

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

CHEBOUROU Nour El Houda et **ZERRADI Rania**

Sujet

Optimisation du transfert de chaleur dans un séchoir solaire direct par l'intégration des obstacles pour améliorer le séchage des produits agricoles

Soutenue publiquement le / / 2025, devant le jury composé de :

M. BENRAMDANE Mohammed	Dr.	Univ. Tlemcen	Président
M. BEGAG Abdelaziz	Dr.	Univ. Tlemcen	Examineur
M. SAIM Rachid	Pr.	Univ. Tlemcen	Encadrant
M. BENSEDDIK Abdelouahab	Pr.	URAER Ghardaïa	Co-encadrant

Année universitaire: 2024 - 2025

Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que nous ressentons aujourd'hui. Ce travail représente l'aboutissement d'un parcours marqué par des doutes, des efforts soutenus, mais surtout par de belles rencontres et des soutiens précieux et inestimables.

Avant tout, nous tenons à exprimer notre gratitude infinie envers Dieu Tout-Puissant, source de force, de sagesse et de persévérance, qui nous a guidés tout au long de ce travail.

*Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à nos encadrants, le Docteur **KHERRAFI Mohammed Abdelbassit**, le Professeur **BENSEDDIK Abdelouahab** et le Professeur **SAIM Rachid**, pour la qualité de leur encadrement, leur disponibilité, leur patience ainsi que la richesse de leurs conseils. Leur expertise, leur rigueur scientifique et leur soutien sans faille ont grandement contribué à la réussite de ce travail de recherche.*

*Aussi, nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail. Nous citerons notamment Messieurs **BENRAMDANE Mohammed** et **BEGAG Abdelaziz**. Leur disponibilité, la pertinence de leurs remarques et la qualité de leurs échanges ont grandement enrichi cette soutenance. Nous leurs sommes profondément reconnaissantes pour le temps consacré à l'examen attentif de notre mémoire.*

En outre, nous témoignons notre reconnaissance la plus sincère à nos chers parents, véritables sources d'inspiration et de force. Leur soutien indéfectible, leurs sacrifices silencieux, leur amour profond et leurs encouragements constants ont été essentiels à notre épanouissement personnel et à l'aboutissement de ce travail. Rien de tout cela n'aurait été possible sans leur présence à nos côtés, dans les moments de doute comme dans ceux de réussite.

Enfin, nous citerons notre harmonieuse collaboration en tant que binôme, ainsi que la persévérance et l'engagement dont nous avons fait preuve tout au long de ce travail. Cette expérience a été marquée par l'écoute, le respect mutuel et un véritable esprit d'équipe, qui ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Ce mémoire est le fruit d'un effort commun, porté par une volonté partagée d'apprendre, de progresser et de surmonter tous les défis, ensemble.

Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa. Nous exprimons notre profonde reconnaissance envers cette institution pour les moyens techniques et scientifiques qu'elle a mis à notre disposition, ainsi que pour l'environnement de recherche stimulant qu'elle nous a offert. A toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous adressons nos plus sincères remerciements.
CHÉBOUROU Nour El Houđa et ZERRADI Rania

Dédicaces

Avec tous nos sentiments de respect, et avec l'expression de notre reconnaissance, nous dédions notre remise de diplôme et notre joie :

À nos parents,

qui nous ont donné la vie, l'amour inconditionnel, le courage et la foi. Merci pour vos sacrifices silencieux, votre patience infinie, et votre soutien sans faille à chaque étape de notre parcours. Vos prières nous ont aidées, vos paroles nous ont apaisées, et votre confiance nous à motivées.

À nos frères et sœurs,

Youcef, Rayane, Raouf, Raghda, Ritedj, Narimen, pour leur amour.

À nos amis,

Wissal, Istabrak, Fatima Zohra, Manar, Nour El Houda, et Léonard. Merci d'avoir été à nos côtés tout au long de la période de stage. Votre amitié a été un vrai soutien, et nous vous en sommes profondément reconnaissantes.

À monsieur le chef département de génie mécanique,

Monsieur BENRAMDAN Mohammed a qui nous exprimons notre gratitude la plus sincère pour son engagement constant, sa disponibilité et son encadrement tout au long de ces quatre années d'apprentissage. Grace à vous, notre parcours a été plus structuré, plus riche, et toujours orienté vers l'excellence.

À Monsieur OUCI Djamel et Madame BELGHERRBI Samia,

que nous remercions infiniment pour leurs idées inspirantes, et leur précieuse contribution à la réflexion autour de notre projet. Votre regard critique et vos suggestions nous ont permis d'améliorer considérablement la qualité de notre travail.

A tous nos collègues de la promotion master 2 mécanique énergétique.

ZERRADI RANIA et CHEBOUROU Nour El Houda

ملخص

في المناطق المشمسة والريفية، يعد التجفيف بالطاقة الشمسية طريقة مستدامة لحفظ المنتجات الزراعية. ومع ذلك، غالبًا ما تعاني المجففات الشمسية المباشرة من قيود مثل بطء التجفيف والتوزيع غير المتكافئ للحرارة وانخفاض الكفاءة الحرارية. تهدف هذه الدراسة إلى معالجة هذه المشكلات من خلال تحسين أداء المجفف الشمسي المباشر. تم اختبار أربعة تكوينات تجريبية. أظهر التكوين المدمج أفضل النتائج، محققًا وقت تجفيف أسرع، وزيادة معدل التجفيف، وتحسنًا كبيرًا في الانتشار الفعال للرطوبة، مما يشير إلى انتقال الرطوبة الداخلية بشكل أسرع. كانت الكفاءة الحرارية أعلى في المجفف المحسن، بينما ساعدت وحدة PCM في الحفاظ على استقرار درجة الحرارة حتى بعد غروب الشمس. وأظهر التحليل الاقتصادي فترة استرداد قصيرة، مما يجعل هذا المجفف المحسن حلاً قابلاً للتطبيق وفعالاً من حيث التكلفة لصغار المزارعين. وبشكل عام، تقدم التعديلات المقترحة طريقة بسيطة ومؤثرة في الوقت نفسه لتعزيز سرعة التجفيف وكفاءة الطاقة والاستدامة في المجففات الشمسية المباشرة.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي مباشر، العوائق، المواد متغيرة الطور، معدل التجفيف، معامل الانتشار الفعال، الكفاءة الحرارية.

Résumé

Dans les régions ensoleillées et rurales, le séchage solaire est une méthode durable de conservation des produits agricoles. Cependant, les séchoirs solaires directs souffrent souvent de limitations telles qu'un séchage lent, une distribution inégale de la chaleur et une faible efficacité thermique. Cette étude vise à résoudre ces problèmes en améliorant les performances d'un séchoir solaire direct. Quatre configurations expérimentales ont été testées. La configuration combinée a donné les meilleurs résultats, avec un temps de séchage plus court, un taux de séchage plus élevé et une amélioration significative de la diffusivité effective de l'humidité, qui indique un transport interne plus rapide de l'humidité. L'efficacité thermique était plus élevée dans le séchoir amélioré, tandis que le MCP permettait de maintenir la stabilité de la température même après le coucher du soleil. L'analyse économique a montré une courte période de récupération, faisant de ce séchoir amélioré une solution viable et rentable pour les petits agriculteurs. Dans l'ensemble, les modifications proposées constituent une méthode simple mais efficace pour améliorer la vitesse de séchage, l'efficacité énergétique et la durabilité des séchoirs solaires directs.

Mots-clés : Séchoir solaire direct, obstacles, matériaux à changement de phase, taux de séchage, diffusivité effective, efficacité thermique.

Abstract

In sunny and rural regions, solar drying is a sustainable method for preserving agricultural products. However, direct solar dryers often suffer from limitations such as slow drying, uneven heat distribution, and low thermal efficiency. This study aims to address these issues by improving the performance of a direct solar dryer. Four experimental configurations were tested. The combined configuration showed the best results, achieving a faster drying time, an increased drying rate, and a significant improvement in effective moisture diffusivity, which indicates faster internal moisture transport. The thermal efficiency was higher in the improved dryer, while PCM helped maintain temperature stability even after sunset. The economic analysis showed a short payback period, making this enhanced dryer a viable and cost-effective solution for small-scale farmers. Overall, the proposed modifications offer a simple yet impactful method for enhancing drying speed, energy efficiency, and sustainability in direct solar dryers.

Keywords: Direct solar dryer, obstacles, phase change materials, drying rate, effective diffusivity, thermal efficiency.

Table des matières

Introduction générale	2
Chapitre I: Généralités sur le séchage solaire	
I. Introduction.....	5
I.1. Généralités sur le séchage.....	5
I.2. Choix de type de séchoir	6
I.3. Procédés de séchage	6
I.3.1. Séchage à l'aide d'une pompe à chaleur	6
I.3.2. Séchage à l'air chaud conditionné.....	7
I.3.3. Séchage sous vide	8
I.3.4. Pré-séchage	8
I.4. Classification des séchoirs solaires	9
I.4.1. Séchage à l'air libre.....	9
I.4.2. Séchage au soleil	10
I.4.2.1. Séchoir solaire direct.....	11
I.4.2.2. Séchoir solaire indirect.....	12
I.4.2.3. Séchoirs mixtes	13
I.4.2.4. Séchoirs hybrides	13
I.5. Variables d'état pertinents influant le séchage solaire.....	14
I.5.1. Température	14
I.5.2. Humidité de l'air.....	15
I.5.3. Pression	15
I.5.4. Vitesse de l'air	15
I.6. Composants des séchoirs solaires	16
I.6.1. Capteur solaire.....	16
I.6.2. Armoire de séchage	16
I.6.3. Système auxiliaire.....	17
I.7. Systèmes de stockage d'énergie dans les séchoirs solaires	17
I.8. Périodes de séchage.....	18
I.9. Transfert de chaleur	19
I.10. Matériaux à changement de phase (MCP).....	20
I.10.1. Fonctionnement d'un MCP	20

I.10.1.1. Absorption de chaleur (fusion) :	20
I.10.1.3. Stockage thermique :	20
I.10.1.3. Restitution de chaleur (solidification) :	20
I.10.2. Type de MCP.....	21
I.10.3. Critère de choix	21
I. Conclusion	22

Chapitre II: Recherche bibliographique

II. Introduction	24
II. Travaux antérieurs.....	24
II. Conclusion.....	44

Chapitre III: Matériels et méthodes

III. Introduction	Error! Bookmark not defined.
III. Matériel au champ expérimental de l'URAER	Error! Bookmark not defined.
III.1. Présentation du prototype conçu et mis au point	Error! Bookmark not defined.
III.2. Composant de contrôle du système	Error! Bookmark not defined.
a) Ventilateur	Error! Bookmark not defined.
a) Variateur de vitesse	Error! Bookmark not defined.
III.3. Instrumentation des prototypes	Error! Bookmark not defined.
a) Mesure des températures.....	Error! Bookmark not defined.
a) Mesure de la vitesse d'air de séchage	Error! Bookmark not defined.
a) Acquisition et traitement des données	Error! Bookmark not defined.
a) Pyranomètre.....	Error! Bookmark not defined.
III.4. Matériels utilisés dans le laboratoire de l'URAER	Error! Bookmark not defined.
a) Dessiccateur.....	Error! Bookmark not defined.
a) Etuve	Error! Bookmark not defined.
a) Balance	Error! Bookmark not defined.
a) Agitateur magnétique chauffant	Error! Bookmark not defined.
III.5. Matériel végétal.....	Error! Bookmark not defined.
III.6. Procédure expérimentale.....	Error! Bookmark not defined.
III.6.1. Pré-traitement	Error! Bookmark not defined.
III.6.1.1. Pré-traitements utilisés	Error! Bookmark not defined.
III.6.2. Matériau à changement de phase (MCP)	Error! Bookmark not defined.
III.6.3. Performance du système.....	Error! Bookmark not defined.

III.7. Expérience de séchage	Error! Bookmark not defined.
III.7.1. Teneur en eau.....	Error! Bookmark not defined.
III.7.2. Détermination de la diffusivité effective de l'eau dans le produit.	Error! Bookmark not defined.
not defined.	
III.8. Evaluation énergétique.....	Error! Bookmark not defined.
III.9. Etude économique	Error! Bookmark not defined.
III.9.1. Coût annualisé.....	Error! Bookmark not defined.
III.9.2. Économies sur le cycle de vie.....	Error! Bookmark not defined.
III.9.3. Période de récupération.....	Error! Bookmark not defined.
III. Conclusion	Error! Bookmark not defined.
Conclusion générale	45
References.....	48

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Points forts et limites du séchage solaire et du séchage traditionnel.10

Tableau III. 1. Caractéristiques nutritionnelles et visuelles de quelques produits alimentaires utilisés dans le séchage**Error! Bookmark not defined.**

Tableau IV. 1. Diffusivité effective**Error! Bookmark not defined.**

Tableau IV. 2. Variables économiques et de coût des séchoirs solaires directs pour le séchage des tomates.....**Error! Bookmark not defined.**

Liste des figures

Figure I.1. Schéma d'un système de séchage à pompe à chaleur en circuit fermé pour produits agricoles	7
Figure I.2. Système industriel de séchage à air chaud conditionné	7
Figure I.3. Schéma de principe d'un séchoir sous vide illustrant la circulation de l'eau sous basse pression.....	8
Figure I.4. Schéma du processus de pré-séchage et transfert vers le séchage final	8
Figure I. 5. Schéma des séchoirs solaires passifs, (a) type direct et (b) type indirect	9
Figure I.6. Schéma des séchoirs solaires actifs, (a) type direct et (b) type indirect	10
Figure I. 7. Principe d'un séchoir solaire direct	12
Figure I. 8. Schéma de principe d'un système de séchage solaire indirect	12
Figure I. 9. Séchoir solaire mode mixte.....	13
Figure I. 10. Schéma fonctionnel du séchoir solaire hybride	14
Figure I. 11. Capteur solaire	16
Figure I. 12. Armoire de séchage	17
Figure I. 13. Périodes de taux de séchage.....	19
Figure I.14. Illustration des trois modes de transfert de chaleur dans une habitation	19
Figure I.15. Diagramme des types de MCP.....	21
Figure II.1. Trois séchoirs solaires à légumes en mode direct (a, b et c sont respectivement des séchoirs solaires pour carottes, tomates et gombos. Tandis que d, e, et f sont respectivement des carottes, des tomates et des gombos)	25
Figure II.2. Schéma d'un séchoir solaire direct	26
Figure II.3. Séchoir expérimentale.....	26
Figure II.4. Séchoir domestique à étagères multiples de type direct	27
Figure II.5. Photo de l'appareil de source d'eau chaud et échangeur de chaleur à l'intérieur de la chambre de séchage	28
Figure II.6. Vue picturale du séchoir solaire (a) et schéma du système de séchoir solaire (b)	29
Figure II.7. Piment avant et après séchage	30
Figure II.8. Séchoir solaire direct avec feuilles d'oignon	30
Figure II. 9. Photomicrographies de poudre de curcuma provenant (a, b) d'un échantillon de curcuma séché directement au soleil et (c, d) d'un échantillon de curcuma séché à l'air chaud	31
Figure II. 10. Séchoir solaire à air chaud forcé	32
Figure II. 11. Schéma d'un séchoir solaire direct amélioré par l'intégration de panneaux photovoltaïques et d'un collecteur solaire d'air	33
Figure II. 12. Effet de la couleur de la couverture du séchoir solaire sur la qualité du séchage des feuilles de Neem et de feuilles amères	34
Figure II. 13. Image réelle du sécheur pendant le test	35
Figure II. 14. Coefficients de transfert de chaleur et différentes positions de température pour un séchoir solaire domestique à convection naturelle avec cavité d'air	36

Figure II. 15. (a) Séchage dans le séchoir solaire (b) séchage sur une plate-forme surélevée	37
Figure II. 16. Le prototype amélioré par les systèmes de récupération de chaleur et PCM ...	38
Figure II. 17. Dispositif expérimental ; (a) Séchoirs solaires avant modifications ; (b) Séchoirs solaires après modifications ; (c) Illustration schématique	39
Figure II. 18. a) Plante de ricin ; b) Capsule de ricin	40
Figure II. 19. Photographie du montage expérimental	40
Figure II. 20. Séchoir solaire vu de l'extérieur (a) et grilles de la chambre de séchage (b et c) du séchoir solaire	41
Figure II. 21. Étapes de fabrication de composites MCP à partir de mousse PIR pour le stockage d'énergie thermique	42
Figure II. 22. Étude de l'influence de la configuration des conteneurs à matériau à changement de phase (MCP) sur l'efficacité thermique des séchoirs solaire	43
Figure II. 23. Séchoir solaire tunnel à mode mixte avec stockage de chaleur latente (LHS) .	44

Nomenclatures

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: Chlorure de calcium hexa hydraté

CaCl_2 : Chlorure de calcium (anhydre)

CFD : Dynamique des Fluides Numérique

$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$: Acide ascorbique

C_p : Capacité thermique du fluide à pression constante ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

DSD : Séchoir solaire direct

HAD : Séchage à l'air chaud

HPD : Séchage par pompe à chaleur

HRSPCM : Système de récupération de chaleur avec matériau à changement de phase

HRS : Système de récupération de chaleur

ITSD : Séchoir solaire indirect

MCP : Matériaux à changement de phase

NACM : Mode de circulation d'air naturel

NCDS : Séchoir solaire domestique à convection naturelle

OSD : Séchage au soleil ouvert

P_a : Pression partielle de l'air sec en : Pa (pascals)

PV : Panneaux photovoltaïques

P_v : Pression partielle de la vapeur d'eau en : Pa (pascals)

$P_{v\text{-sat}}$: Pression de vapeur saturante en : Pa (pascals)

RMSE : Erreur quadratique moyenne

SAHPD : Séchage assisté par pompe à chaleur et énergie solaire

SD : Séchage solaire

TES : Stockage d'énergie thermique

V : Vitesse de déplacement du fluide en (m/s)

XEQ : Taux d'humidité à l'équilibre, souvent exprimé aussi en % ou kg d'eau / kg de matière sèche

Introduction générale

Introduction générale

L'agriculture joue un rôle fondamental dans l'économie de nombreux pays, en particulier dans les régions à climat chaud et ensoleillé, où la production de fruits, légumes, plantes médicinales et autres produits agricoles est abondante [1]. Toutefois, une grande partie de cette production est fortement périssable. En l'absence de moyens de conservation efficaces, d'importantes pertes post-récolte peuvent survenir, compromettant la rentabilité des exploitations agricoles et la sécurité alimentaire [2].

