

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de génie des procédés

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

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

Développement et test d'un séchoir solaire indirect avec stockage d'énergie par matériau à changement de phase (MCP) pour la conservation des produits locaux en régions semi-arides

Présenté par :

Bouchaala Roumaïssa

Ouddane Manel

Soutenue publiquement le 24 /06/2025

Devant le jury composé de :

MANSOURI Khaled	Maitre de conférences A	Ghardaïa	Président
AOUF Mohammed	Maitre de conférences B	Ghardaïa	Examineur
BENSEDDIK Abdelouahab	Directeur de recherche	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Encadreur
BOUCHAALA Abdallah	Doctorant	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2024/2025



publique Algérienne Démocratique et
Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de
La Recherche Scientifique

Université de Ghardaia



Incubateur Université de Ghardaïa

Faculté des sciences et techniques

Département de génie des procédés

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER en génie
chimique dans le cadre de la résolution ministérielle 008 modifiant la résolution**

1275

Mémoire de fin d'études – startup/brevet

Thème :

**Développement et test d'un séchoir solaire indirect avec stockage
d'énergie par matériau à changement de phase (MCP) pour la
conservation des produits locaux en régions semi-arides**

Préparé par les étudiants :

Bouchaala Roumaïssa

Ouddane Manal

Encadré par :

Pr. Ben Seddik Abdelouahab

M. Bouchaala Abdallah

Année universitaire : 2024–2025

2025

Dédicace

Loué soit le Dieu tout-puissant, qui a éclairé mon chemin et facilité mes pas.

Je dédie le fruit de mes humbles efforts :

À ma mère bien-aimée dont les prières silencieuses ont été le secret de ma réussite et dont la satisfaction a illuminé ma vie.

À mon père bien-aimé, modèle de patience et de dignité, mon premier guide sur le chemin de la connaissance et mon maître.

À mon vénérable frère, superviseur de ce travail et source constante d'inspiration, qui a enrichi cette étude de ses connaissances et de son affection. À ma partenaire dans ce travail, ma compagne déterminée et persévérante Manal

À mes amis de longue date, à tous mes collègues, au département de génie chimique, et à mes compagnons du domaine des énergies renouvelables, véritables porteurs de la flamme du travail collectif. Que Dieu les protège et les guide.

Au reste de mes quatre frères, mes compagnons de vie et les piliers de mon cœur, qui ont été ma force dans les moments de détresse et ma consolation dans les moments de doute.

À tous mes professeurs et amis fidèles, et à toutes les personnes chères à mon cœur qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à mon parcours et à mon éducation.

Je vous adresse à tous cette dédicace avec une profonde gratitude, un grand respect et une grande affection.

BOUCHAALA Roumaissa



اهداء

الحمد لله حبا وشكرا وامتنان على البدء والختام

(واخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين)

لم تكن الرحلة قصيرة ولا الطريق محفورة بالتسهيلات لكنني فعلتها فالحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبكل حب اهدي
نجاحي

الى الرجل الذي توقظني رناته كل صباح قائلا هيا الى الفلاح سندي وملجئي الامن...داعمي ومشجعي الدائم...حين ينادوني باسمه
اسعد بابي ابنته وثمرته...من رأيت انعكاس نجاحي وفرحي بريقا في عينه.

اليك والدي العزيز

الى بهجة قلبي الى معنى الحب ونبع الحنان بسمة الحياة وسر الوجود التي ازاحت الشوك من طريقي فكانت اوراقى واقلامي وقنديلي في
الليالي المظلمات من كان دعائها ورضائها بوصلي فالمسير متعها الله بالصحة والعافية.

اليك أعلى الحبايب امي الحبيبة

ادعو الله ان يحفظكما ويديمكما لي نورا فانا ممتنة لكل ما بذلتموه لأجلي.

الى خير ايامي وصفوتها نظر عيني أيوب... سندي اخوتي شكرا لكم على كل كلمة تشجيع وكل لحظة وقفتم بها بجانبني خاصة ذات
الروح الطيبة جدتي والحكيم جدي فأنتم جذوري... لطالما كنت الحفيدة الأولى وفرحتكم وسأظل.

عائلي

الى المشاغب الصغير قمري وقطعة من قلبي يكبر امام عيني ارجو لك مستقبلا مليئا بالنجاح.

اخي صفوان

الى شريكتي في هذا العمل رفيقتي صاحبة العزم والمثابرة رميصة واصدقائي رفقاء السنين وكل زملائي وقسم الهندسة الكيميائية
ورفقائي في درب الطاقات المتجددة شعلة العمل الجماعي رعاهم الله ووفقهم.

الى أرواح شهداء غزة، لكم المجد وان غبتم، فأنتم الحاضرون في كل انتصار، رحمكم الله واعلى مقامكم.

والى كل من كان لهم الدور الأسمى في بناء هذا الإنجاز اساتذتي لكم مني كل القدير والامتنان.

وأخيرا الى نفسي التي تحملت كل الصعاب امنتم بالحلم ووقفت صامدة رغم كل شيء

فهذا الإنجاز هو وسام صبرك واصرارك، وهديتك التي تستحقينها.

وذان منال

2025

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la santé et la persévérance nécessaires pour entreprendre et mener à bien ce travail.

*Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude au Promoteur **Dr. BENSSEDDIK Abdelouahab** et Co-promoteur **BOUCHAALA Abdallah** pour leur encadrement continu, leur soutien indéfectible et leurs précieux conseils tout au long de nos recherches.*

Leur dévouement et leurs encouragements ont contribué à nos progrès et nous leur en sommes sincèrement reconnaissants.

*Nous sommes également reconnaissants au **Dr.....**, professeur à l'Université de ghardaia, pour son temps, ses efforts et sa disponibilité à relire notre mémoire et à présider le comité d'évaluation.*

*Nos remerciements vont également au **Dr.....**, maître de conférences à l'Université deghardaia, pour l'honneur qui nous a été fait de siéger au comité d'évaluation.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement le **Directeur** de l'Unité de Recherche Appliquée aux Énergies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa pour son soutien.*

*Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude et notre reconnaissance à nos professeurs : **Mr. Hemza KHERCHOU, Mme Ghania Hamdoune**, pour leurs précieux conseils, leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre projet de fin d'études. Votre expertise, votre patience et votre dévouement ont grandement contribué à la réalisation de ce travail. Ce dévouement est un humble témoignage de notre respect et de notre reconnaissance pour tous vos efforts. Nous vous en remercions sincèrement.*

Nos chers : membres de famille, proches et amis merci à vous tous pour vos Implications, soutiens constants et vos encouragements durant toutes les années D'études.



