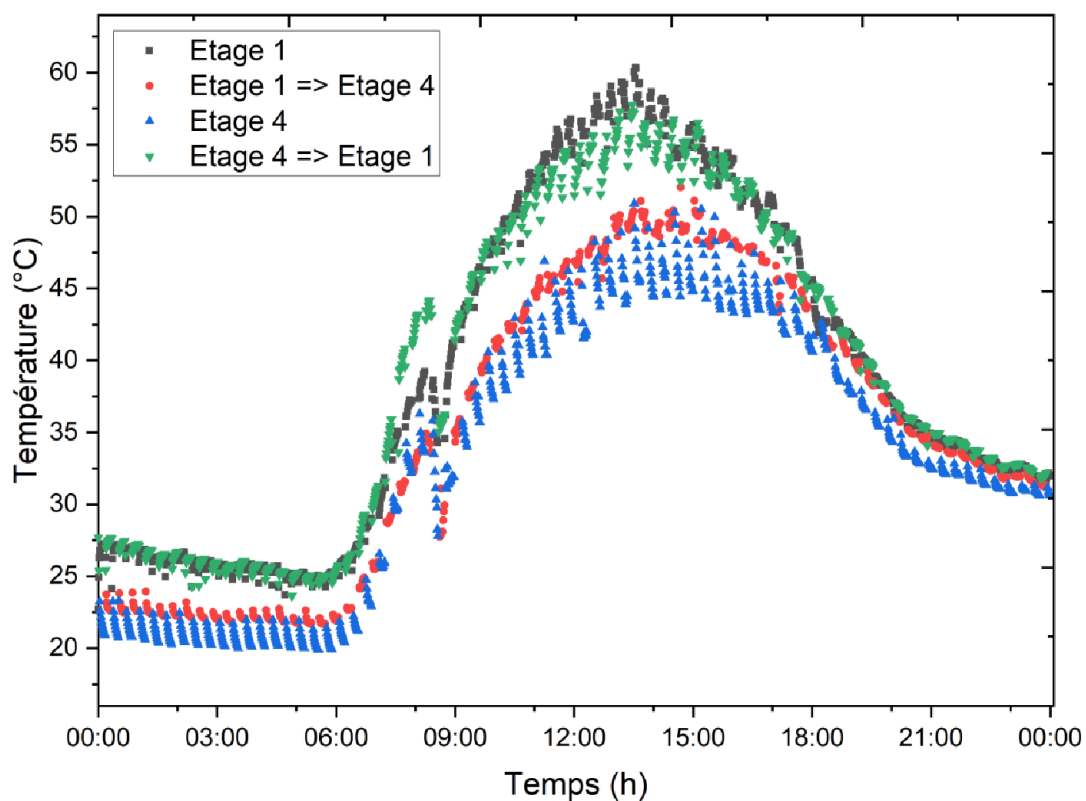


Figure 4.5 Courbe thermique de la chambre de séchage d'un séchoir muni de système de la gestion des vannes

La figure 4.5 montre l'évolution de la température en fonction du temps à l'aide des vannes qui contrôlent le flux d'air chaud en monte de la chambre de séchage.