Le séchage constitue l'une des méthodes de conservation les plus anciennes et les plus largement utilisées. Il permet de prolonger la durée de vie des produits agricoles en réduisant leur teneur en eau, limitant ainsi le développement microbien et les réactions biochimiques indésirables [3]. Parmi les différentes techniques disponibles, le séchage solaire s'impose comme une solution à la fois écologique, économique et adaptée aux régions rurales ou isolées.

Ce séchage peut être réalisé de façon naturelle (exposition directe au soleil) ou à l'aide de séchoirs solaires, qui permettent un séchage plus rapide, hygiénique et contrôlé [4]. On distingue principalement deux types de séchoirs :

- Séchoirs solaires directs, où le produit est directement exposé au rayonnement solaire.
- Séchoirs solaires indirects, dans lesquels l'air est préalablement chauffé dans un capteur solaire avant d'être dirigé vers la chambre de séchage.

Malgré leurs avantages, les séchoirs solaires directs présentent certaines limitations :

- Temps de séchage relativement long ;
- Distribution non homogène de la température ;
- Faible efficacité du transfert thermique ;
- Circulation de l'air parfois peu optimisée.

Ces limites réduisent les performances globales du système et peuvent altérer la qualité finale des produits séchés. Il devient donc essentiel de rechercher des solutions pour améliorer l'efficacité thermique de ces dispositifs.

Le transfert de chaleur est un facteur clé dans ce processus. Une meilleure répartition de la chaleur et une circulation d'air optimisée permettent d'obtenir un séchage plus rapide, homogène et de qualité supérieure [5]. Parmi les approches envisageables, la modification du canal d'écoulement de l'air chaud constitue une piste prometteuse. Cela inclut l'intégration d'obstacles pour créer des turbulences, l'ajout de trous pour faciliter le renouvellement de

Introduction générale

l'air, ainsi que l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) capables de stocker et de restituer la chaleur.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, qui vise à évaluer les effets de ces différentes configurations sur le transfert thermique et l'efficacité globale du séchage dans un séchoir solaire direct. Quatre expériences ont été réalisées dans ce cadre :

1. Intégration d'obstacles ;
2. Ajout de trous d'aération ;
3. Combinaison obstacles + trous ;
4. Combinaison obstacles + trous + MCP.

L'objectif principal de ce mémoire est donc de proposer une amélioration du séchage solaire direct par une analyse expérimentale de ces configurations, afin d'augmenter l'efficacité thermique du système et de réduire la durée du séchage des produits agricoles.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente un aperçu global du séchage solaire, incluant la classification des séchoirs solaires, leurs composants principaux, les différents procédés de séchage, ainsi qu'une introduction aux mécanismes de transfert de chaleur et à l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour l'amélioration des performances thermiques.
- Le deuxième chapitre est dédié à une revue bibliographique des travaux expérimentaux effectués dans le domaine du séchage solaire direct.
- Le troisième chapitre présente les matériels et méthodes employés pour les investigations expérimentales.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de séchage solaire direct.

Enfin, une conclusion générale récapitule les résultats majeurs atteints.

Chapitre I

Généralités sur le séchage solaire

I. Introduction

Dans ce chapitre nous parlerons du séchage d'une manière générale, et de tout ce qui concerne le séchoir solaire et le transfert de chaleur. Nous évoquerons également le stockage d'énergie par l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui contribue à l'amélioration du fonctionnement du séchoir.

I.1. Généralités sur le séchage

Le séchage solaire est un procédé visant à éliminer l'eau d'un produit humide par évaporation, transformant ainsi un matériau initialement liquide ou solide en un produit final solide [6]. L'objectif principal de ce processus est de réduire la teneur en eau du produit afin que son activité hydrique atteigne un niveau permettant une conservation prolongée à température ambiante [7]. L'eau peut être extraite par des méthodes mécaniques ou thermiques. Le séchage est l'une des techniques clés pour préserver les aliments périssables, car en réduisant l'humidité, il inhibe l'activité des micro-organismes (levures, moisissures, bactéries) responsables de la dégradation. De plus, cette étape est essentielle pour certains produits, car elle diminue leur poids et leur volume, facilitant ainsi leur stockage et leur transport. En résumé, le séchage améliore la conservation, réduit les pertes post-récolte, simplifie le transport et permet une commercialisation tout au long de l'année [8].

Il existe une grande variété de séchoirs, classés selon différents critères. Par exemple, la texture du produit peut déterminer la méthode de manipulation et la manière dont il interagit avec l'air chaud sur la surface de séchage. Le principe de fonctionnement du séchoir est également un facteur de classification. Dans les séchoirs à ébullition, le produit est chauffé jusqu'à ce que la pression de vapeur de son eau équilibre la pression ambiante. Dans les séchoirs à entraînement, le produit est exposé à un courant d'air dont la pression de vapeur est inférieure à celle du produit [9].

Les séchoirs solaires se divisent en trois catégories : les séchoirs directs, où le produit est exposé directement au soleil ; les séchoirs indirects, où le produit n'est pas en contact direct avec les rayons solaires, et les séchoirs mixtes, qui combinent les deux approches. La vitesse du séchage et l'humidité ambiante sont des facteurs déterminants dans le choix de la méthode. En termes de conception, des éléments tels que l'absorbeur, les matériaux de construction, la pente et l'orientation du couvercle transparent par rapport au soleil jouent un rôle crucial [10].

I.2. Choix de type de séchoir

Les séchoirs solaires sont généralement classés en diverses catégories, selon leur mode de chauffage ou de fonctionnement :

- Séchoirs à énergie solaire indirecte.
- Séchoirs à énergie solaire hybride.
- Séchoirs solaires directs.
- Séchoirs solaires mixtes.

Lors de l'évaluation d'un séchoir solaire, les paramètres couramment mesurés et consignés peuvent être classifiés de la manière suivante :

➤ **Caractéristiques physiques du déshydrateur :**

- Genre, dimension, forme.
- Capacité à sécher.
- Nombre et superficie des tiroirs.
- Mode de chargement et de déchargement.

➤ **Performances thermiques :**

- Durée/taux de séchage.
- Température de l'air du sécheur et humidité relative.
- Flux d'air.
- Efficacité du processus de séchage.

➤ **Qualité du produit déshydraté :**

- Qualité exceptionnelle (teinte, parfum, saveur, consistance, arôme).
- Caractéristiques nutritives.
- Capacité à se réhydrater.
- Prix du séchoir et durée de récupération des coûts.

I.3. Procédés de séchage

Différentes méthodes sont employées, notamment :

I.3.1. Séchage à l'aide d'une pompe à chaleur

Les déshumidificateurs, également connus sous le nom de séchoirs à pompe à chaleur, fonctionnent exclusivement à l'électricité. Ces systèmes sont équipés d'un circuit de réfrigération comprenant une batterie froide, un évaporateur, une batterie chaude et un condensateur. La pompe à chaleur a la particularité de fournir plus d'énergie qu'elle n'en consomme [11]. On distingue deux modes de fonctionnement pour ces séchoirs :

En circuit fermé : aucun échange d'air n'a lieu avec l'extérieur.

En mode aéré : un renouvellement d'air est effectué avec l'extérieur afin de réguler la température à l'intérieur du séchoir.

Comparés aux séchoirs à air chaud climatisé, les séchoirs à pompe à chaleur opèrent à des températures plus basses et nécessitent des temps de séchage plus longs. Ils sont particulièrement adaptés pour le séchage des bois feuillus.

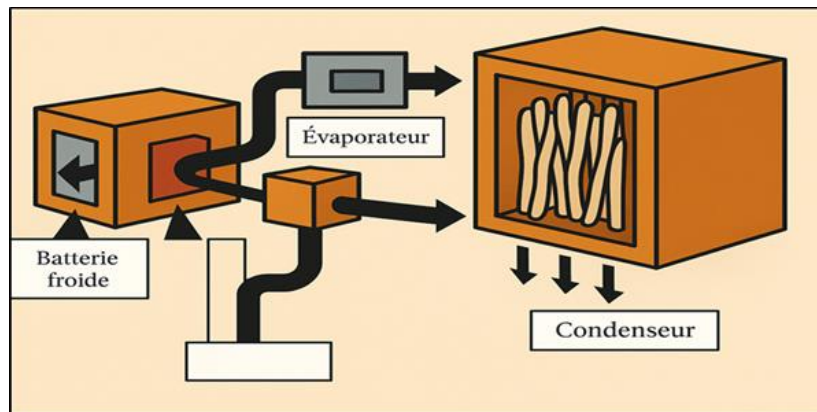


Figure I.1. Schéma d'un système de séchage à pompe à chaleur en circuit fermé pour produits agricoles

I.3.2. Séchage à l'air chaud conditionné

Cette méthode est la plus couramment utilisée. Elle permet de fonctionner sur une large plage de températures, pouvant atteindre jusqu'à 90 °C. L'élimination de l'humidité dans le séchoir se fait par échange de courants d'air avec l'extérieur. L'apport de chaleur peut être assuré directement par un brûleur ou indirectement via des batteries de chauffage, alimentées par de l'eau chaude, de la vapeur ou tout autre fluide thermique [12].

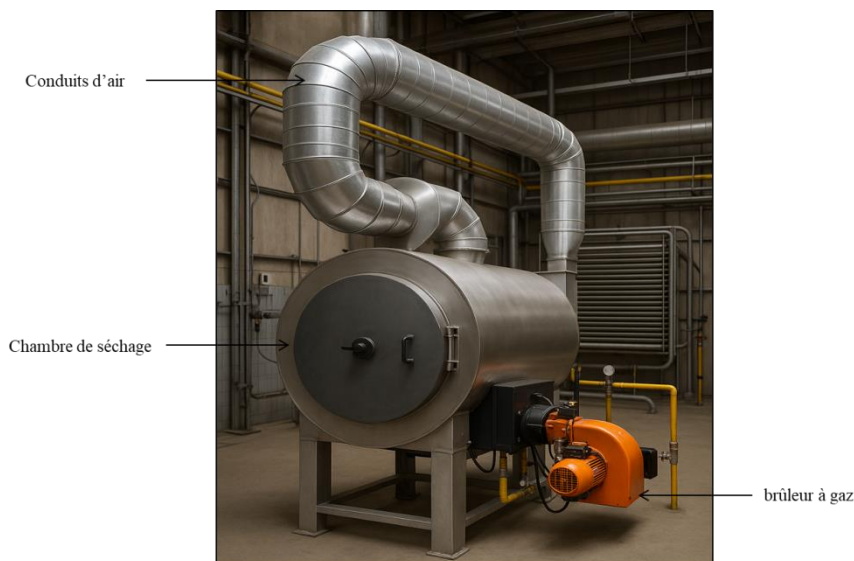


Figure I.2. Système industriel de séchage à air chaud conditionné

I.3.3. Séchage sous vide

Un séchoir sous vide consiste en une chambre étanche dans laquelle la pression est réduite grâce à une pompe à vide. C'est l'action combinée de la pression et de la température qui favorise la circulation de l'eau à l'intérieur des produits et accélère l'évaporation. La diminution de la pression facilite le mouvement de l'eau du centre vers la surface.

C'est cette propriété qui est exploitée dans le séchage sous vide, dont la rapidité est la caractéristique principale. Ce procédé est 3 à 6 fois plus rapide que le séchage à l'air chaud climatisé. Cette méthode est particulièrement adaptée pour le traitement de volumes importants [13].

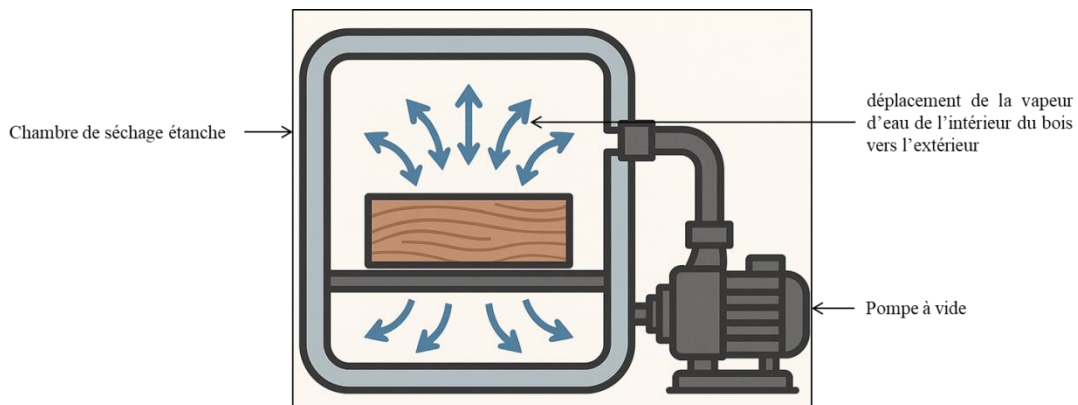


Figure I.3. Schéma de principe d'un séchoir sous vide illustrant la circulation de l'eau sous basse pression

I.3.4. Pré-séchage

Le pré-séchage constitue une phase initiale de séchage artificiel visant à réduire l'humidité du produit jusqu'à un taux prédéfini. Selon les besoins de l'utilisateur, les produits préséchés peuvent ensuite être transférés vers des cellules de séchage pour atteindre le niveau d'humidité final désiré. Cette approche permet d'améliorer la qualité des produits grâce à un processus de séchage contrôlé et précis [14].

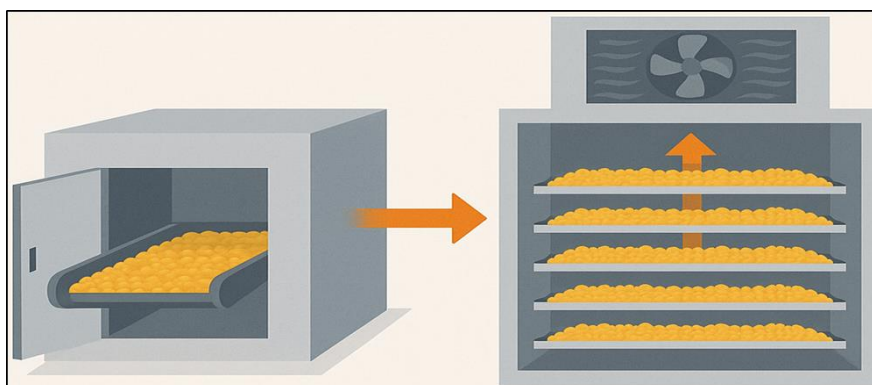


Figure I.4. Schéma du processus de pré-séchage et transfert vers le séchage final

I.4. Classification des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires peuvent être classés selon divers critères, en tenant compte des exigences et des préférences de l'utilisateur. On peut le classer selon deux paramètres majeurs : le type de flux d'air, qui peut être passif ou actif, et la méthode de transmission de chaleur du soleil au produit, qui peut être directe, indirecte, hybride ou mixte.

I.4.1. Séchage à l'air libre

Le séchage à l'air libre, aussi appelé séchage traditionnel ou naturel, est la méthode la plus ancienne. Elle consiste à exposer les produits à sécher dans des espaces bien ventilés et suffisamment espacés pour assurer une circulation d'air optimale. Cette technique, qui ne nécessite aucune source de chaleur artificielle, reste efficace dans les régions sèches et arides. Elle convient particulièrement aux petites productions destinées à l'autoconsommation ou à la consommation locale. Son principal avantage réside dans son faible coût matériel. Cependant, elle présente des inconvénients, tels que l'exposition des produits à la poussière, aux insectes et au risque de moisissures dues à l'absorption d'humidité nocturne. De plus, la vitesse de séchage dépendant des conditions climatiques, il est difficile, voire impossible, de contrôler précisément le temps de séchage et la qualité des produits. Pour limiter ces problèmes, les produits peuvent être abrités sous un toit ou recouverts de bâches étanches la nuit ou en cas de pluie. Pour accélérer l'évaporation, il est possible de remuer régulièrement les produits, d'utiliser des claies légères pour améliorer la circulation de l'air et garantir un séchage uniforme.

Les séchoirs solaires peuvent être classés en deux catégories : passifs et actifs. Les séchoirs solaires passifs reposent sur la convection naturelle pour faire circuler l'air, tandis que les séchoirs solaires actifs utilisent des ventilateurs ou d'autres dispositifs mécaniques pour forcer le mouvement de l'air. Le choix entre les deux dépend des besoins spécifiques de séchage, de la localisation géographique et des ressources disponibles [6].