المخلص

في ظل التحديات الكبيرة التي تواجه حفظ المنتجات الزراعية بعد الحصاد في الجزائر، خاصة في المناطق الصحراوية، تقترح هذه الدراسة نهجًا مبتكرًا للتجفيف الشمسي غير المباشر باستخدام الحمل القسري. تم تصميم وإنجاز نموذجين متماثلين يحتويان على أنابيب معدنية مربعة الشكل، مرتبة على شكل حرف V داخل مجمع الهواء الشمسي. النموذج الأول يحتوي على مادة متغيرة الطور (PCM) مملوءة بالبرافين لتخزين الحرارة الكامنة، بينما يحتوي النموذج الثاني على أنابيب فارغة كمرجع. الهدف هو تقييم تأثير إدماج مادة التخزين الحراري على الأداء الحراري وفعالية التجفيف.

أُجريت التجارب على ثلاثة أنواع من المخلفات الزراعية (أوراق النخيل، عيدان الزيتون، وفروع الزيتون) تحت ظروف شمسية حقيقية بجنوب الجزائر. أظهر النظام المزود بـ PCM قدرة على بلوغ درجات حرارة أعلى وأكثر استقرارًا (حتى 81 درجة مئوية)، مقارنة بالنظام دون تخزين (بحد أقصى 73 درجة مئوية)، مما أدى إلى تجفيف أسرع وأكثر انتظامًا. تم تحليل بيانات التجفيف باستخدام نماذج التجفيف بالطبقة الرقيقة، حيث أظهر نموذج Midilli–Kucuk أفضل توافق ($R^2 > 0.99$). كما أظهر معامل الانتشار الفعال للرطوبة ($Deff$) قيمًا أعلى في النظام المزود بـ PCM؛ فمثلًا لأوراق النخيل بلغ $3.1 \times 10^{-10} \text{ م}^2/\text{ث}$ مع التخزين، مقابل $1.9 \times 10^{-10} \text{ م}^2/\text{ث}$ بدون.

تؤكد هذه النتائج فعالية التصميم المقترح، الذي يجمع بين تحسين نقل الحرارة وتخزين الطاقة الحرارية. يمثل هذا المجفف الشمسي الهجين حلًا واعدًا لتجفيف المنتجات الزراعية في المناطق الريفية والمعزولة.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي غير مباشر؛ معامل الانتشار الفعال للرطوبة؛ أنابيب مربعة على شكل V؛ مواد متغيرة الطور؛ تخزين حراري؛ الكفاءة الطاقوية.

Abstract

In regions like southern Algeria, where post-harvest losses of agricultural products are significant due to high humidity and lack of preservation infrastructure, this study introduces an innovative approach to indirect solar drying using forced convection. Two identical prototypes were developed, each incorporating square-section metal tubes arranged in a V-shape inside the solar air collector. In the first prototype, these tubes are filled with paraffin as a phase change material (PCM) for latent heat storage, while the second uses empty tubes as a control. The objective is to assess the impact of PCM integration on thermal performance and drying efficiency.

Experiments were conducted on three agricultural residues: palm leaves, olive stems, and olive branches, under real solar conditions in southern Algeria. The PCM-enhanced system achieved higher and more stable air temperatures (up to 81 °C), compared to the non-PCM system (maximum 73 °C), leading to faster and more uniform moisture removal. Thin-layer drying models were applied to the data, with the Midilli–Kucuk model providing the best fit ($R^2 > 0.99$). Effective moisture diffusivity ($Deff$) was also improved in the PCM system; for palm leaves, $Deff$ reached $3.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ with PCM, versus $1.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ without.

These findings confirm the dual benefit of the proposed configuration, which improves both heat transfer and thermal energy storage. The hybrid solar dryer offers enhanced energy efficiency and represents a promising solution for sustainable agricultural drying in off-grid regions.

Keywords: Indirect solar dryer; Effective moisture diffusivity; V-shaped square tubes; Phase change materials (PCM); Thermal storage; Energy efficiency.

Résumé

Dans un contexte où la conservation post-récolte des produits agricoles représente un défi majeur en Algérie, en particulier pour les zones rurales à fort potentiel solaire, cette étude propose une approche innovante du séchage solaire indirect à convection forcée. Elle vise à surmonter la principale limite de ces systèmes – leur dépendance à l'ensoleillement – par l'intégration d'un système de stockage thermique à base de matériau à changement de phase (PCM). Deux prototypes identiques ont été conçus et réalisés, intégrant des tubes en acier à section carrée disposés en forme de V entre l'absorbeur et l'isolant du capteur solaire à air. Dans le premier prototype, ces tubes sont remplis de paraffine pour assurer le stockage de chaleur latente, tandis que dans le second, les tubes sont laissés vides pour servir de référence. L'étude expérimentale a été menée sous conditions climatiques réelles dans le sud de l'Algérie, avec le séchage de trois résidus agricoles (feuilles de palmier, tiges et branches d'olivier). Les résultats montrent que le système équipé de PCM permet d'atteindre des températures d'air plus élevées et stables (jusqu'à 81 °C) par rapport au système sans stockage (73 °C), favorisant ainsi un séchage plus rapide et homogène. La modélisation du comportement de séchage à l'aide de modèles de couche mince a révélé que le modèle de Midilli–Kucuk fournit le meilleur ajustement ($R^2 > 0,99$). En parallèle, la diffusivité effective de l'humidité ($Deff$) a été calculée pour chaque type de produit. Pour les feuilles de palmier, $Deff$ atteint $3,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ avec PCM contre $1,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ sans. Pour les tiges d'olivier, il est de $3,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ avec PCM et $3,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ sans, tandis que les branches d'olivier présentent respectivement $3,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ et $2,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces résultats confirment l'intérêt d'une telle configuration : elle améliore le transfert thermique, stabilise les conditions de séchage, et renforce la cinétique d'évacuation de l'humidité.

Cette étude démontre que l'intégration judicieuse d'un stockage thermique latent à base de matériaux à changement de phase dans un séchoir solaire indirect améliore significativement l'efficacité énergétique du système et la qualité du séchage, tout en restant simple, reproductible et adaptée aux besoins des régions agricoles sahariennes.