4.3.1 Différentes positions du thermocouple dans le collecteur :

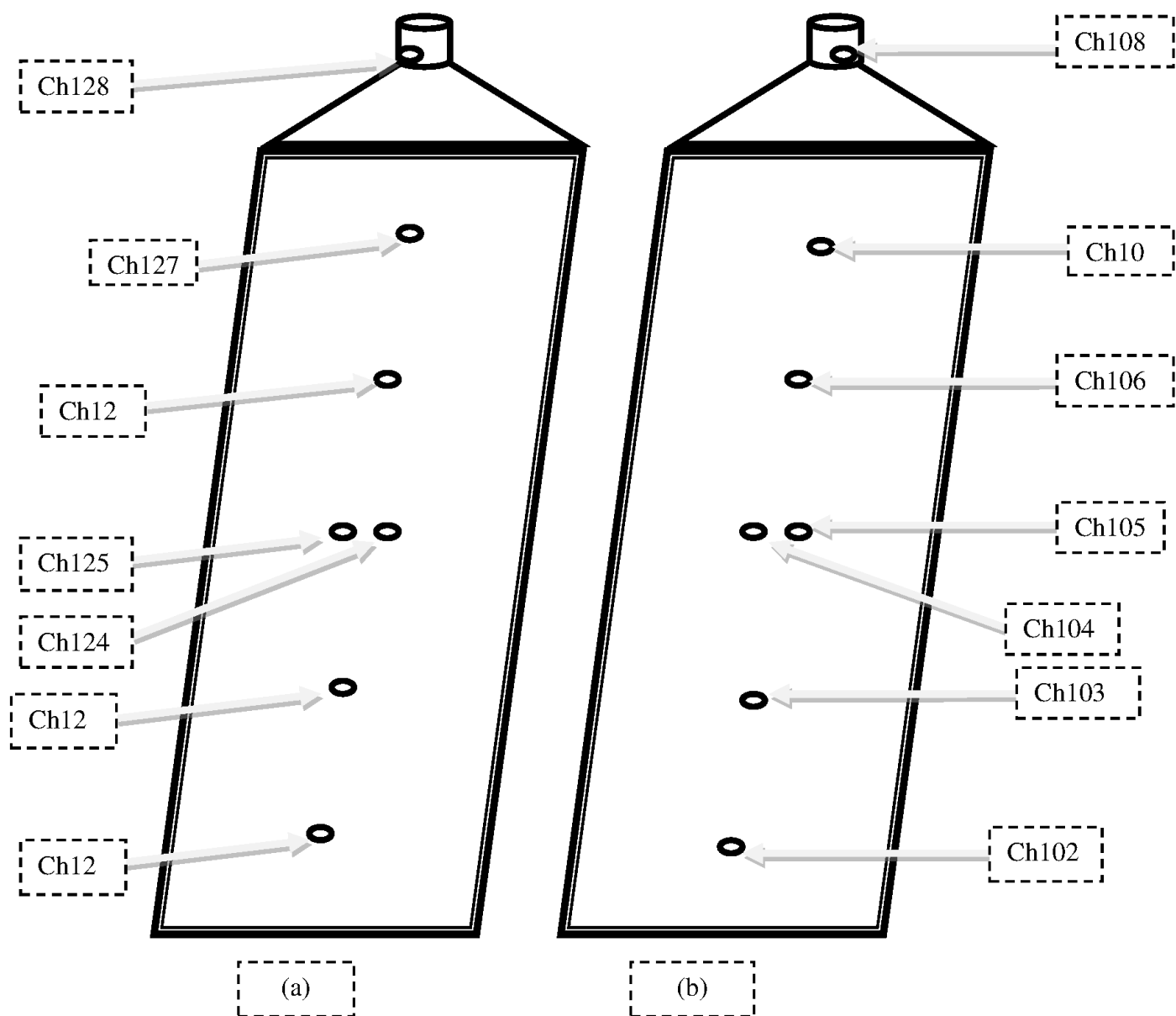


Figure 4.6 Différentes positions des thermocouples dans le capteur pour les deux modèles de séchoir solaire de type indirect à plaque galvanisée. (a) amélioré, (b) simple

Nous utilisons les capteurs pour absorber la réyonnement de l'énergie solair pour augmenter la température d'air que antre dans le capteur et transformet la dans les chambres de séchager

4.3.2 Performance thermique des deux capteurs solaires :

Nous avons étudié les performances thermiques de deux séchoirs sans et muni de système de la gestion des vannes dans l'Unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables (URAER). Au cours du processus de test, il a été constaté que les deux présentaient un comportement thermique presque similaire. Cette similarité a été confirmée en comparant les courbes représentant les températures à l'entrée, la sortie, et le milieu des capteurs solaires, comme le montrent La Figure 4.7 et Figure 4.8

Sans système de la gestion des vannes (simple):