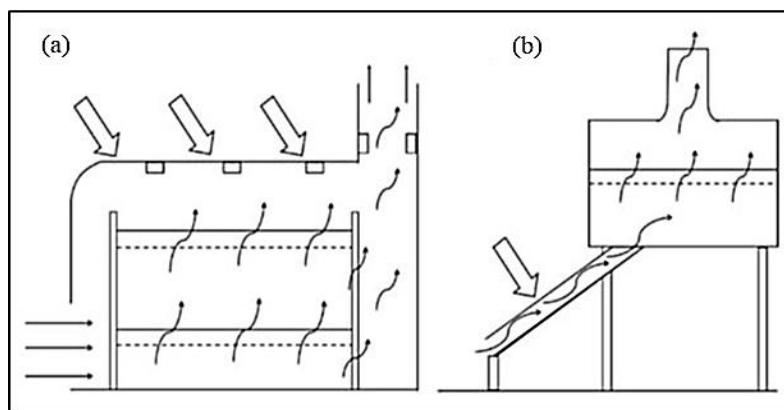


Figure I. 5. Schéma des séchoirs solaires passifs, (a) type direct et (b) type indirect

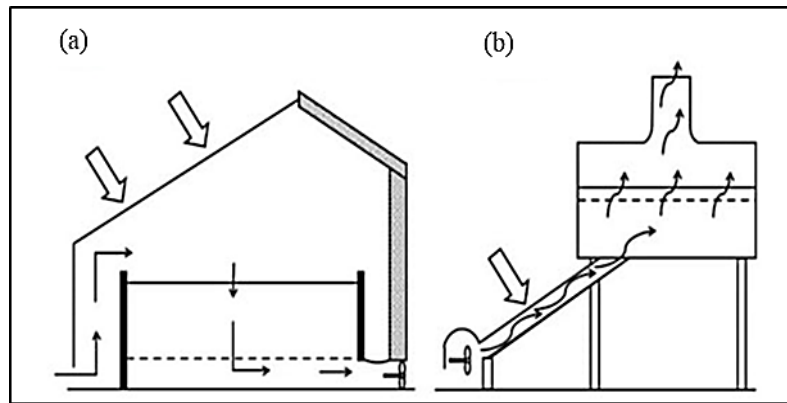


Figure I.6. Schéma des séchoirs solaires actifs, (a) type direct et (b) type indirect

I.4.2. Séchage au soleil

Le séchage solaire est une méthode qui se situe à mi-chemin entre le séchage artificiel et le séchage naturel. Il permet d'atteindre une humidité finale plus faible que le séchage à l'air libre, mais reste généralement supérieure à celle obtenue par le séchage artificiel. Les paramètres de séchage sont mieux contrôlés que dans le séchage à l'air libre, bien qu'ils soient moins précis que dans le séchage artificiel. L'énergie provient du soleil, dont les rayons, dont les longueurs d'onde varient principalement entre $0,25 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$, sont convertis en chaleur par un absorbeur. Celui-ci émet ensuite des radiations dans le spectre infrarouge.

Tableau I. 1. Points forts et limites du séchage solaire et du séchage traditionnel.

Séchage au soleil	Séchage à l'air libre
Bénéfices	
<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle précis du niveau d'humidité final souhaité. • Acquisition d'un produit de qualité (réduction des pertes). • Énergie « sans coût ». • Permet de diriger le processus de séchage. • Écarte tout danger d'infestation par des insectes ou des champignons. • Coût modéré à moyen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Séchage en douceur, grâce au cycle jour/nuit. • Aucun personnel spécialisé n'est nécessaire. • Gradient d'humidité faible à travers l'épaisseur. • Il y a peu de variation de couleur. • Aucune dépense en énergie nécessaire. • Énergie « gratuite » à disposition.
Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> • Investissement de départ conséquent. • Utilisation d'énergie électrique (en cas de 	<ul style="list-style-type: none"> • Lent séchage, (retard de réponse au marché défavorable).

présence d'un ventilateur). • Gestion du séchoir.	• Des pertes significatives causées par des problèmes de séchage. • Superficie considérable. • Danger d'infestation (par des insectes et des champignons). • Problème pour atteindre le niveau d'humidité désiré.
--	--

Selon leurs méthodes de chauffage et d'exploitation de l'énergie solaire, les systèmes de séchage solaire sont généralement classés en deux grandes catégories :

- Systèmes de séchage solaire actifs.
- Systèmes de séchage solaire passifs.

En fonction du type de séchoir et de l'utilisation de l'énergie solaire, ces deux catégories (actives et passives) peuvent être divisées en quatre sous-catégories spécifiques :

- Séchoirs solaires directs.
- Séchoirs solaires indirects.
- Séchoirs mixtes.
- Séchoirs hybrides.

I.4.2.1. Séchoir solaire direct

La méthode de séchage solaire direct, simple à mettre en œuvre, repose sur l'exposition directe des produits au soleil pour les déshydrater. Elle est facile à appliquer et utilise généralement des structures robustes et peu complexes, équipées d'un châssis vitré qui amplifie l'effet de serre [15].

Le séchoir exploite le tirage naturel généré par le réchauffement (effet de cheminée), l'action du vent sur les ouvertures ou l'utilisation d'un ventilateur pour assurer la circulation de l'air, grâce à la simplicité de sa conception. Cette méthode présente deux avantages principaux :

Protection accrue : Les produits sont mieux protégés contre les insectes, tels que les mouches.
Optimisation du séchage : L'effet de serre, similaire à celui d'un capteur solaire plan, améliore le bilan radiatif et augmente la température du produit à sécher, réduisant ainsi significativement les temps de séchage par rapport aux méthodes conventionnelles.

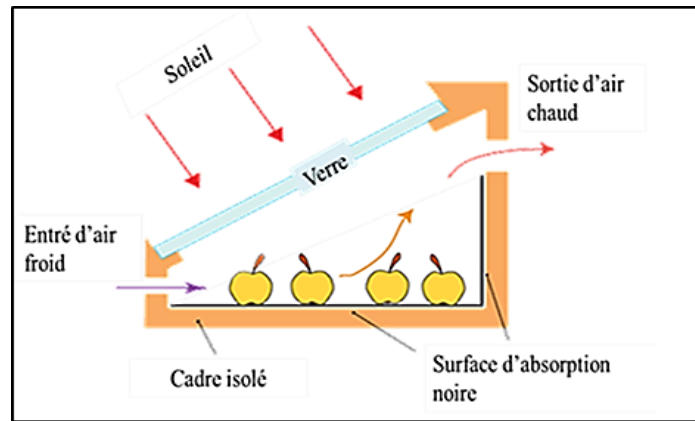


Figure I. 7. Principe d'un séchoir solaire direct

I.4.2.2. Séchoir solaire indirect

Dans cette méthode, les produits à sécher ne sont pas exposés directement aux rayons du soleil. Ils sont placés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local, dont la taille dépend de la quantité de produits à traiter. L'air frais est introduit dans la zone de séchage après avoir été réchauffé par des capteurs solaires ou d'autres préchauffeurs, en fonction du débit utilisé. Ce type de séchoir est généralement plus complexe et coûteux à installer que les séchoirs directs. Il peut être adapté à différentes échelles et est particulièrement adapté pour les produits sensibles au rayonnement solaire ou nécessitant un contrôle strict de la température, comme les fruits et légumes, dont l'apparence, la couleur, la qualité nutritive et gustative doivent être préservées avec soin [16].

En général, ce type de séchoir se compose de deux éléments principaux : un collecteur solaire, qui transforme l'énergie solaire en chaleur, et une chambre de séchage, où les produits sont placés. L'air entre dans le collecteur, où il est chauffé, puis monte par convection naturelle vers la chambre de séchage pour déshydrater les produits. Le temps de séchage varie considérablement en fonction des conditions climatiques et de la circulation de l'air dans le séchoir [15].

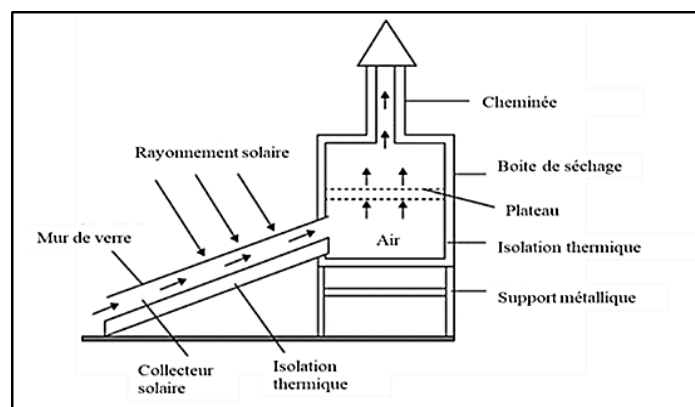


Figure I. 8. Schéma de principe d'un système de séchage solaire indirect

I.4.2.3. Séchoirs mixtes

Dans ces systèmes, la chaleur nécessaire au séchage est fournie à la fois par le rayonnement solaire direct sur les produits et par l'air préchauffé dans des capteurs solaires. Cette combinaison permet d'optimiser le processus de séchage en utilisant simultanément les deux sources d'énergie [17].

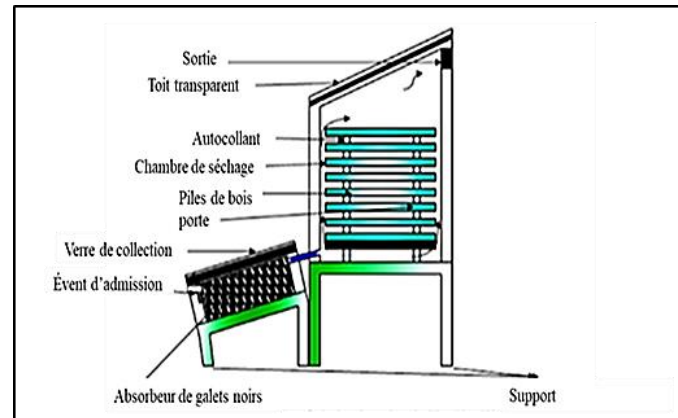


Figure I. 9. Séchoir solaire mode mixte

I.4.2.4. Séchoirs hybrides

Malgré les progrès accomplis, le séchage solaire présente encore des limites et des inconvénients. Le contrôle du processus de séchage reste difficile en raison de sa forte dépendance aux conditions météorologiques et climatiques. Par ailleurs, l'humidité nocturne prolonge la durée de séchage et expose les produits à des risques de contamination microbienne. Les séchoirs hybrides ont été développés pour répondre aux besoins de produits nécessitant des capacités de séchage importantes et pour surmonter ces contraintes en intégrant des sources d'énergie supplémentaires, telles que le gaz, le bois ou le fioul. Ces énergies permettent de maintenir une température stable à l'intérieur du séchoir, indépendamment des conditions extérieures, réduisant ainsi la dépendance à l'énergie solaire [18].

Ce type de séchoir, qui offre une productivité accrue, un meilleur contrôle et une continuité du séchage jour et nuit et en toutes saisons, présente cependant des inconvénients, notamment la nécessité d'un personnel qualifié pour son entretien, ainsi que des coûts de production et d'investissement élevés [10].

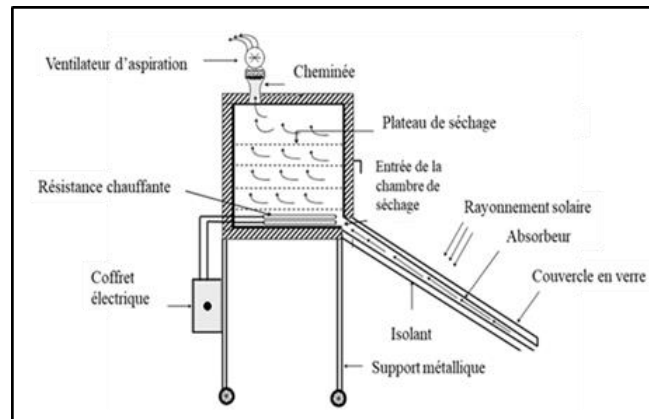


Figure I. 10. Schéma fonctionnel du séchoir solaire hybride

I.5. Variables d'état pertinents influant le séchage solaire

Le séchage solaire repose sur des transferts d'énergie et de chaleur entre le produit et son environnement extérieur. La prise en compte de ces facteurs permet de développer des modèles qui décrivent avec précision le fonctionnement des séchoirs solaires et le comportement de l'eau au sein du produit à sécher [19]. Ces variables comprennent :

I.5.1. Température

Cette variable est définie par trois paramètres : la température sèche, la température humide et la température de rosée. La température sèche correspond à la température de l'air ambiant. Lors du séchage de matériaux comme le bois, l'évaporation de l'eau absorbe de la chaleur, ce qui refroidit l'air. Cela introduit la notion de température humide, qui représente la température à laquelle l'eau s'évapore en surface pendant la phase initiale de séchage. Un autre paramètre essentiel dans l'analyse de l'air humide est la température du point de rosée, définie comme la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense sur des surfaces plus froides.

La température sèche, qui reflète la température de l'air de séchage, varie quotidiennement. Son amplitude dépend de la localisation géographique et de la saison : elle est plus marquée dans les zones continentales que côtières, diminue avec la latitude et augmente en présence d'un ciel très nuageux. La vitesse de séchage est fortement influencée par la température de l'air. Cet impact s'explique par l'élévation de la température du produit, qui augmente avec l'apport de chaleur. De plus, la température du produit joue un rôle significatif, surtout lorsque la température de l'air est élevée. Ainsi, la diffusion de l'eau dans le produit s'accélère avec la hausse de la température.

I.5.2. Humidité de l'air

Cette variable d'état représente le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau (P_v) et la pression de vapeur saturante (P_{v-sat}). Lorsque l'air est saturé, l'humidité relative atteint 100 %. Contrairement à l'humidité relative, exprimée en pourcentage, l'humidité absolue mesure la masse de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec, s'exprimant en kilogrammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec.

Il est crucial, lors du processus de séchage, de mesurer l'humidité de l'air à l'intérieur du séchoir solaire, de suivre son évolution et de réguler sa quantité. Le taux d'humidité de l'air influence significativement la cinétique de séchage des produits. Cet impact est plus prononcé en début de séchage et diminue avec l'augmentation de la température de l'air. En effet, des observations montrent que l'humidité migre des zones humides vers les zones sèches, perpendiculairement aux surfaces présentant un niveau d'humidité similaire.

Prenons l'exemple du bois humide en cours de séchage : le gradient de température s'oppose au gradient d'humidité. Au centre du bois, l'humidité est plus élevée qu'en surface, tandis que la température est plus basse au centre qu'en surface. Selon VILLIERE A. (1966), si le centre du bois est à la fois plus humide et plus chaud que sa périphérie, le processus de séchage est accéléré.

I.5.3. Pression

Comme évoqué précédemment, l'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. La pression totale de l'air humide correspond à la somme de la pression partielle de l'air sec (P_a) et de la pression partielle de la vapeur d'eau (P_v).

On parle de pression de vapeur saturante (P_{vsat}) lorsque l'air contient la quantité maximale de vapeur d'eau possible à une température donnée. Durant la phase initiale du séchage, la vapeur d'eau près de la surface du produit atteint une pression de vapeur saturée, qui dépend de la température de surface.

La différence entre ces deux pressions (P_{vsat} et P_v) est l'un des facteurs clés qui favorisent l'évaporation de l'eau du produit. Ce phénomène est appelé pouvoir évaporatoire.

I.5.4. Vitesse de l'air

La vitesse de l'air correspond au déplacement d'une masse d'air, provoqué par un gradient de pression (des zones de haute pression vers les zones de basse pression). Dans des conditions constantes de température et d'humidité, une augmentation de la vitesse de l'air à la surface du produit accélère le processus de séchage. Une vitesse d'air faible entraîne une évaporation

réduite, car en l'absence de mouvement autour du produit, une couche d'air saturé se forme, bloquant le transfert d'humidité du produit vers l'air.

En général, lors des premières phases du séchage, la vitesse de l'air joue un rôle crucial dans l'élimination de l'humidité libre. En revanche, son influence diminue considérablement dans les phases finales. C'est pourquoi, dans certains cas, l'utilisation de ventilateurs à vitesse variable est recommandée. Ces dispositifs permettent d'obtenir une vitesse élevée au début du processus, puis de la réduire progressivement vers la fin, optimisant ainsi l'efficacité du séchage tout en réalisant des économies d'énergie.

I.6. Composants des séchoirs solaires

I.6.1. Capteur solaire

Le rôle du capteur solaire est de recueillir l'énergie solaire et de la transformer en chaleur.

Il est constitué d'une surface sombre (absorbeur) qui capte le rayonnement solaire et d'un couvercle transparent (vitrage) qui retient la chaleur à l'intérieur. Le capteur solaire emmagasine l'énergie solaire qui réchauffe l'air ou un fluide caloporteur qui y circulent.



Figure I. 11. Capteur solaire

I.6.2. Armoire de séchage

L'armoire de séchage sert d'espace où les récoltes sont disposées pour leur processus de séchage.

Ils peuvent être construits avec divers matériaux tels que l'acier, le bois, le béton ou le contreplaqué, garantissant ainsi leur pérennité. Le couvercle de l'armoire de séchage est habituellement fabriqué à partir de matériaux transparents comme le polycarbonate ou le polyéthylène. Il est également possible de protéger cette couverture avec des couches de verre ou de plastique. L'isolation des armoires de séchage, généralement en polystyrène, diminue les déperditions thermiques et assure une température interne stable afin de simplifier la procédure de séchage.

Il est possible d'équiper l'armoire de séchage d'un détecteur solaire, connu sous le nom de séchoir solaire direct (DSD).

En option, le capteur solaire peut être dissocié de l'armoire de séchage, créant ainsi un système de séchage solaire indirect (ITSD). L'entrée d'air chaud et sec dans la pièce est facilitée soit par le chauffage solaire, soit par d'autres systèmes de chauffage. Cet air chaud se déplace autour des plantes, capturant l'humidité, puis devient plus frais et humide. L'air frais et humide s'échappe de la salle de séchage à travers les orifices de ventilation.