Mots clés : Séchoir solaire indirect ; Diffusivité effective de l'humidité ; Tubes carrés en V ; Matériaux à changement de phase (PCM) ; Stockage thermique ; Efficacité énergétique.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1 Généralités sur le séchage	3
▪ I.1.1 Définition	3
▪ I.1.2 Importance et intérêt de séchage	3
▪ I.1.3 Mécanisme de séchage	4
A. Teneur en eau	5
B. Activité de l'eau dans un produit	6
▪ I.1.4 Différents modes de séchage	7
a. Séchage par conduction	7
b. Séchage par convection (ou par entraînement)	7
c. Séchage par rayonnement	8
d. Séchage par micro-ondes	8
e. La lyophilisation	8
▪ I.1.5 Séchage et énergie	8
1. Séchage solaire	9
2. Histoire du séchage solaire	9
3. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire	9
4. Différent types de séchoir solaire	10
4.1 Séchoir solaire passif ou à convection naturelle	10
4.2 Séchoir solaire actif ou à convection forcée	10
4.3 Séchoir solaire direct	11
4.4 Séchoir solaires indirects	12
4.5 Séchoir solaire mixte	13
5. Facteurs principaux de séchage solaire	14
I.2 Le stockage thermique	15
▪ I.2.1 Matériaux à changement de phase	15
1. Définition	15
▪ I.2.2 Principe de fonctionnement du PCM	16
1. Le transfert thermique par chaleur sensible	16
2. Le transfert thermique par chaleur latente	17
▪ I.2.3 Propriétés des matériaux à changement de phase	17
▪ I.2.4 Classifications des MCP	18
1. MCP organique	20

• Paraffines	20
• Acide gras et Alcools	21
2. MCP inorganiques	21
• Sels hydratés	21
3. MCP eutectiques	21
4. MCP organiques et inorganiques	22
▪ 1.2.5 Applications des MCP	22
II. 1 Études antérieures sur l'intégration des MCP dans les séchoirs solaires.....	25
III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER.....	45
▪ 1.Description du prototype expérimental.....	45
▪ • Capteur solaire à air avec MCP avec tube carré en forme de V et capteur solaire sans MCP	46
▪ • L'armoire de séchage.....	47
III.1.2 Instrumentation des prototypes.....	48
▪ a.Mesure des températures.....	48
▪ b.Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de L'air ambiant.....	49
▪ c.Mesure de la Vitesse et de d'humidité de l'air de séchage.....	50
▪ d.Acquisition et traitement des données.....	50
III.2. MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER.....	51
III.3 MATERIEL VEGETAL.....	52
▪ III.3 .1 Protocole de séchage.....	54
III.4 Détermination de la teneur en eau initiale.....	55
III.5 Conception et fabrication de dispositif de stockage d'énergie thermique par matériau à changement de phase.....	56
III.6Modélisation des cinétiques de séchage.....	56
III.7 Détermination de la diffusivité effective de l'eau.....	58
Résulta et discussion.....	61
▪ IV.1 Performances thermiques des prototypes de séchoirs solaires indirect avec produits à séché.....	61
• Unité de chauffage des prototypes à tube carré en V (avec et sans stockage thermique) ...	62
▪ IV.2 Séchage des feuilles d'olive et tige d'olive et feuille de palmier dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect.....	63
Cas1 Cinétique de séchage des feuilles d'olive le 09 février 2025.....	63

Cas2 Cinétique de séchage des tiges d'olive le 09 février 2025.....	64
Cas3 Cinétique de séchage des feuilles de palmier le 09 février 2025	66
▪ IV.3 La Vitesse de séchage	66
▪ IV.4 Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince	69
▪ IV.5 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de les feuille d'olive et tiges d'olive et les feuille de palmier.....	73
Conclusion générale & Perspectives	74
Références Bibliographiques	

Liste des Tableaux

	Tableau	Page
Tableau I.1	Point de fusion et chaleur latente de fusion des paraffines	20
Tableau I.2	Propriété thermique de certains MCP.....	22
Tableau I.3	présente les avantages et les inconvénients des matériaux à changement de phase organiques et inorganiques	22
Tableau III. 1	Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces.....	56
Tableau IV.1	Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les feuilles d'olive.....	68
Tableau IV.2	Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les tiges d'olive.....	69
Tableau IV.3	Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les feuilles de palmier	70

Listes des figures

Figure I.1	Présentation schématique d'un produit humide.....	4
Figure I.2	Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau.....	7
Figure I.3	Le principe d'un échoir solaire direct.....	11
Figure I.4	Le principe d'un échoir solaire indirect.....	12
Figure I.5	Le principe d'un séchoir solaire mixte.....	13
Figure I.6	Liquéfaction et solidification du MCP.....	15
Figure I.7	Processus du changement de phase.....	16
Figure I.8	Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	17
Figure I.9	Classification des MCP proposée par Abhat.....	19
Figure I.10	Applications de MCP dans le stockage solaire.....	23
Figure II.1	Un schéma du dispositif expérimental.....	25
Figure II.2	Coupe schématique et dimensions de l'accumulateur d'énergie solaire.....	25
Figure II.3	(a) 1. Séchoir tunnel ;2. Échangeur de chaleur à calandre et tubes pour le stockage d'énergie ; 3. Chauffe-air solaire ; 4. Souffleur d'air ; 5. Vanne à bille ; 6. Pyranomètre ; 7. Thermocouple ; 8. Débitmètre ; 9. Compteur d'énergie ; 10. Système d'acquisition de données	26
Figure II.4	(a) Schéma d'agencement du séchoir solaire, (b) vue en coupe du capteur solaire à air, (c) photographie du système de séchage.....	26
Figure II.5	La présentation du séchoir solaire et des réservoirs de stockage d'énergie thermique.....	27
Figure II.6	a) Vue d'ensemble du contenant de PCM b) Vue 2D des tubes Concentriques en cuivre et en plastique.....	28
Figure II.7	a) Montage expérimentale avec capteur solaire plan b) Emplacement des capteurs.....	28
Figure II.8	(A) Schéma du dispositif expérimental (B) Configuration expérimentale avec divers instruments et dispositions de tranches de margose séchage solaire indirect.....	29
Figure II.9	Termes de transfert de chaleur impliqués dans le modèle.....	29
Figure II.10	Prototype du séchoir solaire indirect (ISD) et schéma du ISD.....	30