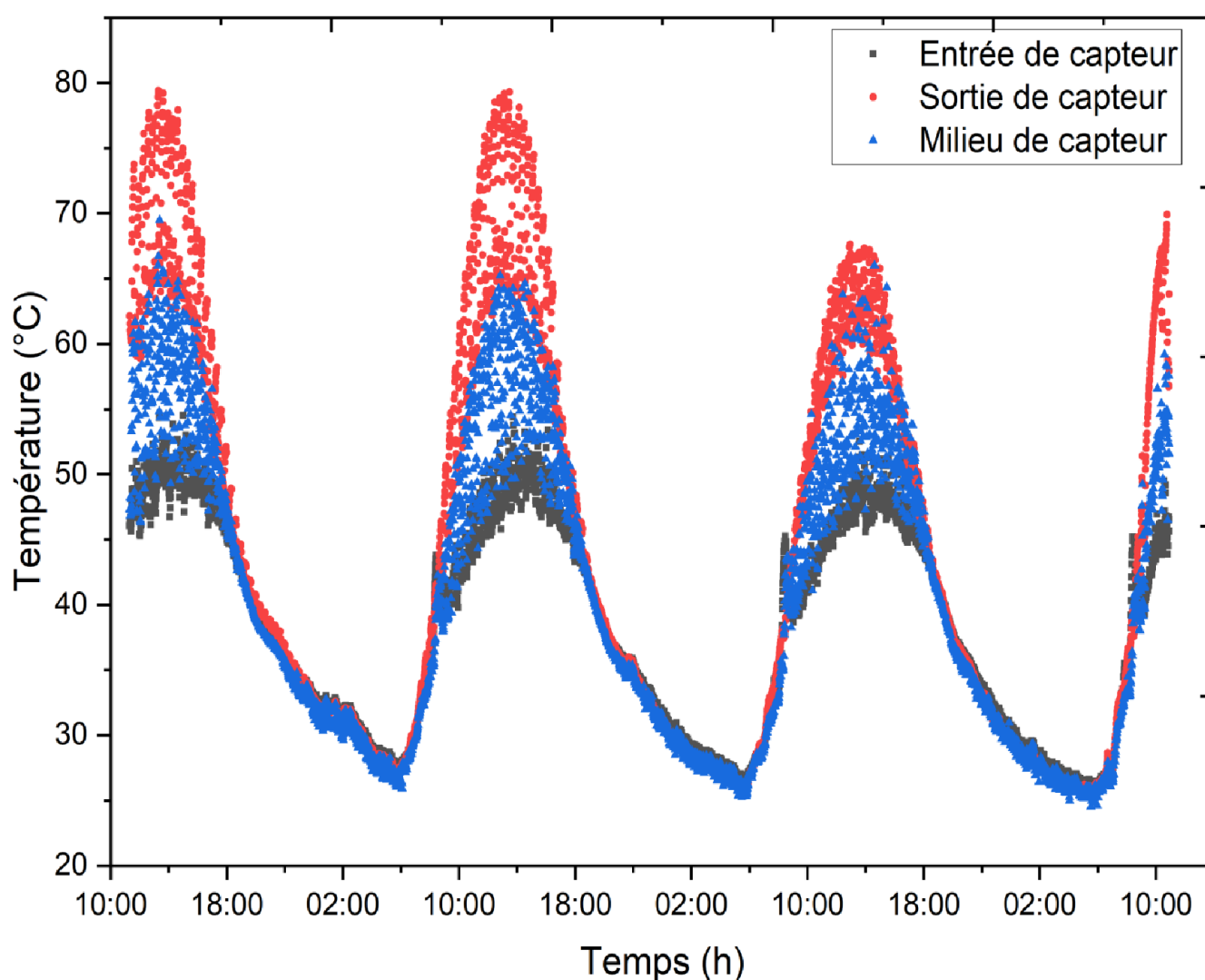


Figure 4.7 Courbe thermique pour un capteur solaire simple

La courbe dans la figure 4.7 montre la quantité de chaleur absorbée par la rayonnement de l'énergie solaire pendant toute la période de séchage pour la séchoir solaire indirect simple.

- Muni de système de la gestion des vannes (amélioré):