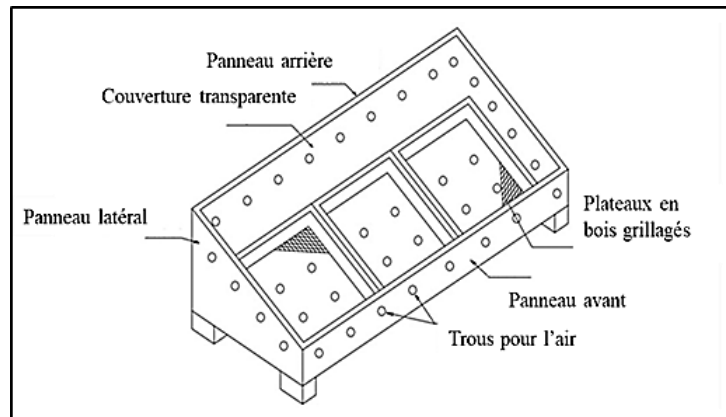


Figure I. 12. Armoire de séchage

I.6.3. Système auxiliaire

On entend par un système secondaire dans les séchoirs solaires, un dispositif qui appuie ou enrichit le système de séchage solaire principal. L'objectif est d'améliorer les performances globales du séchoir solaire, particulièrement dans les situations où l'énergie solaire primaire est insuffisante ou absente en raison de conditions météorologiques défavorables. On peut intégrer à des séchoirs solaires divers systèmes auxiliaires tels que des chauffages électriques, des panneaux photovoltaïques (PV), et différentes sources de chaleur alternatives comme les poêles à gaz, les systèmes de chauffage utilisant des combustibles fossiles ou les poêles à biomasse. Ces systèmes constituent une option de chauffage alternative pour assurer les conditions de séchage nécessaires. Ils sont des dispositifs de stockage d'énergie thermique (TES) destinés à emmagasiner l'excès de chaleur produit par le système de séchage solaire lors des moments où le rayonnement solaire est intense. Cette chaleur accumulée peut par la suite être exploitée durant la nuit ou dans les moments où l'ensoleillement baisse, assurant ainsi une procédure de séchage ininterrompue.

I.7. Systèmes de stockage d'énergie dans les séchoirs solaires

L'utilisation d'un procédé de dessiccation est nécessaire pour la conservation des produits agricoles. Pour assurer un séchage sécurisé, notamment pour les fruits et légumes, une

fourchette de températures entre 45 °C et 60 °C est requise. Le processus de déshydratation des produits agricoles dans un environnement où l'humidité et la température sont régulées assure une élimination rapide de l'eau tout en maintenant une qualité supérieure.

Les systèmes de séchage solaire thermique hybride combinent un procédé de séchage solaire avec une source de chaleur de secours. Le stockage de l'énergie thermique peut se faire sous plusieurs modalités, comme l'énergie interne, les matériaux à changement de phase (MCP), la chaleur thermochimique ou un mélange de tout cela dans des matériaux soigneusement isolés. En l'absence de lumière solaire, des déshydrateurs à énergie thermique préservent le processus de déshydratation en maintenant une température stable de l'air. Le stockage de l'énergie thermique est essentiel pour équilibrer la production et la consommation d'énergie solaire, ainsi que d'autres sources d'énergie renouvelables. Il existe diverses techniques de conservation de l'énergie thermique, comprenant le stockage thermochimique, latent et sensible, selon les exigences et les potentialités du dispositif. La sélection du matériau pour le stockage thermique est déterminée par la température de l'air prévue par le capteur solaire, ainsi que par les caractéristiques thermo-physiques nécessaires au processus de stockage.

I.8. Périodes de séchage

Le processus de séchage peut se subdiviser en différentes étapes précises, chaque étape étant identifiée par des comportements particuliers de la teneur en humidité du produit selon le temps. Ces étapes sont habituellement illustrées par une courbe qui représente la variation du contenu en humidité (X) selon le temps (s). Voici les principales périodes identifiées :

- Phase préliminaire de séchage (chauffage du solide)

Cette étape marque le commencement du processus de séchage, durant lequel le produit commence à se réchauffer. La réduction de la teneur en humidité se fait progressivement, car l'énergie est majoritairement dédiée à l'élévation de la température du solide.

- Séchage à taux constant (représenté par une ligne droite)

Au cours de cette étape, le taux d'humidité se réduit progressivement et de façon linéaire avec le passage du temps. Le taux de séchage demeure stable, parce que l'évaporation de l'humidité en surface est maintenue par une fourniture constante d'énergie. Cette phase est généralement illustrée par une ligne droite sur le graphique de séchage.

- Phase de séchage en déclin

Quand le niveau d'humidité atteint un certain point (XCR), la vitesse de séchage commence à baisser. Cette étape se distingue par une courbe non linéaire, où l'évaporation de

l'humidité s'avère plus complexe en raison de la diminution de l'humidité superficielle et du déplacement de l'humidité interne vers la surface.

➤ Équilibre (XEQ)

Au terme de la procédure de séchage, le niveau d'humidité arrive à un moment d'équilibre (XEQ), à ce stade, le produit ne libère plus d'humidité. Cela est conditionné par les facteurs environnementaux, comme la température et l'humidité de l'air.

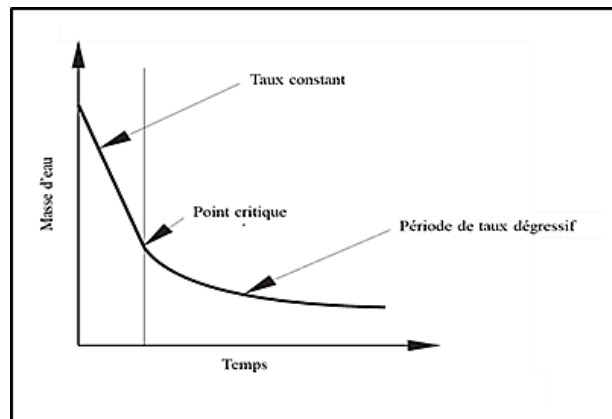


Figure I. 13. Périodes de taux de séchage

I.9. Transfert de chaleur

On distingue trois formes majeures de transfert thermique : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction nécessite un contact direct entre des solides pour transférer de la chaleur, tandis que la convection se manifeste lorsqu'un liquide ou un gaz est exposé à une source plus chaude et à une autre plus froide. Ce phénomène entraîne un déplacement global des molécules du fluide, diffusant ainsi la chaleur vers les zones les plus froides. Le troisième mode, qui est le rayonnement, n'exige aucun contact ni présence de matière entre les deux objets [20].

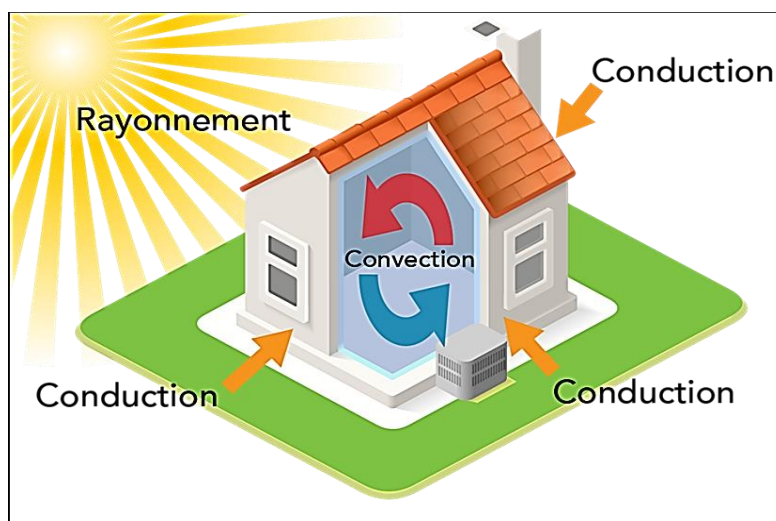


Figure I.14. Illustration des trois modes de transfert de chaleur dans une habitation

I.10. Matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés pour le stockage de la chaleur dite « latente ». Le transfert d'énergie thermique s'effectue lors de la transition d'un état physique à un autre, généralement du solide au liquide, ou inversement. Ce phénomène est appelé changement d'état ou de phase. Dans un premier temps, ces MCP solide-liquide se comportent comme des matériaux de stockage classiques, en augmentant de température lorsqu'ils absorbent de la chaleur. Toutefois, à la différence des matériaux à stockage sensible, les MCP emmagasinent et restituent l'énergie thermique à une température presque constante. Ils sont capables de stocker entre 5 et 14 fois plus de chaleur par unité de volume.

I.10.1. Fonctionnement d'un PCM

I.10.1.1. Absorption de chaleur (fusion) :

Lorsqu'un PCM est exposé à une source de chaleur (comme le soleil dans un séchoir solaire), il absorbe cette chaleur. Une fois sa température de fusion atteinte, il commence à fondre. Pendant la fusion, il stocke une grande quantité d'énergie thermique sous forme de chaleur latente, sans augmenter de température.

I.10.1.3. Stockage thermique :

Tant qu'il est en phase liquide, le PCM peut conserver cette chaleur pendant plusieurs heures. Cela permet de maintenir une température plus stable dans le système (comme un séchoir) même lorsque l'ensoleillement diminue.

I.10.1.3. Restitution de chaleur (solidification) :

Quand la température ambiante baisse (par exemple en fin de journée), le PCM commence à se solidifier. Pendant cette phase, il relâche la chaleur stockée, ce qui prolonge le chauffage du système même en absence de soleil.

I.10.2. Type de MCP

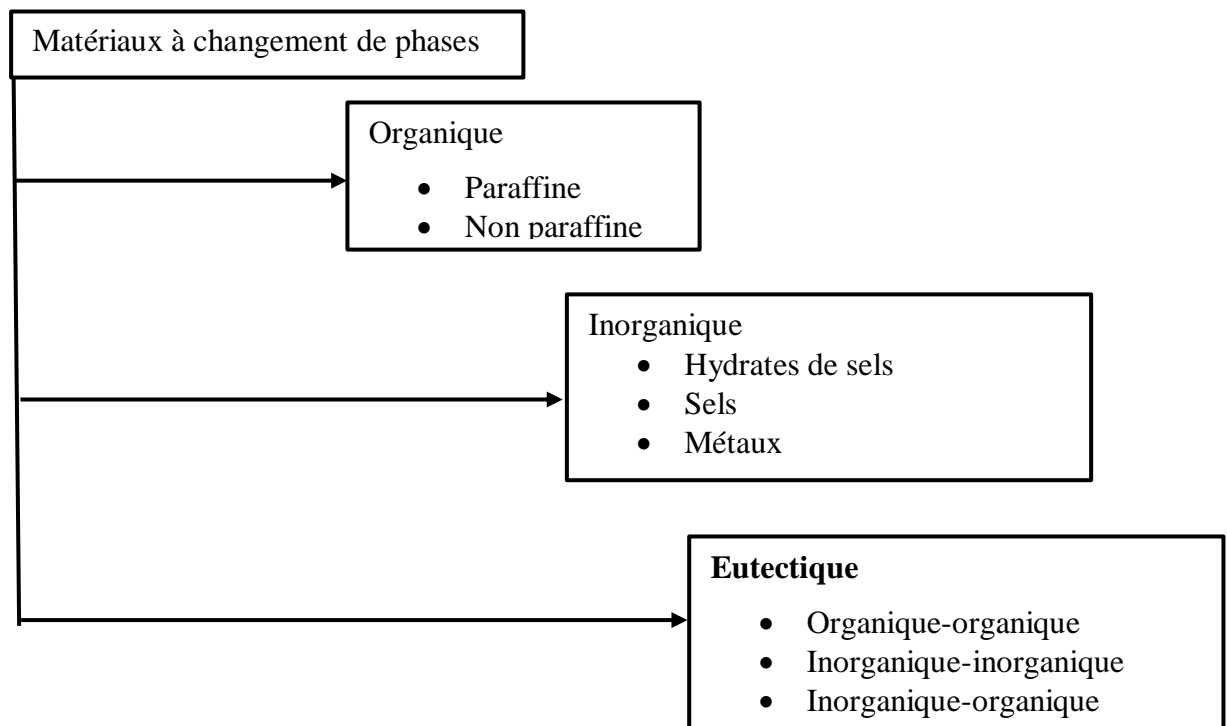


Figure I.15. Diagramme des types de PCM

I.10.3. Critère de choix

Les principaux critères de choix d'un matériau à changement de phase pour une application comme un séchoir solaire :

Critères thermiques

Température de transition de phase appropriée : Le MCP doit fondre dans une plage de température compatible avec l'application.

Haute enthalpie de fusion : Plus elle est élevée, plus le matériau stocke d'énergie thermique (souvent > 100 kJ/kg).

Bonne conductivité thermique : Pour un transfert de chaleur rapide. Les PCM sont souvent améliorés avec des additifs (comme du sable, graphite, ou aluminium). Stabilité thermique : Il doit résister à de nombreux cycles sans dégradation thermique.

Critères physiques et chimiques

Stabilité chimique : Pas de réactions chimiques indésirables pendant les cycles.

Compatibilité avec les matériaux de l'enveloppe : Le MCP ne doit pas corroder ou réagir avec le contenant (comme le PVC ou le métal).

Faible variation de volume : Minimiser les risques de fuite ou de casse du conteneur.

Non-toxicité et sécurité : Important pour les séchoirs alimentaires.

Critères économiques et pratiques

Faible coût : Critique pour les applications rurales ou artisanales.

Facilité de disponibilité locale : Ex. : sable, cire, paraffine, huile végétale, etc.

Facilité d'intégration : Il doit être facile à manipuler et à insérer dans la conception (ex : dans un tube ou un lit de sable).

I. Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions fondamentales liées au séchage, en mettant l'accent sur les différentes techniques existantes et les critères ayant guidé le choix du séchage solaire. Les principaux procédés de séchage, ainsi que leurs avantages et limites, ont été abordés pour situer l'intérêt croissant porté aux alternatives durables. Une classification des séchoirs solaires a été proposée, en distinguant les systèmes directs, indirects, mixtes et hybrides. Les variables influençant l'efficacité du séchage, telles que la température, l'humidité, la pression et la vitesse de l'air, ont été analysées, de même que les composants essentiels du séchoir et les systèmes de stockage d'énergie, notamment les matériaux à changement de phase (MCP). Enfin, les principes de transfert de chaleur et les différentes étapes du séchage ont été brièvement exposés, constituant une base théorique pour le développement expérimental qui suivra.

Chapitre II

Recherche bibliographique

II. Introduction

Dans ce chapitre nous citerons les travaux antérieurs effectués dans ce cadre pour connaître les améliorations apportées dans ce domaine. Il y'a lieu de noter que lesdits travaux ont été effectués par de grands chercheurs à travers le monde.

Etant donné l'ampleur et le nombre de ces travaux, nous n'avons retenu pour notre étude que les plus récents.

II. Travaux antérieurs

Ben Akachukwu et al. [21] a développé trois séchoirs solaires à convection naturelle et à mode direct à partir de matériaux locaux abordables afin de résoudre les problèmes rencontrés par les agriculteurs dans la conservation des légumes tels que la tomate, le gombo et la carotte. Les légumes ont été découpés en tranches de 15 mm, disposés en une seule couche dans chaque séchoir et séchés simultanément. Un séchage en plein soleil a été utilisé comme référence. Les facteurs météorologiques influençant le séchage, l'énergie thermique produite par les séchoirs et la vitesse de séchage ont été surveillés toutes les deux heures.

Il a été constaté que le séchage solaire a permis une réduction du temps de séchage de 54,55 % pour la tomate, 52,88 % pour la carotte et 50,98 % pour le gombo, en comparaison avec le séchage en plein air. Des températures moyennes journalières de 49,9 °C, 51,17 °C et 52,29 °C ont été enregistrées respectivement pour la tomate, la carotte et le gombo dans les séchoirs solaires. L'efficacité du séchage a été évaluée à 21,80 % pour la tomate, 21,18 % pour la carotte et 24,95 % pour le gombo, contre 10,59 %, 12,71 % et 15,19 % respectivement pour le séchage en plein air.

Ces résultats ont démontré que le séchage des légumes est mieux réalisé avec les séchoirs solaires qu'avec le séchage en plein air. Il a également été observé que l'oignon ne peut pas être séché en plein air, car son arôme piquant se dissipe dans un espace non confiné.



Figure II.1. Trois séchoirs solaires à légumes en mode direct (a, b et c sont respectivement des séchoirs solaires pour carottes, tomates et gombos. Tandis que d, e, et f sont respectivement des carottes, des tomates et des gombos) [21]

Sandali et al. [22] ont employé une méthode de simulation numérique afin d'améliorer les performances thermiques d'un séchoir solaire direct à armoire. L'étude a été axée sur la simulation numérique d'un séchoir solaire direct intégrant une couche plane de milieu poreux fracturé au-dessus de la plaque absorbante, dans le but de stocker l'énergie thermique par chaleur sensible. La méthode des volumes finis a été utilisée avec un modèle instationnaire bidimensionnel implémenté dans le logiciel Fluent CFD. L'influence de l'épaisseur du milieu poreux sur la performance thermique du séchoir solaire a été analysée en intégrant des couches de différentes épaisseurs. Divers matériaux ont été testés et l'effet de la porosité du milieu poreux a été étudié. Les résultats obtenus ont montré qu'une augmentation de 4 °C de la température de l'air de séchage a été constatée avec l'intégration du milieu poreux. Une élévation de l'épaisseur du milieu poreux de 1 cm a entraîné une hausse de 2 °C de la température de l'air de séchage, tandis qu'une augmentation de la porosité du milieu de 10 % a provoqué une diminution de 1 °C. Il a été déterminé que le matériau le plus efficace est celui possédant la plus grande capacité thermique spécifique et conductivité thermique.

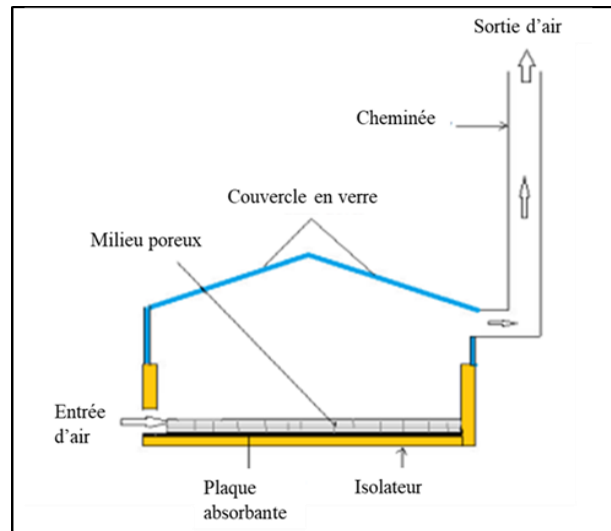


Figure II.2. Schéma d'un séchoir solaire direct [22]

La conservation du poisson est considérée comme une étape essentielle après la pêche commerciale. Les méthodes traditionnelles sont jugées inefficaces et sujettes à la contamination. Les séchoirs solaires existants ne sont pas conçus pour assurer un séchage optimal. Dans cette étude, un séchoir solaire direct a été modélisé, fabriqué et évalué afin d'améliorer ses performances par Alonge et al. [23], la modélisation a été réalisée à l'aide de la dynamique des fluides numériques pour tester différentes dimensions et vitesses de ventilation. Une chambre de séchage de $70 \times 60 \times 40$ cm³, avec un plateau placé à 25 cm de la base, a été identifiée comme offrant une température optimale et une bonne répartition de l'air. Une efficacité maximale du capteur de 77,2 % et une élévation de température de 26,7 °C ont été observées en convection naturelle. Les prévisions numériques ont été jugées précises (erreur ≤ 10 %), sans différence significative avec les valeurs expérimentales.