Figure II.11 (a) Photographie des unités de séchage solaire et des capteurs solaires, (b) intérieur de la chambre de séchage.....	30
Figure II .12 (A) (a) Schéma du montage expérimental. (b) Montage expérimental (B) Schéma de la chambre de séchage avec les plateaux et le conteneur de PCM dans l'unité de séchage.....	31
Figure II.13 Séchoir solaire expérimenté (a) Installation Complète (b) Intérieur de la chambre de séchage.....	31
Figure II.14 (a) Dispositif expérimental avec vues en coupe du capteur solaire et de la chambre de séchage et (b) Représentation schématique du plan d'expérimentation.....	32
Figure II.15 Séchoir solaire de type mixte (a) Schéma de la convection naturel (b) Schéma de la convection forcée (c) Vue illustrée de la convection forcée.....	33
Figure II.16 Principe de fonctionnement des séchoirs solaires de type direct.....	33
Figure II.17 Fonctionnement d'un séchoir solaire de type indirect.....	34
Figure II.18 Schéma d'agencement du séchage solaire sans dessiccant.....	34
Figure II.19 (a) Module à matériau à changement de phase (PCM) (b) Agencement du module PCM dans le capteur solaire.....	35
Figure II.20 Schéma du système étudié.....	35
Figure II.21 Processus de charge et de décharge du matériau à changement de phase (PCM).....	36
Figure II.22 Vue générale de l'installation expérimentale.....	36
Figure II.23 Principales parties et dimensions du capteur solaire.....	37
Figure II.24 Schéma du design proposé.....	37
Figure II.25 Vue expérimentale du SAH actuel.....	38
Figure II.26 (A) (a) Schéma du séchoir solaire indirect conventionnel (vue de dessus) (b) Modifications apportées au séchoir solaire selon les cas étudiés(B) Séchoir solaire indirect à convection forcée traditionnel commercial.....	38
Figure II.27 Organigramme de la solution numérique.....	39
Figure II.28 Schéma des séchoirs solaires avec stockage thermique (A) dans la chambre de séchage et (B) dans le système de collecte d'énergie.....	39
Figure II.29 Dispositif expérimental ; (a), (b) Capteur solaire, (c) Chambre de séchage, (d) Cheminées, (e) Montage expérimental.....	40

Figure II.30 (A) Installation expérimentale pendant l'expérience (B)Tranches de banane placées sur des plateaux.....	40
Figure II.31 schémas du montage expérimental.....	41
Figure II.32 (A) Séchoir solaire indirect à double passage avec deux types de matériaux à changement de phase (PCM) (B)Séchoir solaire modifié avec PCM placé à l'intérieur du capteur et de la chambre.....	42
Figure II.33 (a). Photographie du montage expérimental pour le séchage du Curcuma Amada. (b). Schéma du montage expérimental.....	42
Figure II.34 Séchoirs solaires expérimentaux.....	43
Figure II.35 Fabrication des boîtes de PCM.....	43
Figure II.36 Schéma du séchoir solaire.....	44
Figure III. 1 Schémas techniques des composants du capteur.....	45
Figure III.2 dimensionnements des capteurs solaires à air avec tubes carrés en fer de type - V.....	46
Figure III.3 capteur solaire à air avec tubes carrés en fer de type -V.....	46
Figure III.4 le prototype utilisé pour le séchage des feuilles et tiges d'olive et feuilles de palmier Celui de gauche est sans stockage (MCP) et celui de droite avec MCP.....	47
Figure III.5 Photographies d'armoires de séchage.....	47
Figure III.6 Position des thermocouples dans l'insolateur avec tubes carrés en forme V (avec et sans MCP)	48
Figure III.7 Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, température et d'humidité relative de l'air ambiant.....	49
Figure III.8 Anémomètre Testo 440 + thermo-hygromètre Testo 610.....	50
Figure III.9 Photographie de système d'acquisition et de traitement des données.....	50
Figure III.10 Photographies du l'Étuve utilisé pour déterminer la teneur en matière sèche.....	51
Figure III.11 Photographies de dessiccateur. Utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale.....	51
Figure III.12 Balance KERN PCB 3500-2 3500g/.....	52
Figure III.13 Les feuilles d'olive	53
Figure III.14 les tiges d'olive.....	53

Figure III.15 Les feuilles de palmier.....	54
Figure III.16 Schéma représentant le protocole de séchage de feuilles d'olive et des tiges d'olive et feuilles des palmier.....	55
FigureIV.1 Évolutions de la température à la sortie des séchoirs solaire indirect avec et sans stockage et ambiant et rayonnement solaire global en fonction du temps (09-13/02/2025)	62
FigureIV.2 Évolutions de la température à la sortie des séchoirs solaire indirect avec et sans stockage et ambiant et rayonnement solaire global en fonction du temps (10-11/02/2025)	62
Figure IV.3 Évolutions de la teneur en eau base sèche des feuilles d'olive en fonction du temps.....	63
Figure IV.4 Évolution de la teneur en eau base sèche des tiges d'olive en fonction du temps.....	65
Figure IV.5 Évolution de la teneur en eau base sèche des feuilles de palmier en fonction du temps.....	65
Figure. IV.6 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour les feuilles d'olive pour les deux séchoirs avec stockage et sans stockage.....	67
Figure. IV.7 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour les tiges d'olive pour les deux séchoirs avec stockage et sans stockage.....	67
Figure. IV.8 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour les feuilles de palmier pour les deux séchoirs avec stockage et sans stockage.....	68
Figure IV.9 Évolution de la Diffusivité effective de Léau des feuilles d'olive pour les deux séchoirs avec et sans stockage.....	73
Figure IV.10 Évolution de la Diffusivité effective de Léau des tiges d'olive pour les deux séchoirs avec et sans stockage.....	73
Figure IV.11 Évolution de la Diffusivité effective de Léau des feuilles des palmier pour les deux séchoirs avec et sans stockage.....	74