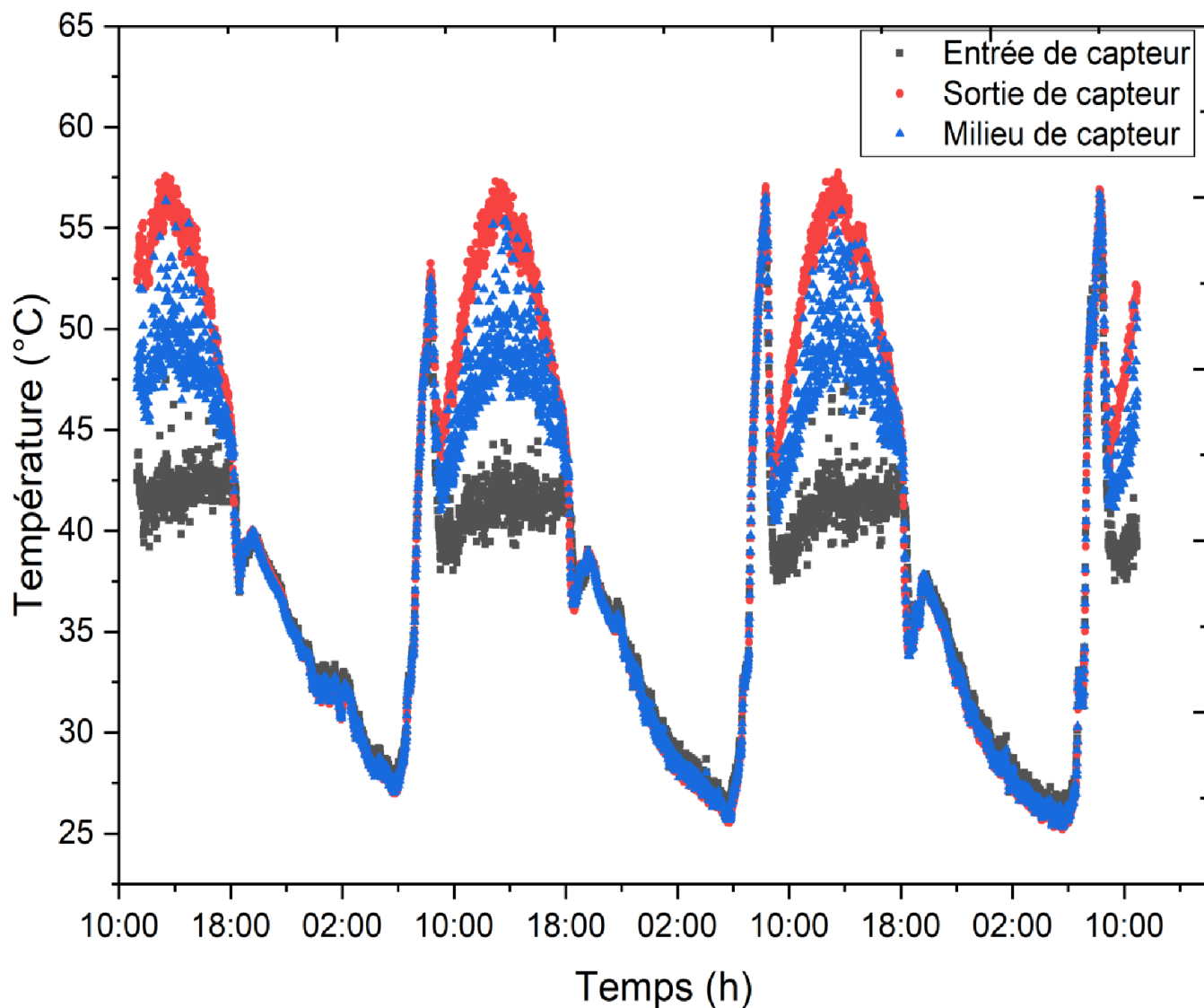


Figure 4.8 Courbe thermique pour un capteur solaire amélioré

La courbe de la figure 4.8 montre des changement de température absorbés par le capteur solaire durant la période de séchage par rapport le séchoir solaire indirect amélioré .

4.4 Séchage de tomates dans deux modèles de séchoir solaire indirect :

4.4.1 Cinétique de séchage des tomates au 16 juillet 2023 :

Une quantité d'échantillons de 347,65 grammes a été prélevée pour le prototype de séchage solaire indirect simple et de 331,98 grammes pour le prototype de séchage solaire indirect amélioré. La (Figure 4.9 et Figure 4.10) montre la cinétique de séchage des tomates en termes de teneur en eau sèche :

- Séchoir sans système de la gestion des vannes (simple):