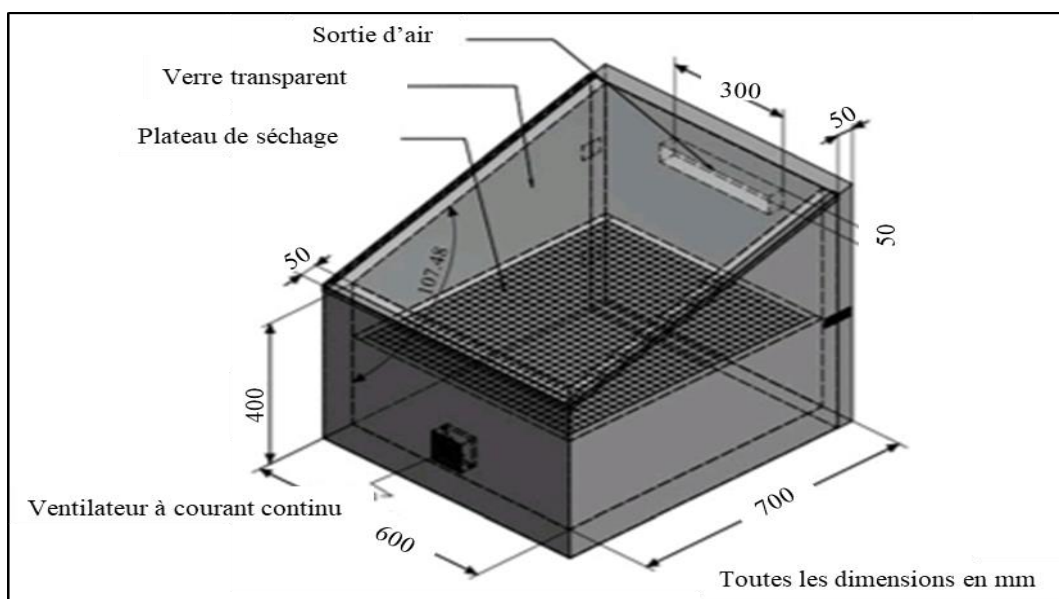


Figure II.3. Séchoir expérimentale

Le séchage solaire des aliments est reconnu comme un procédé bien établi en Inde. Plusieurs modèles de séchoirs solaires ont été développés et généralement validés à l'aide d'observations expérimentales et de simulations numériques, qui sont coûteuses en temps et en argent. L'utilisation de logiciels de simulation en dynamique des fluides (CFD) a permis d'obtenir les mêmes résultats en un temps plus court.

Dans cette étude, Jain et al. [24] ont réalisés la simulation CFD, la validation du design, l'analyse énergétique et les calculs numériques d'un séchoir solaire domestique de type direct, avec des tests effectués à Ludhiana en novembre 2006. La conception et la simulation d'un séchoir multi-étagères sans charge ont été effectuées à l'aide du logiciel ANSYS Fluent 14.0, et une température interne de 326 K a été enregistrée, validant ainsi son efficacité. L'énergie incorporée dans les matériaux de construction du séchoir a été estimée à 339,015 kWh, avec un temps de retour énergétique de 7,57 ans et un crédit carbone de 2055 INR. Le coefficient de transfert de chaleur convectif a été évalué entre 2,4 et 2,8 W/m²°C, et un coefficient de détermination de 0,98 a été obtenu, confirmant une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et prédites.



Figure II.4.Séchoir domestique à étagères multiples de type direct

Sandali et al. [25] ont proposé Une nouvelle technique d'apport de chaleur et étudiée afin d'améliorer la performance thermique d'un séchoir solaire direct. Un échangeur de chaleur tubulaire à double niveau utilisant de l'eau géothermale a été conçu et installé dans le laboratoire LENREZA. Celui-ci a été placé intentionnellement au-dessus de la plaque absorbante, en face des orifices, afin de permettre la pénétration de l'air. La température de l'eau circulante a été réglée à 70°C, en référence à celle des eaux géothermales des régions du

sud de l'Algérie. L'expérimentation a été réalisée au laboratoire LENREZA de l'Université de Ouargla, et une simulation numérique a été effectuée pour comparer les résultats expérimentaux et théoriques.

Les résultats ont montré que l'intégration de l'échangeur de chaleur améliore significativement la performance du séchoir solaire. Grâce à son utilisation, la température minimale de l'air de séchage a été mesurée à 46°C, tandis que la maximale a atteint 58°C. Après le coucher du soleil et durant toute la nuit, la température de l'air de séchage est restée importante et quasi stable, avec une valeur moyenne de 46°C. L'intégration de l'échangeur de chaleur permet ainsi d'assurer la continuité du processus de séchage la nuit et même pendant les journées nuageuses.

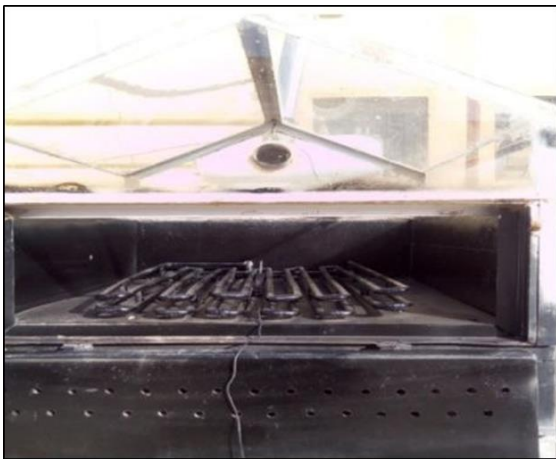


Figure II.5. Photo de l'appareil de source d'eau chaud et échangeur de chaleur à l'intérieur de la chambre de séchage

Dans cette étude, Nabnean et Nimnuan [26] ont évalués les performances d'un séchoir solaire domestique à convection forcée pour le séchage des bananes. Ce séchoir, conçu en forme parabolique et équipé d'un capteur solaire plat recouvert de plaques en polycarbonate, a été construit. Le polycarbonate a été utilisé pour réduire les pertes de chaleur tout en permettant la transmission du rayonnement solaire. Cinq lots de 10 kg de bananes ont été séchés entre janvier et juillet 2019. La température de l'air à l'intérieur du séchoir a été enregistrée entre 35°C et 60°C de 8h00 à 18h00. L'humidité des bananes a été réduite de 72 % à 28 % en 4 jours, tandis que celles séchées naturellement ont atteint 40 % sur la même période. Une réduction du temps de séchage de 48 % a été observée par rapport au séchage naturel. Une meilleure qualité du produit séché, en termes de saveur, couleur et texture, a été obtenue. La période de retour sur investissement du séchoir a été estimée à 1,1 an.

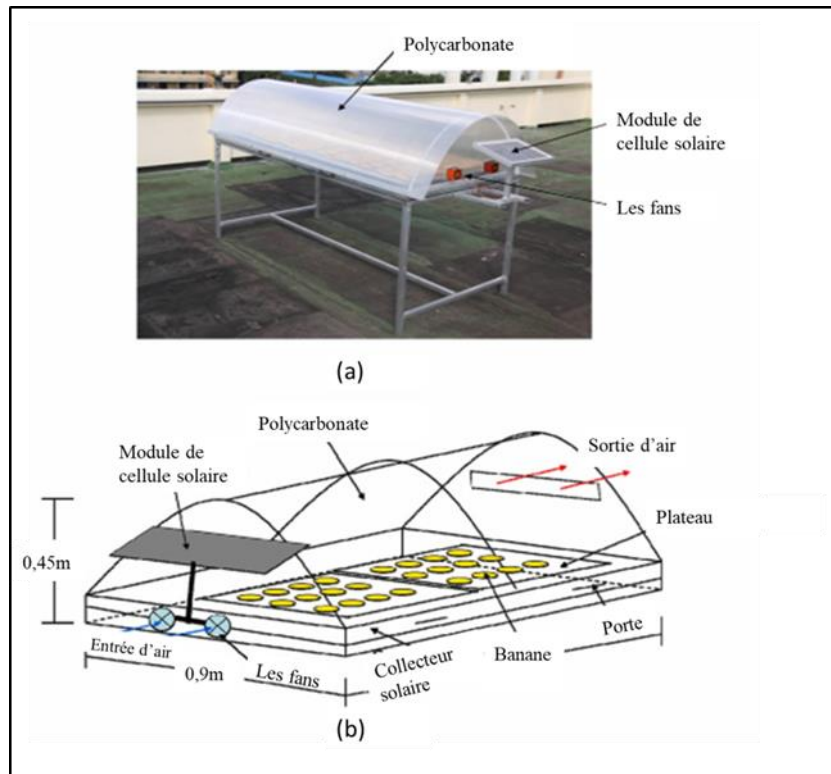


Figure II.6. Vue picturale du séchoir solaire (a) et schéma du système de séchoir solaire (b) [26]

Jiskani et al. [27] ont présenté une méthode pratique de séchage passif solaire direct pour le séchage des piments et des raisins. L'élimination de l'humidité permet une conservation prolongée des fruits et légumes. Cette technique assure non seulement l'évaporation de l'eau, mais aussi un stockage contrôlé et sécurisé des produits. Une enceinte en bois fermée, associée à une vitre et une plaque métallique noire, a été utilisée pour atteindre une température maximale. Une température interne moyenne de 60 à 70 °C a été obtenue, tandis que la température externe moyenne variait entre 33 et 44 °C en octobre et novembre. L'éclairement solaire a été mesuré à l'aide d'un luxmètre, avec des valeurs maximales comprises entre 8000 et 12000 lux de 10h30 à 4h30. Une perte d'humidité de 20 à 40 % par jour a été observée durant trois jours de séchage. Pour les piments, 85 % de l'humidité a été éliminée en 15 heures avec une température maximale interne de 70 °C. Pour les raisins, 75 % de l'humidité a été évaporée en 15 heures, avec une température interne maximale de 68 °C.



Figure II.7. Piment avant et après séchage [27]

Hidalgo et al. [28] ont développé un séchoir solaire direct assisté par un module photovoltaïque et ses performances ont été évaluées sous convection naturelle et forcée. L'énergie nécessaire aux ventilateurs assurant le renouvellement de l'air a été fournie par le module, permettant un fonctionnement autonome. Le séchage de l'oignon vert a été étudié, révélant une période à taux constant suivie d'une période à taux décroissant. Une accélération du processus a été observée avec la convection forcée, avec une efficacité moyenne de 38,3 % contre 34,2 % pour la convection naturelle. Une consommation d'énergie spécifique de 16,4 kWh/kg pour la convection forcée et de 18,3 kWh/kg pour la naturelle a été mesurée. Enfin, peu de variations de couleur ont été constatées entre les oignons frais et séchés.

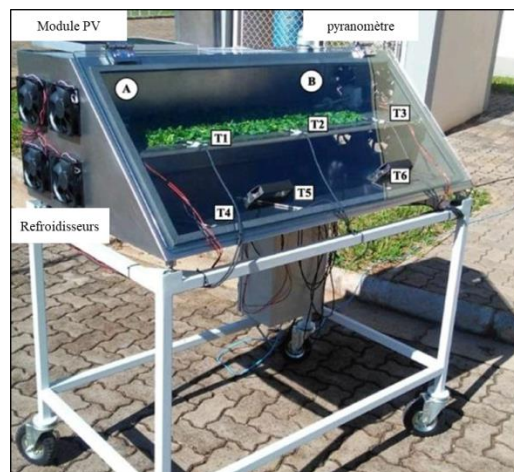


Figure II.8. Séchoir solaire direct avec feuilles d'oignon [28]

Sharma et al [29], ont évalués Les effets du séchage à l'air chaud (HAD) et du séchage solaire direct (DSD) sur la cinétique de séchage et les propriétés du curcuma. Une diffusivité plus élevée et un temps de séchage plus court ont été observés en DSD par rapport au HAD. Les

modèles de Page et de diffusion ont été identifiés comme les plus adaptés pour le séchage du curcuma. Une réduction de l'index de brunissement a été enregistrée, assurant une meilleure rétention de la couleur en DSD. Une couleur jaune plus intense a été mesurée en DSD. Des particules plus lisses et sphériques ont été mises en évidence par microscopie, améliorant la fluidité. Une teneur plus élevée en potassium a été détectée dans le DSD. Une porosité plus importante et une surface plus lisse ont été révélées par microscopie à force atomique. Une teneur plus élevée en curcumine a été relevée en DSD, corrélée à une faible intensité des vibrations de liaison. Enfin, une perte de poids moindre des curcuminoïdes a été confirmée en DSD par rapport au HAD.

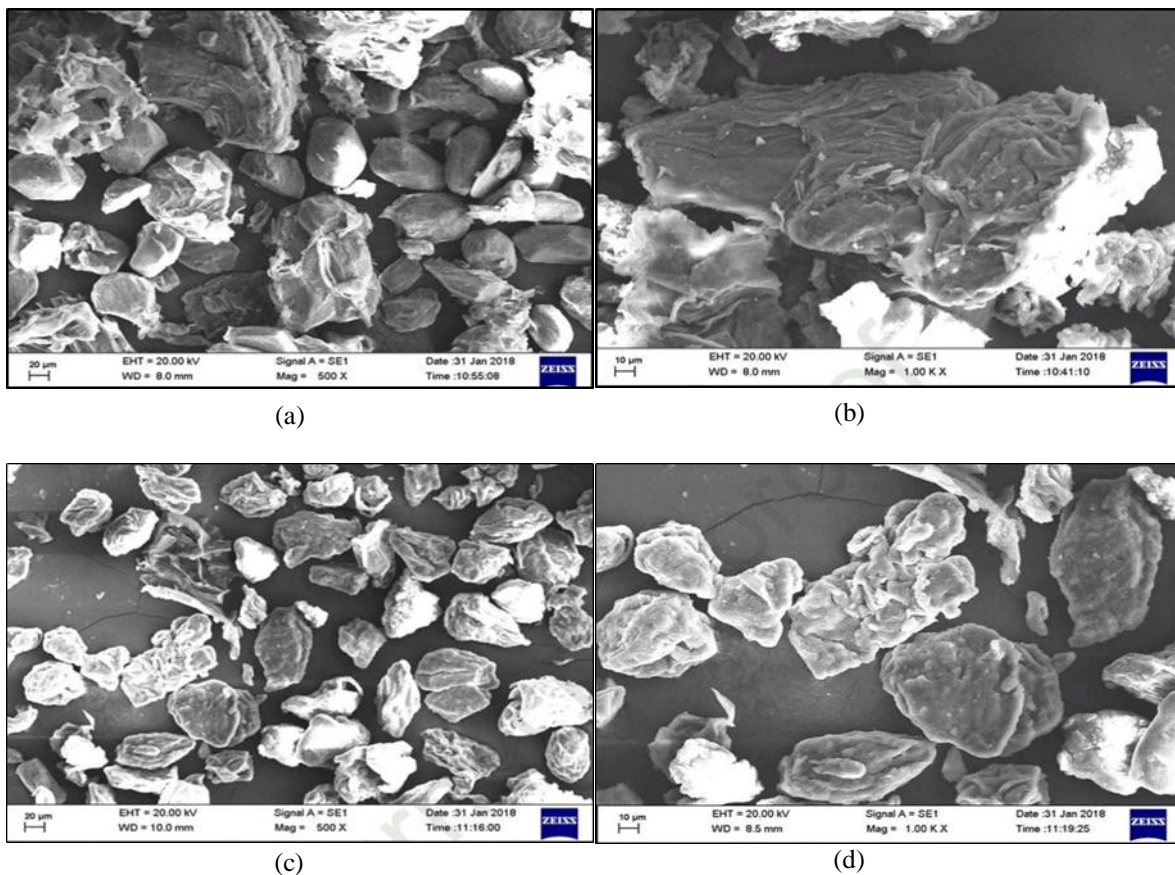


Figure II.9. Photomicrographies de poudre de curcuma provenant (a, b) d'un échantillon de curcuma séché directement au soleil et (c, d) d'un échantillon de curcuma séché à l'air chaud [29]

Kingtong et al. [30] ont réalisé une expérience pour le séchage de bananes cultivées, afin de comparer l'efficacité du séchoir avec le séchage au soleil ouvert. L'énergie solaire est convertie en énergie thermique par un collecteur solaire, puis un ventilateur de ventilation installé dans la chambre de séchage permet le transfert thermique convectif dans cette chambre, d'une taille de 1,20 m de largeur, 0,80 m de longueur et 1,00 m de hauteur. Un grillage en acier inoxydable sur mesure de 55x75 cm est utilisé dans la chambre de séchage,

avec 2 panneaux et des portes à charnières. Les murs environnants, y compris le sol, sont isolés avec une épaisseur de 2,5 cm, et la structure de l'incubateur est fabriquée en aluminium de 1,5 mm d'épaisseur, peint en noir pour une meilleure absorption thermique. Une étude sur la dissipation de chaleur des deux armoires a montré que les armoires de séchage solaire avaient une dissipation de chaleur inférieure à celle d'un séchoir à vent. La plage de température élevée était entre 31 et 78 degrés Celsius pendant l'expérience, de 9 h à 16 h, avec une température moyenne de 62,68 degrés Celsius. L'avantage de ce séchoir est qu'il n'y a pas de contamination pendant le séchage des bananes, et que l'énergie renouvelable provenant de l'énergie solaire est utilisée.