NOMENCLATURE

A_c	surface de captation de l'insolateur plan à air	m^2
A_w	activité en eau	-
Cp_b	Chaleur massique du bois, $Cp_b = 2300$	J/kg.K
Cp	Chaleur massique de l'air libre, $Cp = 1005$	J/kg.K
M	Teneur en eau (base sèche)	kg eau/kg MS
Mh	Teneur en eau (base humide)	kg eau/kg Mh
Pvp	pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	(Pa)
Pvs	pression partielle de vapeur saturante	(Pa)
H	enthalpies du matériau	J
D_{eff}	la diffusivité effective	m^2/s
HR =MR	humidité relative de l'air	(%)
m(initiale)	masse de l'échantillon avant mise à l'étuve	g
m(finale)	masse de l'échantillon après mise à l'étuve	g
W	tenure en humidité absolue de l'air	kg vap a/kg as
W	humidité absolue du produit à l'instant t à base humide	kg eau/kg Mh
Mt	humidité absolue du produit à l'instant t à base sèche	kg eau/kg MS
Me	humidité absolue du produit initiale à base sèche	kg eau/kg MS
MR_{eq}	humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche	kg eau/kg MS
X	Humidité Absolue de L'air	kg eau/kg air sec

Lettre grecques

$MR_{pré}$ la teneur en eau issue de prédite

MR_{exp} la teneur en eau issue de l'expérience

$RMSE$ la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

χ^2 khicarré réduit

R^2 coefficient de corrélation

N nombre d'observations

n nombre de constantes du modèle

t le temps s

L la demi d'épaisseur de la tranche

Introduction générale

Introduction générale

En Algérie, comme dans de nombreux pays en développement, la question de la conservation des produits agricoles reste une préoccupation constante, en particulier pour les fruits et légumes qui constituent une part importante de la production locale. Ces produits sont souvent récoltés en grande quantité sur de courtes périodes, mais en raison de leur forte teneur en humidité, ils sont très sensibles à la détérioration. Faute de solutions de conservation adaptées, une partie significative de cette production est perdue, parfois avant même d'atteindre le marché.[1]

Parmi les différentes techniques de conservation, le séchage est l'une des plus anciennes et des plus largement utilisées pour prolonger la durée de vie des denrées alimentaires. Dans les zones rurales, le séchage solaire reste la méthode privilégiée, car elle est à la fois économique et facile à mettre en œuvre. Toutefois, le séchage à l'air libre présente de nombreux inconvénients : exposition aux poussières, aux insectes, aux intempéries, et surtout, absence de contrôle sur les paramètres clés tels que la température et la vitesse de l'air. Ces limitations ont conduit au développement de systèmes de séchage solaire plus performants, notamment les séchoirs solaires indirects [2].

Cependant, ces systèmes présentent eux aussi une limite importante : leur performance dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire, qui varie selon les conditions météorologiques et le moment de la journée. En cas de ciel couvert ou à la tombée de la nuit, la température dans le système chute rapidement, ce qui diminue l'efficacité du séchage et prolonge sa durée. Pour pallier cette intermittence, il est nécessaire d'intégrer des solutions permettant le stockage de l'énergie thermique produite en excès durant les périodes ensoleillées, afin de la restituer lorsque le rayonnement solaire devient insuffisant.

Dans ce contexte, les matériaux à changement de phase (MCP) apparaissent comme une solution technologique prometteuse. Ces matériaux, capables d'emmagasiner une grande quantité de chaleur sous forme de chaleur latente lors de leur fusion, puis de la restituer lors de leur solidification, permettent de stabiliser la température à l'intérieur du séchoir sur de longues périodes.

Le travail présenté dans ce mémoire va au-delà du simple ajout d'un MCP dans un système de séchage solaire. Il propose une conception originale dans laquelle des tubes métalliques à section carrée sont disposés en forme de V au sein du capteur solaire à air, plus précisément

dans la veine d'air dynamique située entre l'absorbeur et l'isolant. Ces tubes remplissent une double fonction :

- ✓ Amélioration de l'échange thermique, en augmentant la surface de contact avec l'air chaud et en favorisant son guidage à travers le canal ;
- ✓ Stockage de chaleur latente, lorsqu'ils sont remplis de paraffine (un MCP bien connu), assurant une restitution progressive de la chaleur lorsque l'ensoleillement diminue.

Objectif général

L'objectif général de cette recherche est d'évaluer, par le biais d'essais expérimentaux, l'apport réel d'un système hybride intégrant un stockage thermique par matériau à changement de phase (MCP), en comparaison avec un système identique ne disposant pas de stockage, mais partageant la même configuration géométrique. Dans ces deux configurations, des obstacles constitués de tubes en fer à section carrée, disposés en forme de V perpendiculairement à l'écoulement de l'air dans la veine dynamique située entre l'absorbeur et l'isolant du capteur solaire à air, sont utilisés.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- ✓ Concevoir et réaliser deux prototypes identiques de séchoir solaire indirect, intégrant des tubes métalliques en V:
 - dans le premier prototype, ces tubes sont remplis de paraffine, un matériau à changement de phase, afin d'assurer un stockage thermique latent ;
 - dans le second prototype, les tubes sont laissés vides, sans incorporation de matériau de stockage.
- ✓ Comparer les performances thermiques et de séchage des deux systèmes, en surveillant notamment les températures internes, la vitesse de séchage, la teneur en humidité des produits et la diffusivité effective.
- ✓ Ajuster les données expérimentales à différents modèles mathématiques de séchage, afin d'analyser la cinétique du processus.
- ✓ Évaluer l'impact du stockage thermique par MCP sur la régularité du séchage, l'efficacité énergétique et la qualité du produit final, tout en conservant une géométrie identique entre les deux configurations.

Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, organisés comme suit :

- ✓ Chapitre I : Généralités sur le séchage, le stockage thermique et les matériaux à changement de phase (MCP) : Ce chapitre présente les notions fondamentales liées au séchage des produits agricoles, aux techniques de stockage thermique, ainsi qu'aux caractéristiques des MCP utilisés dans ce domaine.
- ✓ Chapitre II : Synthèse bibliographique : Ce chapitre regroupe un ensemble d'études récentes portant sur les séchoirs solaires, les systèmes hybrides avec stockage thermique, ainsi que l'intégration des MCP dans les procédés de séchage.
- ✓ Chapitre III : Matériel, méthode expérimentale et modélisation : Ce chapitre décrit en détail la conception des prototypes, les conditions expérimentales, les méthodes de mesure, ainsi que les modèles mathématiques utilisés pour analyser la cinétique de séchage.
- ✓ Chapitre IV : Résultats et discussion : Ce dernier chapitre expose et interprète les résultats expérimentaux obtenus, en comparant les performances des deux systèmes étudiés, et en évaluant l'impact du stockage thermique par MCP sur le processus de séchage.