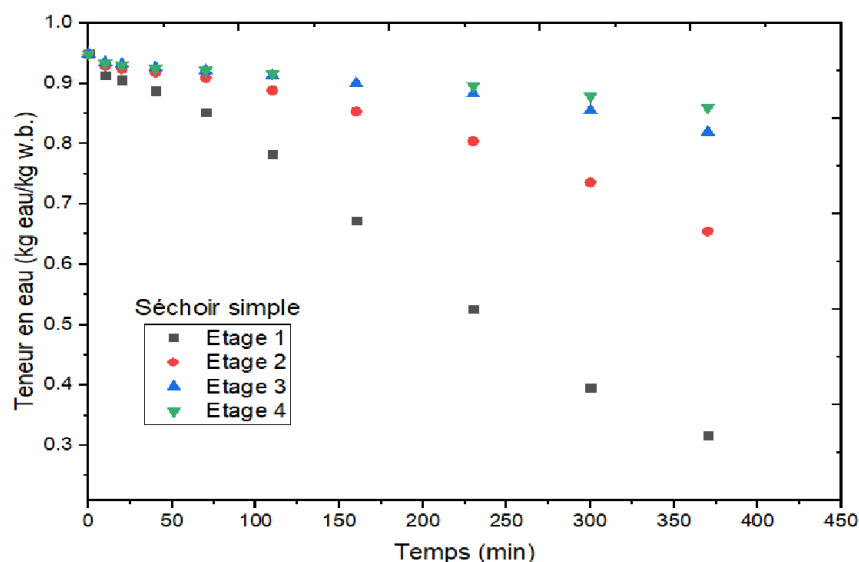
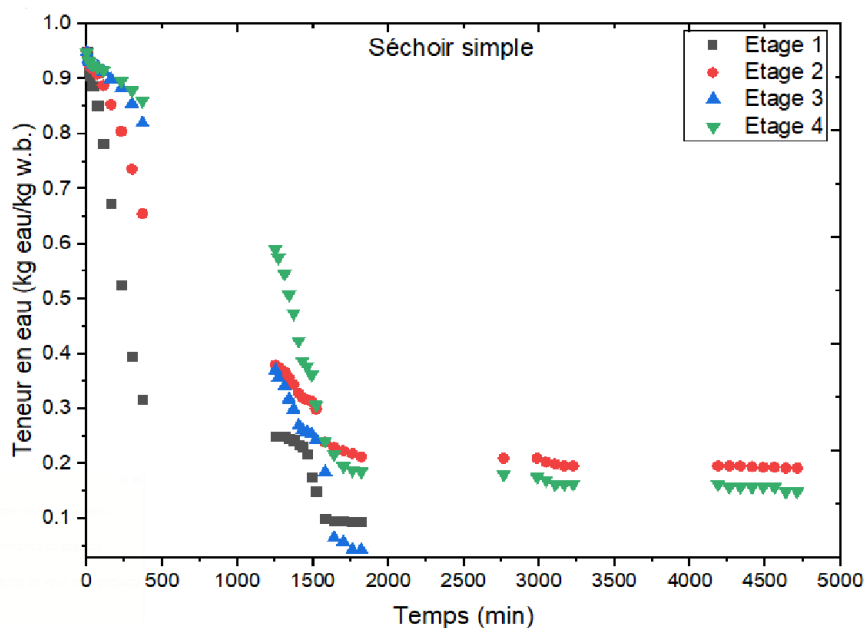


Figure 4.9 Variation de la teneur en eau dans le temps pour les tomates

La figure 4.9 montre que la période pendant 0 et 450 minutes la différent de la gestion d'air dans les étages de la chambre de séchage dans le séchoir solaire indirect simple.

- Séchoir muni de système de la gestion des vannes (amélioré):