Figure II.10. Séchoir solaire à air chaud forcé [30]

Le séchoir solaire de type direct est reconnu pour sa construction simple, son faible coût, son entretien réduit et sa facilité d'utilisation. Dans cette étude, Kabeel et al. [31] ont recherché une amélioration des performances de séchoir solaire type direct en intégrant des panneaux photovoltaïques (PV) avec récupération d'énergie thermique et un collecteur solaire d'air. Ces éléments ont été utilisés comme unités de préchauffage afin d'augmenter la température de l'air avant son entrée dans le séchoir, et pour alimenter un ventilateur. Trois modèles intégrés ont été proposés et validés à l'aide de données empiriques enregistrées précédemment. Il a été constaté que l'air entrant dans le séchoir était chauffé de 29°C à 42°C entre 9h00 et 16h00. L'humidité des bananes a été réduite de 72 % à 33,4 % en 7 heures, avec un taux d'élimination de l'humidité variant entre 110 et 400 g/h.

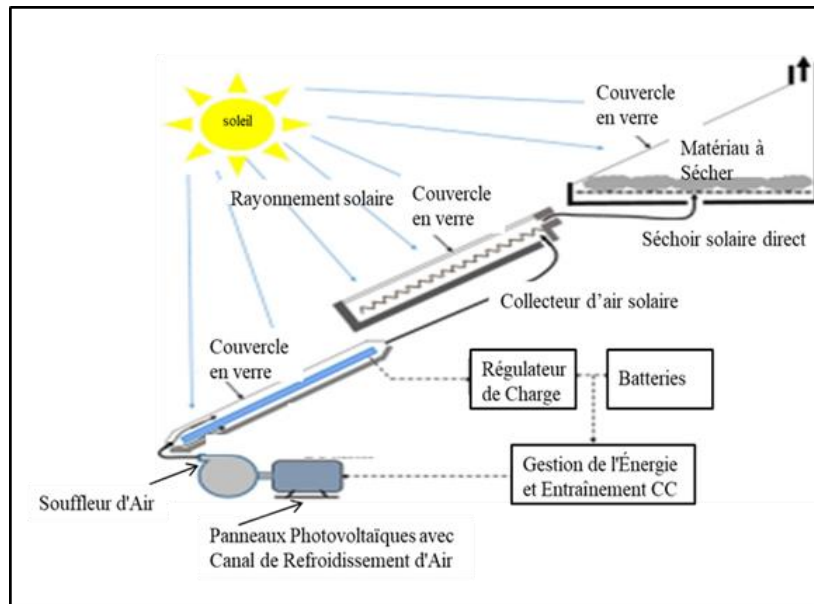


Figure II.11. Schéma d'un séchoir solaire direct amélioré par l'intégration de panneaux photovoltaïques et d'un collecteur solaire d'air

Dans cette étude, Yao et al. [32] ont proposé un système de séchage combinant un collecteur solaire à tube sous vide et une pompe à chaleur (HPD) pour résoudre les problèmes intermittents des systèmes de séchage solaire. Trois modes de fonctionnement adaptés aux conditions climatiques ont été adoptés : le séchage solaire (SD), la pompe à chaleur seule (HPD) et le séchage assisté par pompe à chaleur (SAHPD). Les performances du système ont été analysées, révélant que la température de la chambre de séchage peut dépasser 50 °C en mode SD. En mode HPD, une puissance moyenne de chauffage de 11,88 kW a été mesurée, avec une efficacité thermique de 39,3 %. En mode SAHPD, un coefficient de performance de 3,26 a été obtenu, représentant une amélioration de 44,2 % par rapport au mode HPD. Le modèle de cinétique de séchage à deux termes a été identifié comme le plus précis pour le séchage du raisin. Des recommandations ont été fournies pour l'application des systèmes SAHPD dans le séchage des produits agricoles.

Ndukwu et al. [33] ont examiné l'impact des variations de couleur du couvercle du collecteur sur la qualité et la perte de chlorophylle des feuilles de Neem et de feuilles amères séchées à l'énergie solaire. Pour modifier le spectre de couleur, trois matériaux en polyéthylène de couleurs distinctes ont été utilisés comme couverture supérieure de la chambre de séchage et du collecteur, formant ainsi une unité de séchage solaire en armoire. Les résultats ont montré qu'une efficacité thermique de 38,8 % a été atteinte par l'unité de séchage couverte de jaune, avec une diminution de 1,43 % et 10,41 % respectivement pour les unités couvertes de bleu et de blanc. Une température interne plus élevée et un taux de séchage plus rapide ont été

générés par le séchoir à couverture jaune, ce qui a permis un séchage plus rapide des feuilles. Le taux de séchage moyen des feuilles de Neem et des feuilles amères a été estimé entre 0,003762 et 0,003849 kg/h, et entre 0,004348 et 0,004689 kg/h respectivement. La consommation d'énergie spécifique pour le séchage des feuilles a été comprise entre 10,52 et 13,89 MJ/kg pour tous les séchoirs. L'analyse des couleurs a révélé qu'un séchage des feuilles amères proche de leur couleur naturelle a été obtenu avec le séchoir couvert de jaune, tandis qu'un séchage des feuilles de Neem proche de leur couleur naturelle a été obtenu avec le séchoir couvert de bleu. Enfin, le modèle logarithmique a mieux prédit leur ratio d'humidité pendant le séchage.

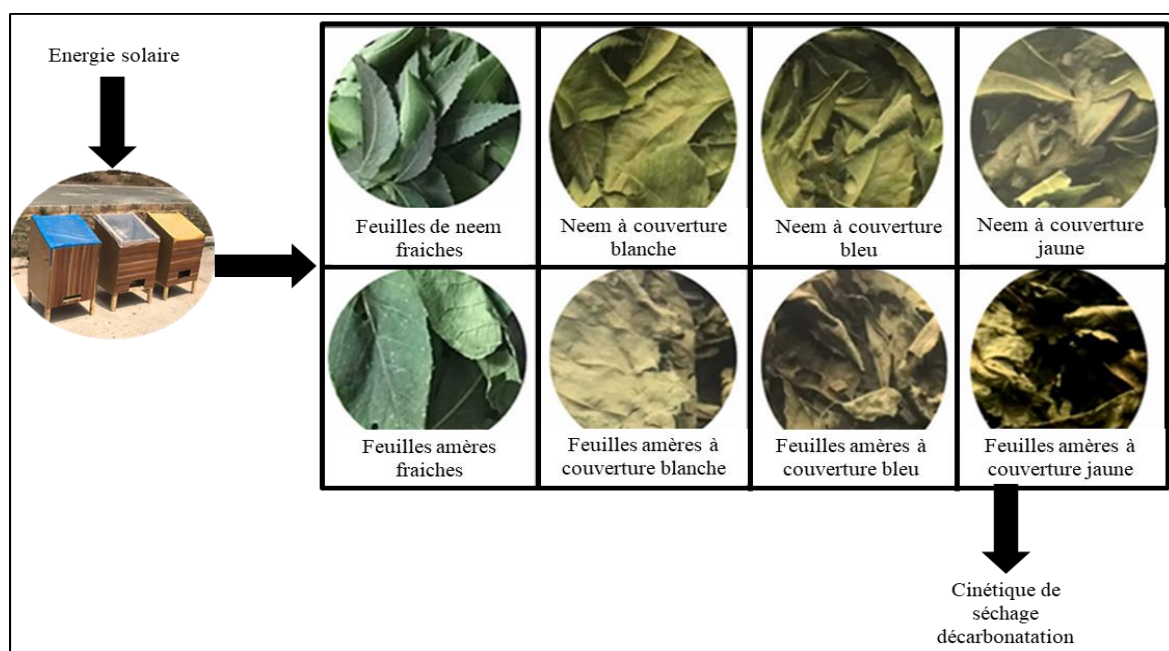


Figure II.12. Effet de la couleur de la couverture du séchoir solaire sur la qualité du séchage des feuilles de Neem et de feuilles amères

Miano et al. [34] ont optimisé Le système de séchage solaire direct basé sur l'Internet des objets (IoT) pour l'efficacité du séchage en combinant un enregistreur de données Web et un système de notification par SMS utilisant Arduino Uno et ESP-32, afin de résoudre les problèmes de fiabilité et de rentabilité. L'étude s'est concentrée sur le potentiel et l'efficacité du système pour le séchage du poisson *Sardinella* (Tamban) à Brgy, Calibunan, Agusan Del Norte, aux Philippines, ainsi que sur l'évaluation des conditions d'alerte de la température, de l'indice de chaleur, de l'humidité et de la plage de température à l'aide d'un portail d'application Web servant de plateforme de surveillance à distance pour des visualisations de données fiables. Les résultats attendus ont été obtenus car le séchoir solaire direct a été capable d'augmenter et de maintenir la température requise pour accélérer le séchage tout en

maintenant l'humidité relative acceptable. De plus, les capacités de surveillance et de notification du système, ainsi que la collecte et l'affichage efficaces des données via la surveillance physique et à distance, ont été soutenues par des notifications par SMS. En conséquence, l'efficacité de la mise à niveau du séchage traditionnel au soleil avec la technologie IoT pourrait aider à réduire les défis et les inconvénients auxquels les agriculteurs de poissons font face. L'étude, avec des critères de surveillance de séchage appropriés, pourrait servir de modèle pour d'autres produits alimentaires pouvant être séchés.

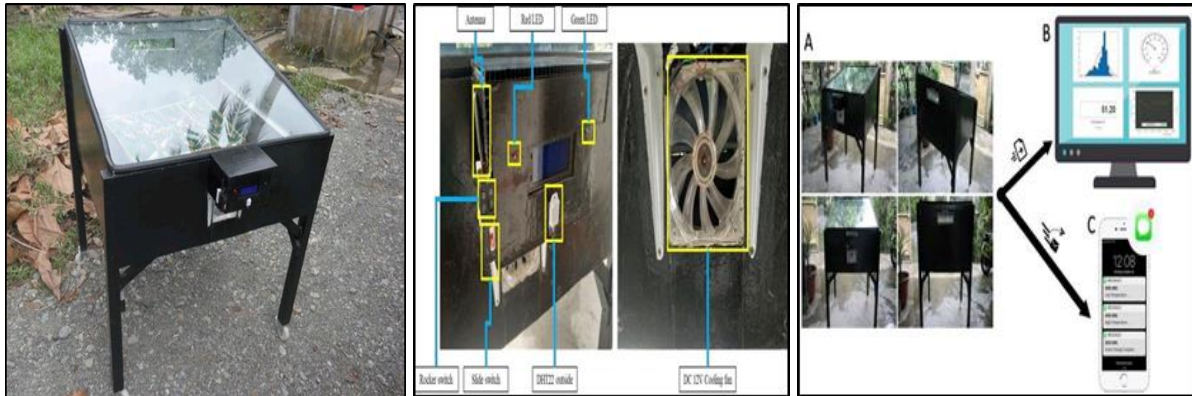


Figure II.13. Image réelle du sécheur pendant le test [34]

Shimpy et al. [35] ont examiné l'effet d'une modification de conception très simple sur les performances à vide d'un séchoir solaire domestique à convection naturelle (NCDS). Un séchoir solaire domestique de type direct a été développé avec une cavité d'air entourant la chambre de séchage. Pour comparer l'effet de cette cavité d'air, un séchoir solaire domestique sans cavité a également été développé et les deux séchoirs ont été testés simultanément sous le climat de Hisar, en Inde. Les valeurs d'efficacité thermique ont été calculées, ainsi que le coefficient de transfert thermique convectif de la plaque d'absorbeur à l'air de séchage. Les deux séchoirs ont également été analysés par le développement de modèles par éléments finis dans le logiciel COMSOL multiphysics. L'efficacité thermique à vide pour le séchoir solaire domestique sans cavité d'air et avec cavité d'air a été respectivement de 22,68 % et 34,08 %. Les valeurs du coefficient de corrélation pour les températures modélisées et réelles des plateaux de séchage pour les séchoirs sans et avec cavité d'air étaient respectivement de 0,980466 et 0,9833917. Le modèle par éléments finis proposé serait utile pour la conception et le développement des NCDS.

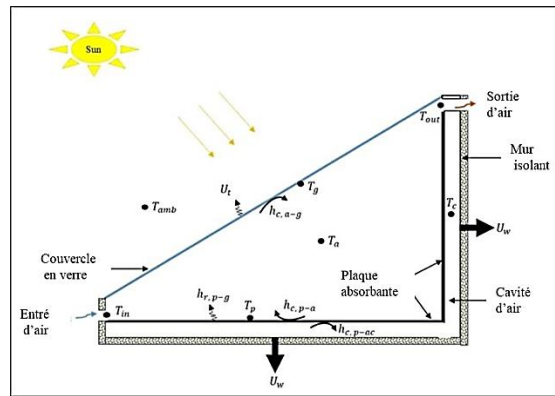


Figure II. 14. Coefficients de transfert de chaleur et différentes positions de température pour un séchoir solaire domestique à convection naturelle avec cavité d'air

La technologie de séchage solaire est reconnue comme une méthode écologique et économique pour la conservation des aliments. Grâce aux avancées dans ce domaine, plusieurs cultures saisonnières, comme la mangue, peuvent être utilisées toute l'année. Dans cette étude, Kannapiran et al. [36] ont analysé les différentes techniques de séchage des tranches de mangue : le séchage à l'air libre, le séchage en séchoir solaire direct avec matériau à changement de phase (PCM) et le séchage en séchoir solaire direct sans PCM. Pour chaque méthode, 100 g de mangues ont été séchés, avec de la cire de paraffine utilisée comme PCM. Il a été constaté que l'humidité des mangues a été réduite de 84 % à 25 % en 10 heures grâce au séchoir solaire avec PCM, qui a offert de meilleures performances que les autres méthodes. L'utilisation du PCM a également permis de stocker la chaleur, ce qui a entraîné un séchage plus efficace et rapide.

Le manioc est reconnu comme l'une des cultures racines les plus importantes au monde en raison de sa richesse en glucides. Cependant, des pertes post-récolte sont fréquemment observées. Pour les éviter, des méthodes traditionnelles comme l'épluchage et le séchage sont utilisées afin de produire de la farine et d'autres produits. Le séchage au soleil sur une plateforme surélevée et le séchage solaire passif sont les méthodes les plus courantes, mais des problèmes liés à la qualité du manioc séché ont été constatés, notamment en raison de la taille inappropriée des morceaux, de la profondeur de la couche de séchage et de la durée prolongée du séchage. Cette étude a été menée par Menya et al. [37] pour optimiser ces méthodes et améliorer la qualité du produit final. Des expériences ont été réalisées pour mesurer le temps de séchage, l'humidité résiduelle et la contamination microbienne. Il a été constaté qu'aucune différence significative dans le temps de séchage n'existe entre les couches de 3 cm et 5,5 cm. Les tailles optimales des morceaux ont été déterminées à 5 cm pour la plateforme surélevée et 2 cm pour le séchoir solaire passif. Les échantillons avec une

couche de 3 cm ont été les moins contaminés et mieux conservés, bien qu'une contamination plus élevée en levures et moisissures ait été



Figure II.15. (a) Séchage dans le séchoir solaire (b) séchage sur une plate-forme surélevée [37]

Dans cette étude [38], la cinétique du séchage du sargassum a été analysée en utilisant un séchoir solaire direct ainsi que l'énergie solaire directe. Quatre modèles mathématiques ont été appliqués : Newton, Page, Henderson et Pabis, ainsi que Midilli et al. Les algues ont été collectées sur la côte de Cancun, au Mexique. Avec le séchoir solaire direct, un temps de séchage total de 6 heures a été requis pour atteindre un taux d'humidité final de 0,013. En revanche, pour le séchage en plein air sans séchoir, 12 heures réparties sur deux périodes non consécutives ont été nécessaires, aboutissant à un taux d'humidité final de 0,025. Les valeurs du rayonnement solaire, des températures et des variations de masse ont été enregistrées en fonction du temps. Après l'analyse statistique, il a été déterminé que le modèle cinétique de Henderson et Pabis simulait le mieux le processus de séchage. L'énergie d'activation du séchage a également été obtenue.

Nettari et al [39], ont conçu un séchoir solaire direct de 50 kg et fabriqué avec un système de récupération de chaleur (HRS) et un matériau à changement de phase (PCM), notamment la cire de paraffine, afin de stocker la chaleur latente. Des matériaux locaux ont été utilisés pour sa construction, et deux séries d'expériences ont été réalisées. Des séchoirs vides ont d'abord été testés, puis le séchage de tomates a été effectué. Il a été observé que le HRSPCM maintenait une température plus élevée de 5 °C en journée et de 1 à 8 °C pendant 5 heures la nuit. Une amélioration de l'efficacité thermique de 21 % a été constatée. Le temps de séchage des tomates a été réduit de 50 %, passant de 40 h à 20 h. Le transfert d'humidité a été modélisé en utilisant la seconde loi de Fick. Les modèles « Verma et al. » et « Two-terms » ont été jugés les plus adaptés. La supériorité du HRSPCM pour les opérations de séchage à grande échelle a été démontrée.