CHAPITRE I

Généralité sur le séchage et le stockage
thermique et les matériaux à
changement de phase

1 Généralités sur le séchage

I.1.1 Définition

Le séchage est une technique de préservation des produits alimentaires, qui intervient dans un grand nombre de procédés de fabrication. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (Chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation. Il existe plusieurs procédés de séchage : les procédés mécaniques (presse, décantation ou centrifugation), les procédés physico-chimiques (adsorption, absorption, réfrigération et séchage par évaporation). Ce dernier consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse qui le baigne. Le changement de phase exige un apport de chaleur assez considérable. Il peut être direct (chauffage par échangeur, par effet joule, par radiations infrarouges ou par courants de haute fréquence) ou bien c'est la phase gazeuse elle-même qui assure l'apport de chaleur nécessaire (air chaud). Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert ; dont le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second s'agit d'un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires [3].

I.1.2 Importance et intérêt de séchage

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures et bactéries) responsables du pourrissement. C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet

- ✓ d'améliorer la conservation des produits.
- ✓ De faciliter leur transport.
- ✓ De réduire les risques de pertes de produits après récolte.
- ✓ d'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année [3].

I.1.3 Mécanisme de séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage

1. Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
2. Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la Figure. I.1. Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles [4].

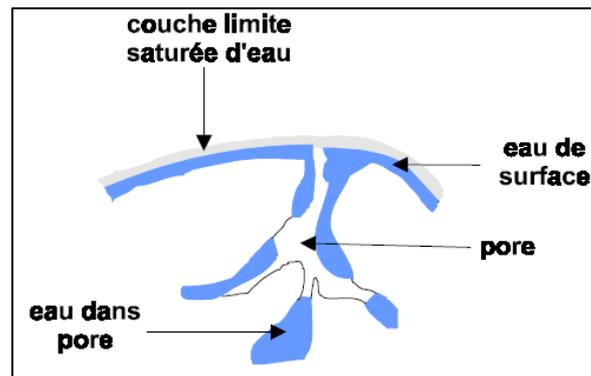


Figure I.1 Présentation schématique d'un produit humide[4].

Au contact de l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit va être évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le produit. L'eau osmotique va migrer à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cette périphérie séchée par différence de pression osmotique. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers [4].

L'eau liquide sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le produit rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage. Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux

- ✓ L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau ;
- ✓ La capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté
- ✓ La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir sécher suffisamment rapidement (pour éviter le pourrissement du produit) mais pas trop vite (une croûte risque alors de se former en surface) à trop haute température (le produit se dénature, noircit) [4].

A. Teneur en eau

L'évolution au cours du séchage de la teneur en eau d'un produit peut être caractérisée par sa teneur en eau exprimée en base sèche (M) ou en base humide (Mh).

Teneur en eau (base sèche), elle est définie par

$$M = \frac{me}{ms} \quad (\text{EqI.01})$$

Exprimée en kg d'eau/kg de matière sèche.

Teneur en eau (base humide)

$$Mh = \frac{me}{m} \quad (\text{EqI.02})$$

Mh exprimée en kg d'eau/kg de produit.

B. Activité de l'eau dans un produit

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau A_w est identique à l'humidité relative d'équilibre ($A_w = HRE$). Elle est définie comme suit

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (\text{EqI.03})$$

Avec

P_{vp} pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

P_{vs} pression partielle de vapeur saturante (Pa)

HR humidité relative de l'air (%).

L'activité de l'eau (A_w) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique.

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique. (Figure I.2) illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des denrées alimentaires. Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit [5]

Pour $A_w < 0,9$ la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ;

Pour $A_w < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives ;

Pour $A_w < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée ;

Pour $0,8 < A_w < 0,7$, les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_w comprises entre 0,25 et 0,35 [6].

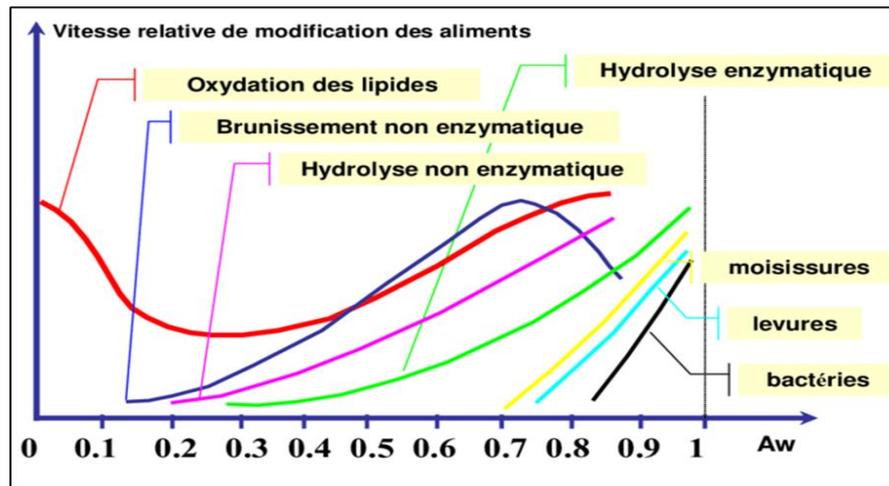


Figure I.2 Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau[5].

I.1.4 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur

a. Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.

b. Séchage par convection (ou par entrainement)

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

c. Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces (500 μm). La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures et des pellicules photographiques.

d. Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

e. La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur [4].

I.1.5 Séchage et énergie

A Fin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie. Globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie Industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés dans une démarche économique mais aussi écologique. Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres, alors lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre". Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure et lui suffit d'environ 2250 kJ/kg pour la vaporiser. Par contre lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée" et l'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie [7].

1. Séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

Les différents modes de séchage cités ci-dessus, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle mondiale. De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement [4].

2. Histoire du séchage solaire

Le séchage par l'exposition au soleil est l'une des plus anciennes méthodes utilisant l'énergie solaire, pour la conservation des aliments, comme les légumes, les fruits, le poisson, la viande, etc. Depuis les temps préhistoriques, l'humanité a utilisé le rayonnement solaire comme la seule source d'énergie thermique disponible pour sécher et conserver toutes les denrées alimentaires nécessaires pour l'hiver, pour sécher les briques du sol pour leurs maisons et peaux d'animaux pour le dressage [8].

3. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire

Une étude du climat Algérien a été effectuée par H. Rebour et A. Hauville (1954), Permet de visualiser les vocations climatiques et les zones les plus favorables au Séchage solaire Naturelles des principaux fruits. Selon cette étude, la variabilité des Conditions climatiques permet de limiter les différentes zones et leurs aptitudes au Séchage de raisin[9]

- **Zone du littorale**

C'est pratiquement impropre au séchage solaire du raisin en raison des faibles Contrariants hybrides.

- **Zone du tell**

Le séchage solaire du raisin devient possible, l'humidité nocturne et matinale est très gênante et nécessite des précautions spéciales pour soustraire les fruits à la réhydratation.

- **Zone des steppes**

Une région qui est propice au séchage solaire du raisin en raison des contraintes hybrides élevées.

- **Zone saharienne**

Le séchage solaire du raisin peut s'effectuer dans les meilleures conditions en raison des contraintes hybrides enlevées. Le séchage se poursuit même la nuit. H. Rebour et A. Hauville, (1954), ont conclu que la région de Laghouat, située entre le Sahara et les steppes, présente les mêmes conditions que celles de Fresno (en Californie) où se situe le plus grand centre mondial de séchage solaire des fruits.

4. Différents types de séchoir solaire

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories

4.1 Séchoir solaire passif ou à convection naturelle

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air, jouant le rôle de fluide caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seule assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

4.2 Séchoir solaire actif ou à convection forcée

La circulation de l'air asséchant est forcée par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement, la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du processus du séchage. Cette classe de séchoir

solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacué en vitesse et d'une façon continue. Néanmoins, ce type de séchoir a pour inconvénients le coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, et la nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur.

4.3 Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de capteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

Néanmoins l'interaction directe rayonnement solaire produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments[10].

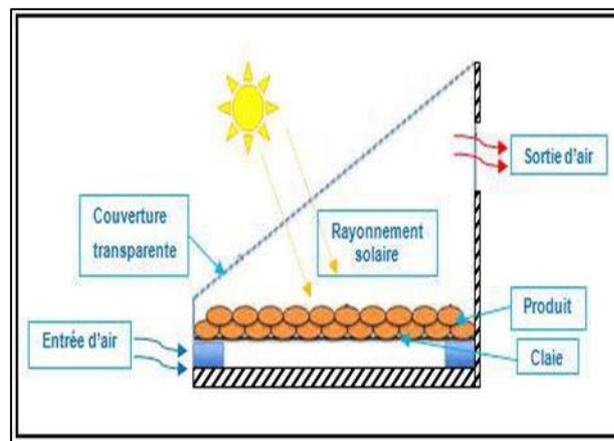


Figure I.3 Le principe d'un séchoir solaire direct [4]

4.4 Séchoir solaires indirects

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (Figure I.4). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage [4].

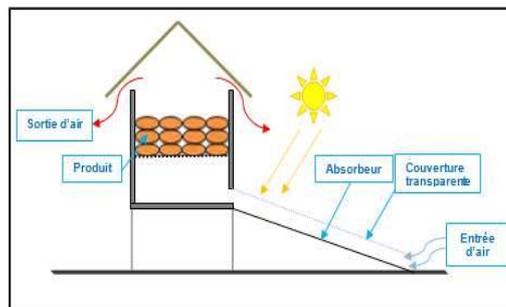


Figure I.4 Le principe d'un séchoir solaire indirect [2].

Les séchoirs solaires indirects présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive, etc.). Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires [4].

- **Avantage**

- ✓ Meilleure qualité du produit car il obtient les températures requises.
- ✓ Meilleur contrôle du séchage et meilleure qualité du produit que le séchage au soleil.
- ✓ Absorption d'humidité plus élevée par kg d'air sec.
- ✓ Rétention de la couleur du produit car il n'est pas exposé aux rayons ultraviolets.
- ✓ Meilleures performances que les autres types de séchoirs conventionnels.
- ✓ Absence de dommages causés par la chaleur aux cultures.

✓ Particulièrement recommandé pour les matériaux photosensibles tel que citron, concombre, papaye, etc.

✓ Plus grande efficacité que le séchage solaire direct.

- **Inconvénients**

✓ L'intensité du rayonnement solaire varie dans le temps ; un stockage thermique est nécessaire ainsi qu'une source d'énergie auxiliaire pendant les jours nuageux et le soir.

✓ Le rayonnement solaire a une faible densité d'énergie et, par conséquent, une grande surface est nécessaire pour le collecteur.

✓ Investissement initial et coûts énergétiques élevés.

4.5 Séchoir solaire mixte

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires directes sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents (Figure I.5) [4].

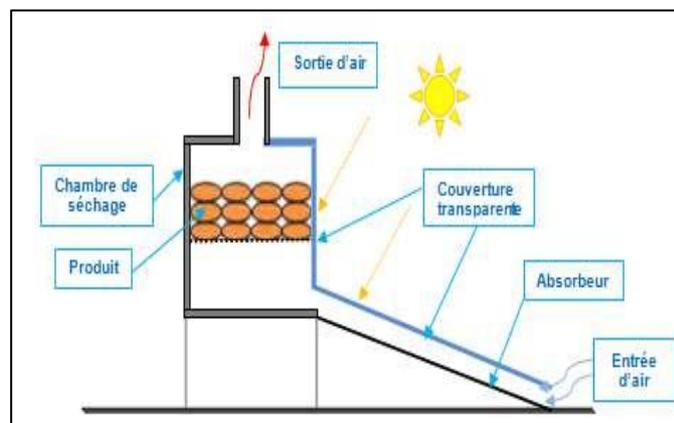


Figure I.5 Le principe d'un séchoir solaire mixte [2]

5. Facteurs principaux de séchage solaire

Les systèmes de séchage solaire se divisent en deux modèles, de type directs et indirects. Aussi, ces systèmes peuvent être actifs ou passifs. Il y a trois facteurs principaux qui affectent le séchage de la nourriture : la température, le débit et l'humidité de l'air et ils sont dépendants. Il y a une diversité d'opinion sur les températures idéales de séchage, mais tous les avis examinés s'accordent sur des températures de séchage entre 35 et 82 °C et de 43.5 à 60 °C sont les plus communes.