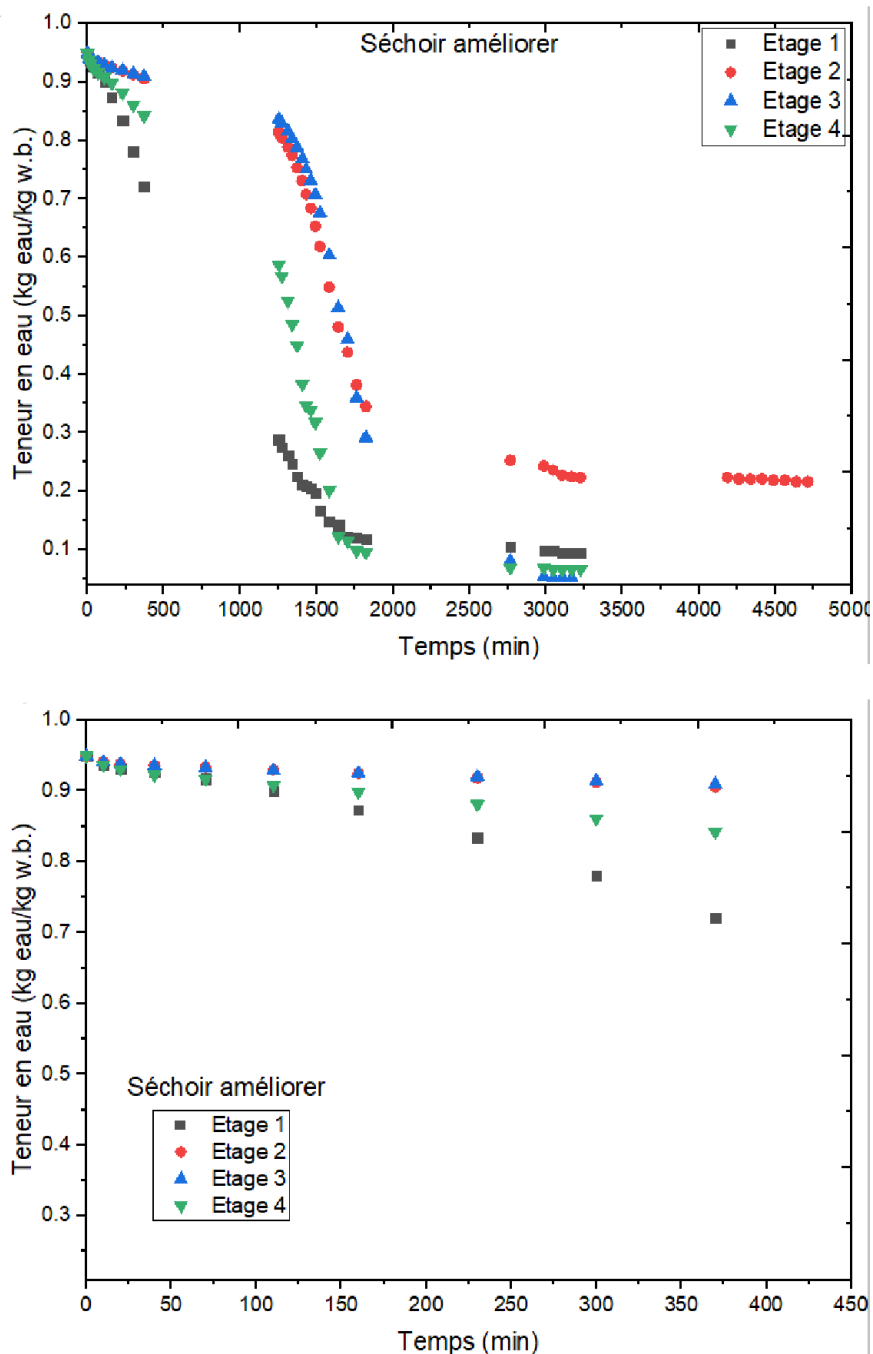


Figure 4.10 Variation de la teneur en eau dans le temps pour les tomates

La figure 4.10 montre que la période pendant 0 et 450 minutes l'efficacité de la diffèrent de la gestion d'air dans les étages de la chambre de séchage dans le séchoir solaire indirect amélioré.

4.5 Discussion des Résultats

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de Master sont prometteurs et témoignent de l'efficacité de la solution proposée pour résoudre le problème du séchage non homogène des aliments dans un séchoir solaire indirect. Une des principales conclusions tirées de cette recherche est la réduction significative de l'inégalité de séchage observée après l'intégration du système de gestion du flux d'air, qui a permis de diriger alternativement le flux d'air en haut et en bas de l'armoire de séchage. Cette réduction est cruciale car elle garantit un séchage plus uniforme des aliments, ce qui est essentiel pour préserver la qualité des produits finaux.

En examinant les différences de teneur en eau entre les étagères du séchoir, il est clair que le système de gestion des vannes a joué un rôle majeur dans la réduction de ces différences. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : dans le séchoir équipé du système de gestion des vannes, la différence de teneur en eau entre les étagères est remarquablement faible. En particulier, la différence est de 0 % entre les étagères 1 et 2, de 7.69 % entre les étagères 2 et 3, et de 20.88 % entre les étagères 3 et 4. Ces chiffres indiquent clairement que les produits séchés sur ces étagères atteignent des niveaux de séchage similaires.

En revanche, dans le séchoir sans système de gestion des vannes, les différences de teneur en eau sont nettement plus élevées. Par exemple, la différence de teneur en eau est de 4.65 % entre les étagères 1 et 2, de 24.42 % entre les étagères 2 et 3, et de 62.79 % entre les étagères 3 et 4. Ces résultats mettent en évidence le contraste marqué entre les deux configurations de séchoir et soulignent l'impact positif de la solution innovante sur l'homogénéité du séchage.

De plus, ces résultats sont basés sur des expérimentations approfondies, ce qui renforce la crédibilité de cette étude. La validation expérimentale confirme l'efficacité de la solution proposée et la validité des conclusions tirées de ce travail.

En conclusion, ce projet de Master a réussi à concevoir, développer et analyser expérimentalement un système de gestion du flux d'air innovant pour un séchoir solaire indirect. Les résultats obtenus, étayés par des chiffres significatifs, ouvrent la voie à des applications potentielles dans le domaine du séchage solaire des aliments, en contribuant à résoudre un problème fondamental lié à l'homogénéité du séchage. Ce travail constitue une base solide pour de futures recherches et développements dans ce domaine passionnant.