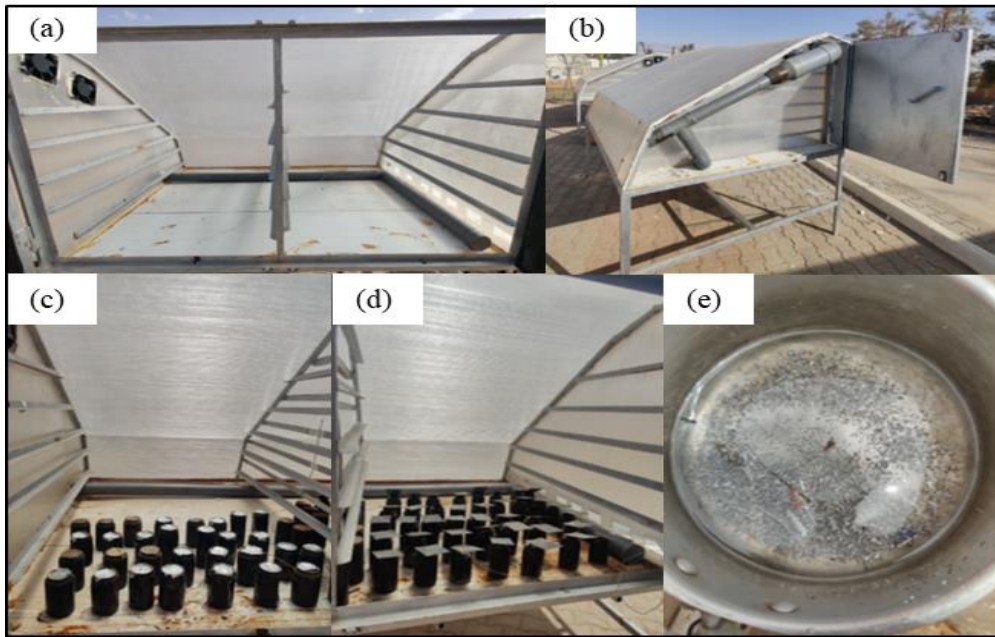


Figure II.16. Le prototype amélioré par les systèmes de récupération de chaleur et PCM [39]

Kherrafi et al. [5] ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur dans un séchoir solaire direct grâce à l'intégration stratégique d'obstacles, comblant ainsi une lacune dans la littérature existante qui se concentrait principalement sur la conception des chambres de séchage et l'amélioration des capteurs solaires sans optimiser les performances internes. L'efficacité du transfert de chaleur a été augmentée afin d'accélérer le séchage des produits agricoles. La création de turbulence dans le flux d'air a été induite par le positionnement des obstacles, améliorant ainsi le mélange et la répartition de la chaleur. Cette approche a été validée par des observations expérimentales et des simulations en dynamique des fluides numériques (CFD) avec ANSYS Fluent. Il a été constaté que l'intégration des obstacles a permis d'augmenter la température maximale du séchoir de 10 °C à 14,1 °C. Une meilleure distribution de l'air a été démontrée numériquement, créant des zones de haute vitesse près des obstacles et améliorant la circulation globale de l'air. De plus, une réduction du temps de séchage de plus de 4,5 heures a été obtenue, avec une efficacité thermique maximale atteignant 69,39 %. Enfin, cette amélioration a contribué à la réduction des émissions de CO₂ à 36,01 kg par an, soulignant ainsi les avantages environnementaux du système.

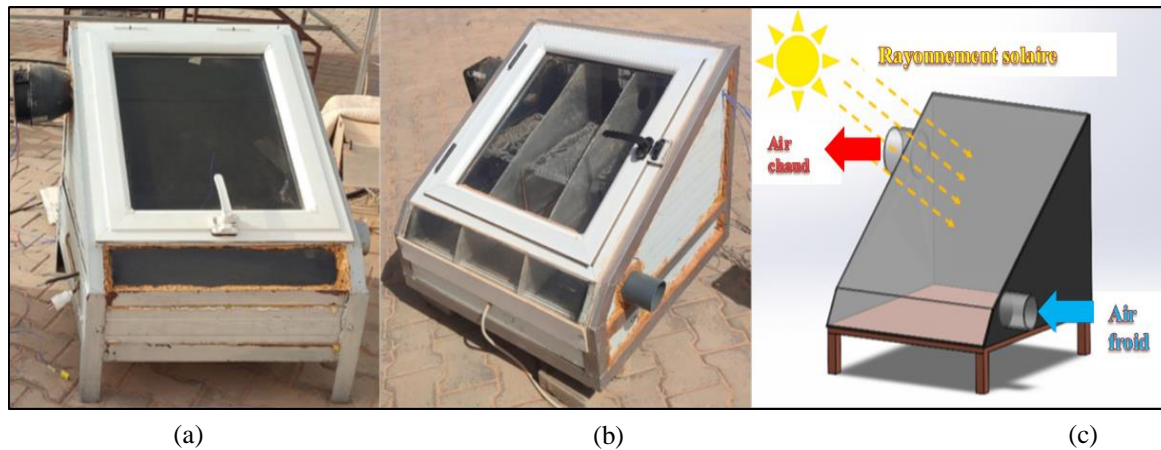


Figure II.17. Dispositif expérimental ; (a) Séchoirs solaires avant modifications ; (b) Séchoirs solaires après modifications ; (c) Illustration schématique [5]

Gampoula et al. [40] ont étudié la cinétique de séchage des capsules d'huile de ricin et les variations des quantités thermiques pouvant survenir pendant le séchage. Deux méthodes de séchage ont été utilisées : le séchage par conduction dans un four à des températures variant de 50 °C, 60 °C et 70 °C, et le séchage par radiation dans un séchoir solaire de type bateau à une température moyenne de 49 °C. Il a été observé que la perte de masse des capsules d'huile de ricin variait en fonction du temps et de la température appliquée, et était plus rapide dans le four à 60 °C et 70 °C que dans le séchoir solaire à une température moyenne de $49,2 \pm 0,03$ °C. Il a été constaté que plus la température de séchage n'était élevée, plus le temps de séchage était court. Sept (7) modèles ont été utilisés pour la modélisation. Les données de modélisation basées sur l'analyse de R^2 ; χ^2 et RMSE ont montré que les meilleurs modèles pour le séchage au four des capsules d'huile de ricin étaient ceux de Midili et al., pour des températures de séchage de 50 °C et 70 °C, et le modèle logarithmique pour le séchage à 60 °C. Pour le séchage solaire, le meilleur modèle était celui proposé par Henderson et Pabis, modifié.



(a)

(b)

Figure II.18. a) Plante de ricin ; b) Capsule de ricin [40]

Cette étude, menée par Muthuvairavan et al. [41] analyse la performance d'un nouveau séchoir solaire direct à pente unique, modifié en surface (SM), utilisant un mode de circulation d'air naturel (NACM), combiné à un réflecteur à plaque plane, un concentrateur parabolique composé et un système de stockage d'énergie thermique (TES). L'acétate de sodium tri hydraté a été utilisé comme TES pour stocker l'excédent d'énergie solaire pendant la journée et la libérer après le coucher du soleil. Le séchoir proposé a atteint le taux de séchage moyen le plus élevé de 108,91 g/h, surpassant les configurations SM NACM et NACM, qui ont respectivement atteint 86,38 g/h et 78,28 g/h. Par rapport à l'OSD (59,64 g/h), le système intégré a réduit la teneur en humidité 82,61% plus rapidement. La température de l'air de séchage dans le SM NACM a montré une uniformité presque totale durant le processus. Le système a présenté une efficacité de séchage maximale de 31,27% et une efficacité énergétique de 27,72%. Le TES a augmenté la température de l'air de séchage de 0,85 à 12,2 °C, permettant une évaporation continue pendant 2 heures après le coucher du soleil. Le système a démontré sa viabilité économique avec un retour sur investissement de 3,34 mois et des bénéfices environnementaux, en réduisant 25,99 tonnes de CO₂ au cours de sa durée de vie, générant 379,91 \$ en crédits carbone.



Figure II. 19. Photographie du montage expérimental [41]

Cette étude a porté sur l'évaluation des performances d'un séchoir solaire direct conçu par Pambou-Tobi et al. [42]. La plante de plantain (*Musa AAB x paradisiaca*) de la variété Agrin a été utilisée comme matière première. La méthode utilisée consistait à dimensionner le séchoir, évaluer ses performances pour apprécier sa capacité, et caractériser physiquement et chimiquement la farine de banane obtenue. Les résultats ont montré que la température du séchoir était en moyenne 86,18 % plus élevée que la température ambiante tout au long de la journée, atteignant 96,88 % en trois heures, peu avant midi. Le taux de séchage et l'efficacité

du système étaient respectivement de 0,1106 kg/h et 44,1 %. Le taux de séchage rapide du séchoir a révélé sa capacité à sécher rapidement l'aliment jusqu'à un taux d'humidité de 34 %.

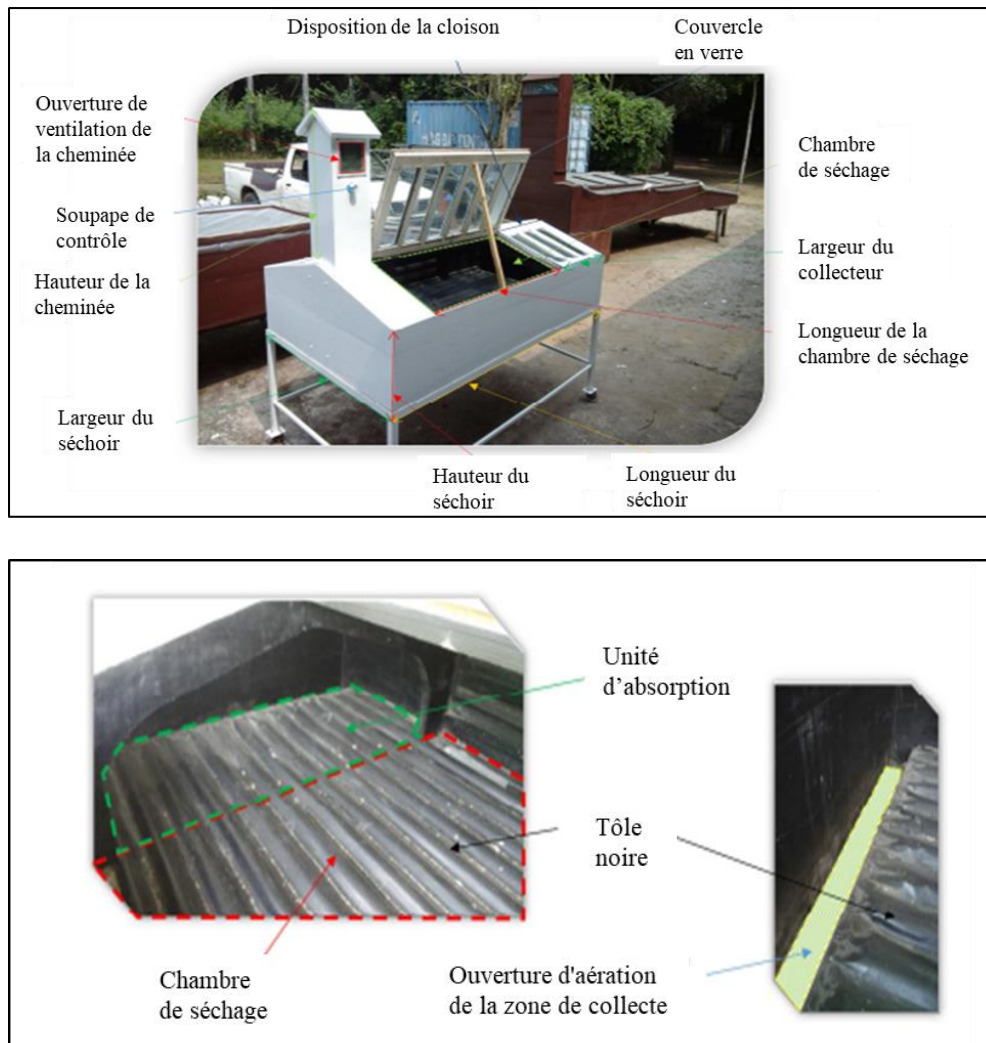


Figure II.20. Séchoir solaire vu de l'extérieur (a) et grilles de la chambre de séchage (b et c) du séchoir solaire [42]

Une méthode simple et évolutive a été présentée par Liu et al. [43] pour la synthèse de composites de matériaux à changement de phase (PCM) intégrés à une mousse de carbone issue de mousse de polyisocyanurate (PIR). Une capacité élevée de chargement en PCM, une excellente stabilité de forme, ainsi qu'une bonne fiabilité thermique et chimique ont été rendues possibles grâce à la structure tridimensionnelle de la mousse de carbone. Une surface spécifique élevée (jusqu'à 1968 m²/g) a été obtenue par activation chimique, permettant une capacité de stockage d'énergie atteignant 105,2 J/g. Il a été démontré que le volume total des pores de la mousse contrôle la capacité de chargement en PCM et les performances de stockage thermique.

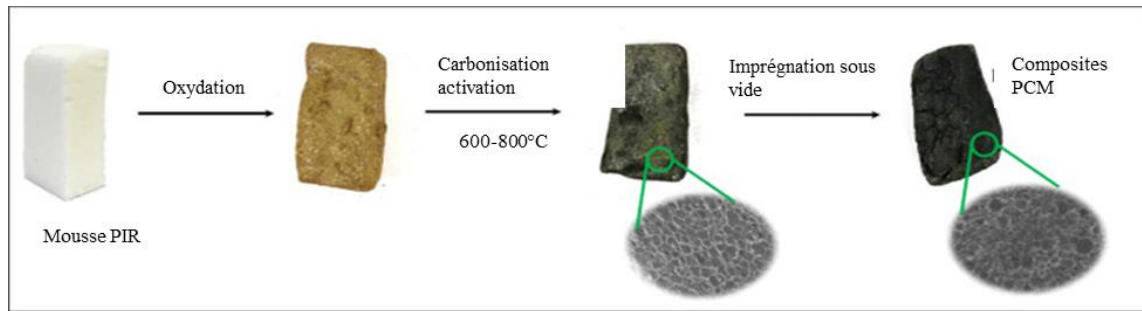


Figure II.21. Étapes de fabrication de composites PCM à partir de mousse PIR pour le stockage d'énergie thermique

Dans les séchoirs solaires, où le temps de séchage est limité par les heures d'ensoleillement et où une chaleur excessive peut entraîner une perte de minéraux, l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) a été envisagée comme solution de stockage thermique par Manikandan et al. [44]. Toutefois, les performances de ces matériaux sont fortement influencées par leur temps de réponse, ce qui a conduit à ce qu'une attention particulière soit portée à la configuration de leurs conteneurs. Dans cette étude, quatre configurations différentes de conteneurs ont été analysées par simulation numérique à l'aide d'ANSYS Fluent, avec l'ajout d'ailettes, solides ou creuses. La paraffine RT58 a été choisie en raison de son point de fusion compatible avec la température de fonctionnement du séchoir solaire. Il a été observé que les conteneurs de forme rectangulaire horizontale permettent une fusion et une solidification plus rapides, tandis que les formes cylindriques ralentissent ces processus. Une réduction notable des temps de changement de phase a été obtenue par l'ajout d'ailettes, accentuée par leur multiplication.

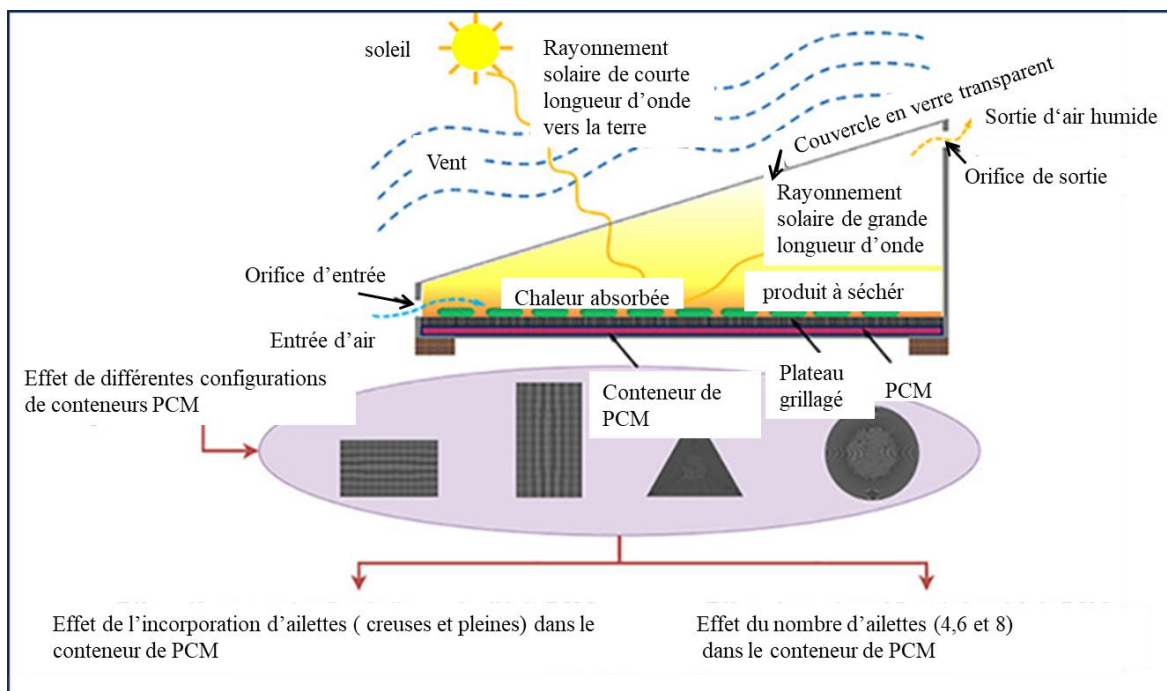


Figure II.22. Étude de l'influence de la configuration des conteneurs à matériau à changement de phase (PCM) sur l'efficacité thermique des séchoirs solaire

L'accélération du processus de séchage dans les séchoirs solaires a été rendue possible grâce à l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM), permettant de pallier le manque ou l'absence d'ensoleillement. Toutefois, il a été constaté que ni la quantité minimale requise de PCM, ni son positionnement optimal n'avaient été suffisamment étudiés. Dans cette recherche, des expérimentations ont été réalisées par Murugesan et al. [45] sur le séchage de tranches de banane à l'aide de 4 et 10 tubes en cuivre, remplis respectivement de 176 g et 494 g de paraffine commerciale (appelés SD-PCM1 et SD-PCM2). Les tubes ont été placés verticalement et horizontalement sur les parois internes de la chambre de séchage, sans que le flux ascendant d'air ne soit perturbé. Une comparaison a été effectuée entre les performances de ces systèmes et celles d'un séchoir solaire naturel sans PCM (SD). Aucune amélioration notable n'a été observée avec SD-PCM1, ce qui a conduit à la conclusion qu'une masse de PCM supérieure à 176 g était nécessaire. Avec SD-PCM2, une réduction du temps de séchage de 15 h à 9 h a été obtenue pour une même masse finale de produit. La cinétique de séchage a été analysée à l'aide d'une courbe généralisée, montrant une concordance des résultats expérimentaux pour tous les modes, malgré les variations d'apport thermique. Des rendements énergétiques moyens de 21 %, 26 % et 28 % ont été respectivement enregistrés pour SD, SD-PCM1 et SD-PCM2. Une amélioration de l'indice de durabilité (1,41 contre 1,27) et une diminution du facteur d'impact environnemental (2,5 contre 3,77) ont été constatées avec SD-PCM2, ce qui a confirmé l'intérêt de l'utilisation des PCM dans les séchoirs solaires.