Conclusion et Perspectives

5 Conclusion et les perspectives

Conclusion

Ce projet de Master a représenté une étape cruciale dans la recherche visant à améliorer le processus de séchage solaire des aliments, en particulier dans un contexte de séchage non homogène. L'objectif principal était de concevoir, développer et évaluer expérimentalement un système de gestion du flux d'air innovant pour un séchoir solaire indirect. Les résultats obtenus ont été extrêmement encourageants, démontrant de manière convaincante que l'intégration de ce système sophistiqué, contrôlé par des vannes papillon pilotées par une carte Arduino, permet de réduire de manière significative les différences de teneur en eau entre les étagères de l'armoire de séchage.

La réduction de l'inégalité de séchage est d'une importance capitale pour maintenir la qualité des produits finaux, en particulier dans le domaine de la production alimentaire. Les chiffres obtenus illustrent clairement l'efficacité de la solution proposée, avec des différences de teneur en eau négligeables entre les étagères dans le séchoir équipé du système de gestion des vannes. Ces résultats sont en contraste marqué avec le séchoir sans le système, où les différences de teneur en eau sont considérablement plus élevées.

Ce projet de Master a donc relevé avec succès le défi de l'homogénéisation du séchage dans l'armoire de séchage d'un séchoir solaire. Ces conclusions constituent une avancée significative dans le domaine du séchage solaire des aliments, offrant de nouvelles perspectives pour l'industrie agroalimentaire et les secteurs connexes.

Perspectives

Les résultats positifs obtenus dans le cadre de ce projet de Master ouvrent la voie à plusieurs perspectives de développement futur :

Optimisation et Affinage : Il est possible d'approfondir les recherches pour optimiser davantage le système de gestion du flux d'air, en explorant différentes configurations de vannes, de capteurs et d'algorithmes de contrôle pour maximiser l'homogénéité du séchage.

Applications Industrielles : Cette solution innovante peut être adaptée pour des applications industrielles à plus grande échelle dans le domaine du séchage solaire des aliments. Les avantages potentiels en termes de réduction des pertes de qualité des produits alimentaires peuvent être évalués.

Études Complémentaires : Il serait bénéfique de mener des études complémentaires pour évaluer les aspects économiques, environnementaux et énergétiques de l'application de ce système de gestion du flux d'air à grande échelle.

Séchage d'autres Produits : L'extension de cette technologie au séchage d'autres produits agricoles.

En conclusion, ce projet de Master a non seulement réussi à résoudre un problème de séchage non homogène dans un séchoir solaire, mais il a également ouvert la voie à de nouvelles opportunités et perspectives de recherche et de développement.

L'innovation et l'ingéniosité déployées dans ce travail offrent des solutions potentielles pour améliorer l'efficacité et la qualité du séchage solaire, contribuant ainsi à la promotion des énergies renouvelables et à la satisfaction des besoins en produits alimentaires durables.

Références

- [1] M.M. AMIN, K.M.E. AMINE, Dimensionnement et conception mécanique d'un séchoir thermique rotative d'engrais, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2020.
- [2] (!!! INVALID CITATION !!! {}).
- [3] A. Bahadj, Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre, (2014).
- [4] A. Benseddik, Amélioration de la qualité et de la performance du séchage solaire des produits agro-alimentaires par insertion d'un traitement de détente instantanée contrôlée (DIC), analyse expérimentale, modélisation empirique et phénoménologique, (2018).
- [5] B. Yasser, N. Chihabeddine, ETUDE EXPERIMENTALE D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN SECHOIR SOLAIRE DE TYPE SERRE, Université de Ouargla, 2020.
- [6] L. BARKA, D. MERAHI, Étude comparative entre les différentes techniques de séchage solaire des feuilles de menthe, Université de Tlemcen, 2022.
- [7] B. Dadda, S. Kherrou, L. Serir, Réalisation d'un séchoir solaire indirect, Revue des énergies renouvelables 2008 (2008) 127-134.
- [8] R. Messaoudi, H. Baadi, S. Manaa, ETUDE THEORIQUE DU SECHAGE SOLAIRE DIRECTE, (2021).
- [9] S. Khaldi, Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie, (2018).
- [10] S. Janjai, B.K. Bala, Solar drying technology, Food Engineering Reviews 4 (2012) 16-54.
- [11] M. Touati Tliba, B. Drihem, Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues, (2018).
- [12] S. Manaa, Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des isolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques, (2017).
- [13] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, (2006).
- [14] B. Saïd, Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées, (2015).
- [15] A. Ben Saha, S. Bousmaha, ETUDE COMPARATIVE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRE SOUS CLIMAT DE LA REGION DE GHARDAÏA, (2020).
- [16] S.M. Shalaby, M.A. Bek, Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium, Journal of Clean Energy Technologies 3(3) (2015) 176-180.
- [17] D. Jain, P. Tewari, Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage, Renewable energy 80 (2015) 244-250.
- [18] S.K. Sansaniwal, M. Kumar, Analysis of ginger drying inside a natural convection indirect solar dryer: An experimental study, Journal of Mechanical Engineering and Sciences 9 (2015) 1671-1685.
- [19] D. Mennouche, B. Bouchekima, S. Zighmi, A. Boubekri, S. Boughali, A. Matallah, An experimental study on the drying of peanuts using indirect solar dryer, Progress in Clean Energy, Volume 2: Novel Systems and Applications (2015) 1115-1124.