Dans cette étude [46], l'effet du stockage d'énergie thermique sensible et latente sur la cinétique de séchage, les aspects économiques et la qualité nutritionnelle de concombres séchés a été examiné à l'aide d'un séchoir solaire en mode mixte. Un lit de galets noirs a été placé à la base de la chambre de séchage pour permettre le stockage de chaleur sensible, tandis que de l'acide laurique a été utilisé comme matériau à changement de phase (PCM) dans une chambre sur mesure, connectée en série au capteur solaire, pour assurer le stockage de chaleur latente. Trois essais ont été réalisés : sans stockage (test 1), avec stockage sensible seul (test 2) et avec stockage combiné sensible et latent (test 3). Par rapport au séchage en plein air, une réduction du temps de séchage de 29,4 %, 47 % et 70,5 % a été obtenue respectivement pour les tests 1, 2 et 3. Des températures moyennes de 42,3 °C, 45,9 °C et 50,9 °C ont été enregistrées selon les configurations. Le taux de séchage a été augmenté jusqu'à 0,76 kg d'humidité éliminée par heure grâce à l'intégration des deux formes de

stockage, et une efficacité maximale de 14,2 % a été atteinte. La période de retour sur investissement la plus courte (0,7 an) a été obtenue avec le test 3, qui a aussi permis les meilleurs résultats économiques. Une teneur en vitamine C plus élevée a été mesurée dans les produits séchés dans les trois tests par rapport au séchage en plein air, avec une conservation maximale observée dans le test 3.

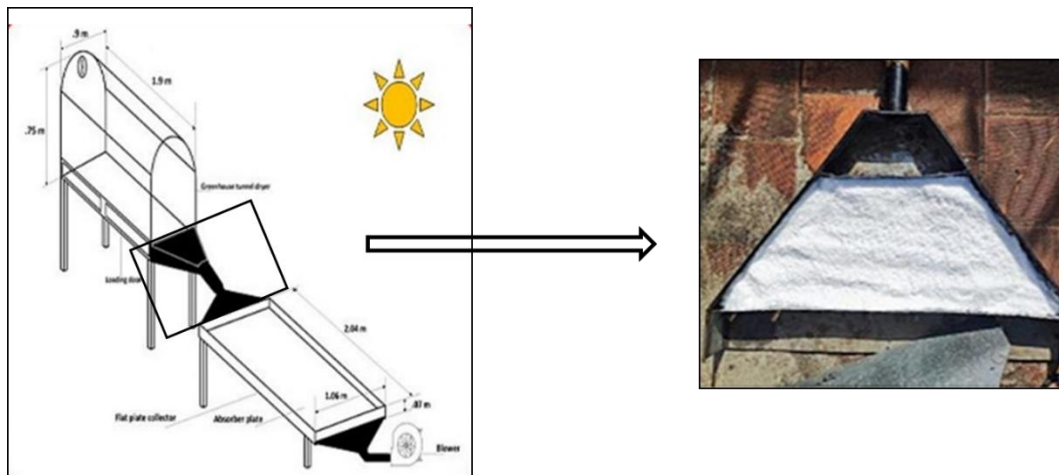


Figure II. 23. Séchoir solaire tunnel à mode mixte avec stockage de chaleur latente (LHS) [46]

II. Conclusion

Ce chapitre a permis de faire un tour d'horizon des travaux de recherche menés sur le séchage solaire, en particulier les dispositifs intégrant des améliorations thermiques. L'étude bibliographique a mis en évidence les diverses approches adoptées par les chercheurs pour optimiser les performances des séchoirs solaires, notamment par l'ajout d'obstacles, l'utilisation de matériaux à changement de phase, ou encore l'amélioration de la circulation de l'air. Les recherches antérieures ont montré que l'intégration d'éléments modifiant le comportement du flux d'air pouvait améliorer le transfert de chaleur, réduire le temps de séchage et augmenter l'uniformité du processus. Ces résultats confirment la pertinence de notre orientation expérimentale visant à étudier l'effet des obstacles sur le rendement thermique d'un séchoir solaire direct. Ce bilan bibliographique constitue donc un appui fondamental pour la suite du travail, en orientant le choix des paramètres à étudier et en posant les bases de la démarche expérimentale adoptée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail s'est attaché à améliorer les performances thermiques d'un séchoir solaire direct en introduisant des modifications internes visant à optimiser le transfert de chaleur et la répartition de l'air dans la chambre de séchage. À travers une approche expérimentale rigoureuse, plusieurs configurations ont été étudiées, notamment l'intégration d'obstacles, l'ajout de trous d'aération, la combinaison des deux, ainsi que l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP).

Les observations issues de ces expériences peuvent être résumées comme suit :

- L'intégration d'obstacles a permis d'améliorer sensiblement le processus de séchage, notamment en favorisant une meilleure circulation de l'air autour des produits.
- L'ajout de trous d'aération a contribué à renforcer la ventilation naturelle, ce qui s'est traduit par une meilleure extraction de l'humidité.
- La combinaison des obstacles et des trous d'aération a offert un compromis intéressant, en augmentant la turbulence de l'air tout en assurant une répartition plus homogène de la chaleur.
- L'utilisation conjointe de ces éléments avec des matériaux à changement de phase a montré un potentiel d'amélioration supplémentaire, en stabilisant les températures internes et en maintenant des conditions thermiques favorables au séchage.

Dans l'ensemble, le taux de séchage a été amélioré dans le séchoir optimisé, en particulier dans les configurations combinées. Cela a permis une évaporation plus rapide de l'humidité, avec une température interne plus stable et mieux répartie.

La diffusivité effective de l'humidité, indicateur clé du transfert de masse, a également été globalement plus élevée dans les configurations modifiées, traduisant un transfert plus efficace grâce à une dynamique d'air optimisée.

D'un point de vue énergétique, les performances thermiques du système se sont nettement améliorées avec les modifications apportées, notamment grâce à la synergie entre les obstacles, la ventilation naturelle et les matériaux à changement de phase.

L'analyse économique a montré un intérêt marqué pour le séchoir amélioré, notamment en termes de rentabilité, avec une réduction du temps de retour sur investissement et une augmentation des économies annuelles réalisables.

Conclusion générale

En conclusion, l'intégration combinée d'obstacles, de trous d'aération et de MCP permet d'améliorer de manière significative les performances de séchage, tant sur les plans thermique, énergétique qu'économique. Ces résultats renforcent la pertinence de telles solutions pour des applications agricoles et rurales à faibles ressources énergétiques. Des travaux futurs pourraient s'orienter vers une modélisation numérique approfondie et l'optimisation automatisée des paramètres de conception.

References

- [1] E. Loizou, C. Karelakis, K. Galanopoulos, K. Mattas, The role of agriculture as a development tool for a regional economy, *Agricultural systems* 173 (2019) 482-490.
- [2] F. Becerra-Sanchez, G. Taylor, Reducing post-harvest losses and improving quality in sweet corn (*Zea mays* L.): challenges and solutions for less food waste and improved food security, *Food and Energy Security* 10(3) (2021) e277.
- [3] A. Merivaara, J. Zini, E. Koivunotko, S. Valkonen, O. Korhonen, F.M. Fernandes, M. Yliperttula, Preservation of biomaterials and cells by freeze-drying: Change of paradigm, *Journal of Controlled Release* 336 (2021) 480-498.
- [4] S. Madhankumar, K. Viswanathan, M.I. Taipabu, W. Wu, A review on the latest developments in solar dryer technologies for food drying process, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 58 (2023) 103298.
- [5] M.A. Kherrafi, A. Benseddik, R. Saim, S. Bahaz, T. Messeguem, Experimental and numerical study of performance enhancement in a direct solar dryer integrated with obstacles, *Applied Thermal Engineering* 259 (2025) 124942.
- [6] M.A. Kherrafi, A. Benseddik, R. Saim, A. Bouregueba, A. Badji, C. Nettari, I. Hasrane, Advancements in solar drying technologies: Design variations, hybrid systems, storage materials and numerical analysis: A review, *Solar Energy* 270 (2024) 112383.
- [7] H.S. El-Mesery, A.I. El-Seesy, Z. Hu, Y. Li, Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157 (2022) 112070.
- [8] A. Müller, M.T. Nunes, V. Maldaner, P.C. Coradi, R.S. de Moraes, S. Martens, A.F. Leal, V.F. Pereira, C.K. Marin, Rice drying, storage and processing: effects of post-harvest operations on grain quality, *Rice Science* 29(1) (2022) 16-30.
- [9] A.K. Ray, *Drying, Coulson and Richardson's Chemical Engineering*, Elsevier 2023, pp. 457-533.
- [10] A. Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim, Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review, *Solar Energy* 221 (2021) 559-582.
- [11] F. Salehi, Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review, *International Journal of Fruit Science* 21(1) (2021) 546-555.
- [12] C. Gu, H. Ma, J.A. Tuly, L. Guo, X. Zhang, D. Liu, N. Ouyang, X. Luo, Y. Shan, Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives, *Lwt* 161 (2022) 113363.

Références

- [13] Z.-L. Liu, L. Xie, M. Zielinska, Z. Pan, L.-Z. Deng, J.-S. Zhang, L. Gao, S.-Y. Wang, Z.-A. Zheng, H.-W. Xiao, Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD), *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 77 (2022) 102948.
- [14] E.A. Nainggolan, J. Banout, K. Urbanova, Recent trends in the pre-drying, drying, and post-drying processes for cassava tuber: a review, *Foods* 13(11) (2024) 1778.
- [15] C.N. Deepak, A.K. Behura, Critical Review on Various Solar Drying Technologies: Direct and Indirect Solar Dryer Systems, *Applied Solar Energy* 59(5) (2023) 672-726.
- [16] A. Al-Hamdani, H. Jayasuriya, P.B. Pathare, Z. Al-Attabi, Drying characteristics and quality analysis of medicinal herbs dried by an indirect solar dryer, *Foods* 11(24) (2022) 4103.
- [17] J.P. Ekka, P. Muthukumar, K. Bala, D.K. Kanaujiya, K. Pakshirajan, Performance studies on mixed-mode forced convection solar cabinet dryer under different air mass flow rates for drying of cluster fig, *Solar Energy* 229 (2021) 39-51.
- [18] C.L. Hii, S.P. Ong, J.Y. Yap, A. Putranto, D. Mangindaan, Hybrid drying of food and bioproducts: A review, *Drying Technology* 39(11) (2021) 1554-1576.
- [19] B.N. D. Pagukuman, M.K. Wan Ibrahim, A review of the significance effect of external factors of the solar dryer design to dried foods product quality, *Journal of Engineering, Design and Technology* 20(6) (2022) 1765-1786.
- [20] M.H. Mousa, N. Miljkovic, K. Nawaz, Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 (2021) 110566.
- [21] B.A. Eke, Development of small scale direct mode natural convection solar dryer for tomato, okra and carrot, *International Journal of Engineering and Technology* 3(2) (2013) 199-204.
- [22] M. Sandali, A. Boubekri, D. Mennouche, Thermal behavior modeling of a cabinet direct solar dryer as influenced by sensible heat storage in a fractured porous medium, *AIP Conference Proceedings* 1968(1) (2018).
- [23] O.I. Alonge, S.O. Obayopo, Computational fluid dynamics and experimental analysis of direct solar dryer for fish, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 21(2) (2019).
- [24] A. Jain, M. Sharma, A. Kumar, A. Sharma, A. Palamanit, Computational fluid dynamics simulation and energy analysis of domestic direct-type multi-shelf solar dryer, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 136(1) (2019) 173-184.

Références

- [25] M. Sandali, A. Boubekri, D. Mennouche, N. Gherraf, Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study, *Renewable Energy* 135 (2019) 186-196.
- [26] S. Nabnean, P. Nimnuan, Experimental performance of direct forced convection household solar dryer for drying banana, *Case Studies in Thermal Engineering* 22 (2020) 100787.
- [27] S.A. Jiskani, I.A. Chandio, G. Mehdi, A.H. Memon, A.R. Bhutto, U.G. Sandilo, Fabrication & performance analysis of direct type passive solar dryer for chilies and grapes drying, 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), 2020, pp. 1-6.
- [28] L.F. Hidalgo, M.N. Candido, K. Nishioka, J.T. Freire, G.N.A. Vieira, Natural and forced air convection operation in a direct solar dryer assisted by photovoltaic module for drying of green onion, *Solar Energy* 220 (2021) 24-34.
- [29] S. Sharma, K. Dhalsamant, P.P. Tripathy, R.K. Manepally, Quality analysis and drying characteristics of turmeric (*Curcuma longa* L.) dried by hot air and direct solar dryers, *LWT* 138 (2021) 110687.
- [30] S. Kingtong, J. Kaenchan, S. Chanaklang, M. Khamvajirapitak, Development of a direct solar powered dryer for drying cultivated banana in community scale, *The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University* 9(1) (2021) 33-43.
- [31] A.E. Kabeel, M.M. El-Sheekh, A.A. Masoud, Performance analysis of direct solar dryer driven by photovoltaic thermal energy recovery and solar air collector for drying materials and electricity generation, *Heat Transfer* 51(4) (2022) 3573-3585.
- [32] M. Yao, M. Li, Y. Wang, G. Li, Y. Zhang, M. Gao, Z. Deng, T. Xing, Z. Zhang, W. Zhang, Analysis on characteristics and operation mode of direct solar collector coupled heat pump drying system, *Renewable Energy* 206 (2023) 223-238.
- [33] M.C. Ndukwu, G. Akpan, A.N. Okeahialam, J.D. Umoh, E.A. Ubuoh, U.G. Benjamine, C. Nwachukwu, C.A. Kalu, J. Mbanasor, H. Wu, A comparison of the drying kinetics, energy consumption and colour quality of drying medicinal leaves in direct-solar dryer with different colours of collector cover, *Renewable Energy* 216 (2023) 119076.
- [34] J.I. Miano, M.A. Nabua, A.R. Gaw, A.R.B. Alce, C.A.M. Ecleo, J.V. Repulle, J.J. Omar, Optimizing drying efficiency through an IoT-based direct solar dryer system: Integration of web data logger and SMS notification, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 14(7) (2023).

Références

- [35] Shimpy, M. Kumar, A. Kumar, Experimental and simulation studies on the no-load performance assessment of a domestic solar dryer, *Heat Transfer* 53(3) (2024) 1312-1335.
- [36] K. Kannapiran, R. Baskaran, S. Sugumar, E. Manoj, R. Kannan, K. Dhandapani, S. Erukala, An experimental investigation of a direct cabinet solar dryer integrated with a phase change material for drying mangoes, *AIP Conference Proceedings* 2971(1) (2024) 020059.
- [37] J. Menya, P. Tumutegyeize, I. Kabenge, J. Kigozi, Optimization of Direct Passive Solar Dryer and Raised Drying Platform for Cassava Drying, (2024).
- [38] R.L. Callejas, M.V. Mier, A.L. Ramos, Analysis of the drying kinetics of sargassum using direct solar dryer and solar energy direct, *Brazilian Journal of Development* 10(6) (2024) e70951-e70951.
- [39] C. Nettari, A. Boubekri, A. Benseddik, S. Bouhoun, D. Daoud, A. Badji, I. Hasrane, Design and performance evaluation of an innovative medium-scale solar dryer with heat recovery based-latent heat storage: Experimental and mathematical analysis of tomato drying, *Journal of Energy Storage* 88 (2024) 111559.
- [40] R.H. Gampoula, R. Nguie, M. Elenga, H. Lucadeïde, M. Souleymane, S.P. Ntsossani, D.J.M. De Mabiri, Influence of two drying methods (oven and solar dryer) in modeling the drying kinetics of *Ricinus communis* L. capsules, *World Journal of Advanced Research and Reviews* 25(1) (2025) 1443-1452.
- [41] G. Muthuvairavan, S. Kumar, Experimental Study on Drying Kohlrabi Under Surface Modified Direct Solar Dryer Integrated with Flat Plate Reflector, Compound Parabolic Concentrator, and Thermal Energy Storage, *Compound Parabolic Concentrator, and Thermal Energy Storage* (2025).
- [42] P. Pambou-Tobi, A. Sompila, M. Elenga, R. Boumba, J. Moussounga, Evaluation of the performance of a direct mode solar dryer of local manufacture: application to plantain, *Adv. Appl. Sci. Jan* (2023).
- [43] X. Liu, F. Yang, M. Li, C. Sun, Y. Wu, Development of cost-effective PCM-carbon foam composites for thermal energy storage, *Energy Reports* 8 (2022) 1696-1703.
- [44] S. Manikandan, G. Muthuvairavan, M. Samykano, S.K. Natarajan, Numerical simulation of various PCM container configurations for solar dryer application, *Journal of Energy Storage* 86 (2024) 111294.
- [45] G.K. Murugesan, C. Murugesan, M. Sakthivel, S. Tamilkolundu, Experimental investigation on a solar dryer assisted with minimum phase change material (PCM) placed on the inner walls of drying chamber, *Journal of Energy Storage* 98 (2024) 113069.

Références

[46] C.N. Deepak, A.K. Behura, Effect on drying kinetics and product quality of cucumber in a mixed mode solar tunnel dryer upon integration of sensible and latent heat thermal energy storage, *Solar Energy* 285 (2025) 113113.