-
- [20] V.N. Hegde, V.S. Hosur, S.K. Rathod, P.A. Harsoor, K.B. Narayana, Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana, *Energy, sustainability and Society* 5 (2015) 1-12.
- [21] S. Vijayan, T.V. Arjunan, A. Kumar, Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer, *Innovative food science & emerging technologies* 36 (2016) 59-67.
- [22] L. Blanco-Cano, A. Soria-Verdugo, L.M. Garcia-Gutierrez, U. Ruiz-Rivas, Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer, *Applied Thermal Engineering* 108 (2016) 1086-1094.
- [23] V. Shrivastava, A. Kumar, Experimental investigation on the comparison of fenugreek drying in an indirect solar dryer and under open sun, *Heat and Mass Transfer* 52 (2016) 1963-1972.
- [24] L. Blanco-Cano, A. Soria-Verdugo, L. Miguel Garcia-Gutierrez, U. Ruiz-Rivas, Evaluation of the maximum evaporation rate in small-scale indirect solar dryers, *Journal of Solar Energy Engineering* 138(2) (2016) 024502.
- [25] A. Lingayat, V.P. Chandramohan, V.R.K. Raju, Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying, *Energy Procedia* 109 (2017) 409-416.
- [26] H. Essalhi, R. Tadili, M.N. Bargach, Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test, *Energy procedia* 141 (2017) 29-33.
- [27] M. Castillo-Téllez, I. Pilatowsky-Figueroa, E.C. López-Vidaña, O. Sarracino-Martínez, G. Hernández-Galvez, Dehydration of the red chilli (*Capsicum annum* L., costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer, *Applied thermal engineering* 114 (2017) 1137-1144.
- [28] W. Wang, M. Li, R.H.E. Hassanien, Y. Wang, L. Yang, Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango, *Applied Thermal Engineering* 134 (2018) 310-321.
- [29] M. Goud, M.V.V. Reddy, V.P. Chandramohan, S. Suresh, A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of *Capsicum Annum* and *Abelmoschus esculentus* with dryer performance, *Solar Energy* 194 (2019) 871-885.
- [30] F.C. Tedesco, A.J. Bühler, S. Wortmann, Design, construction, and analysis of a passive indirect solar dryer with chimney, *Journal of Solar Energy Engineering* 141(3) (2019) 031015.
- [31] Y.O. Azouma, L. Drigalski, Z. Jegla, M. Reppich, V. Turek, M. Weiß, Indirect convective solar drying process of pineapples as part of circular economy strategy, *Energies* 12(15) (2019) 2841.
- [32] P. Demissie, M. Hayelom, A. Kassaye, A. Hailesilassie, M. Gebrehiwot, M. Vanierschot, Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer, *Energy Procedia* 158 (2019) 1128-1134.
- [33] H.Ö. Güler, A. Sözen, A.D. Tuncer, F. Afshari, A. Khanlari, C. Şirin, A. Gungor, Experimental and CFD survey of indirect solar dryer modified with low-cost iron mesh, *Solar Energy* 197 (2020) 371-384.
- [34] S. Hatami, G. Payganeh, A. Mehrpanahi, Energy and exergy analysis of an indirect solar dryer based on a dynamic model, *Journal of Cleaner Production* 244 (2020) 118809.
- [35] A. Sözen, F.Ş. Kazancıoğlu, A.D. Tuncer, A. Khanlari, Y.C. Bilge, A. Gungor, Thermal performance improvement of an indirect solar dryer with tube-type absorber packed with aluminum wool, *Solar Energy* 217 (2021) 328-341.

[36] S. Singh, R.S. Gill, V.S. Hans, M. Singh, A novel active-mode indirect solar dryer for agricultural products: Experimental evaluation and economic feasibility, *Energy* 222 (2021) 119956.