❖ Le débit de l'air

En convection naturelle, est proportionnelle à la surface de l'ouverture d'échappement, à la taille du capteur (de l'entrée de l'air à la sortie de l'air) et à la température de la plaque absorbante. Cependant le débit de l'air est également inversement proportionnel à la température dans un séchoir solaire.

Dans le meilleur des cas, le but recherché est d'avoir les deux à la fois

La température et le débit de l'air élevés. Ceci peut être difficile à réaliser dans un séchoir solaire.

❖ La vitesse de l'air

Dans un capteur à convection naturelle est affectée par la distance entre l'entrée et la sortie de l'air, la température à l'intérieur du séchoir et la section d'échappement de l'air. Plus la longueur, la température et la section d'échappement sont grandes, plus la vitesse est grande.

❖ L'humidité relative

C'est le troisième facteur affectant le séchage solaire de la nourriture. Plus l'humidité relative est haute, plus le séchage est lent. Chaque augmentation de 15 °C de la température double la capacité de l'air à absorber de l'humidité. Dans les régions humides, le séchage prend plus de temps que dans les régions sèches. La température obtenue dans un séchoir sera affectée par plusieurs facteurs : la surface de la couverture transparente orientée vers le soleil, l'isolation, l'étanchéité à l'air, la surface du passage d'échappement, et de la température ambiante. La surface de la couverture transparente orientée vers le soleil est une décision importante de conception [10].

I.2 Le stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes

- La chaleur sensible stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent

L'énergie à mesure qu'ils changent de phase.

- La chaleur des réactions thermochimie et absorption [8].

I.2.1 Matériaux à changement de phase

1. Définition

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer l'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omni présentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [11].

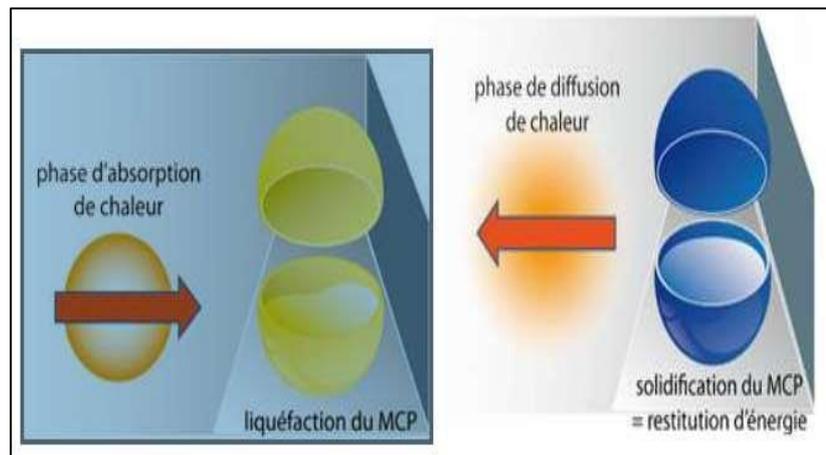


Figure I.6 Liquéfaction et solidification du MCP[11]

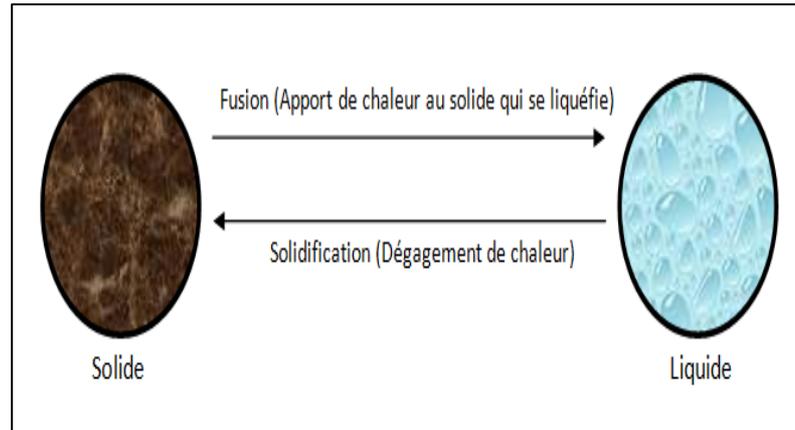


Figure I.7 Processus du changement de phase [12]

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latente de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigées pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide liquide. Les changements solides-solides de phase sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation. Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des types de changement de phase [11].

I.2.2 Principe de fonctionnement du PCM

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue deux types de transfert de chaleur (ou transfert thermique) [13].

1. Le transfert thermique par chaleur sensible

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stoker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CS échangée par un matériau est la chaleur massique, notée C_p et Exprimée en $J/(kg \cdot K)$.

2. Le transfert thermique par chaleur latente

Dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la chaleur latente de changement de phase notée L_f (f pour fusion) pour un changement de phase liquide/solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase liquide/vapeur. Celle-ci est exprimée en J/kg.

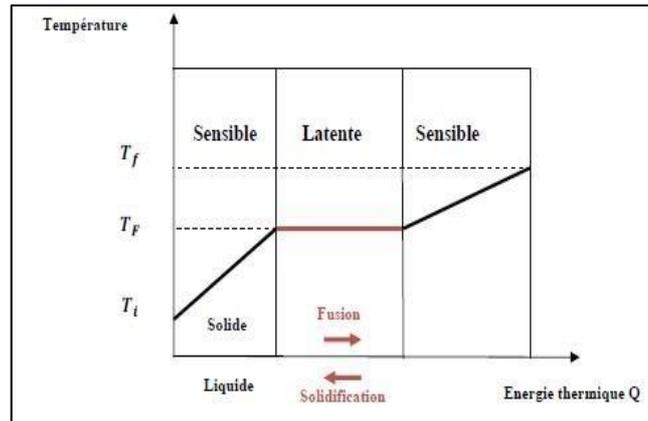


Figure I.8 Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [13]

I.2.3 Propriétés des matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux de stockage de chaleur « latente ». Le transfert d'énergie thermique se produit quand le matériau change son état physique de l'état solide à l'état liquide, ou liquide à solide. On appelle cela un changement d'état, ou "Phase". Les MCP absorbent et libèrent de la chaleur à une température presque constante. Ils stockent 514 fois plus de chaleur par unité de volume que les matériaux de stockage sensibles tels que l'eau[13].

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères.

A. Critères thermiques

Le matériau à changement de phase doit avoir

Température de fusion dans la gamme de température souhaitée.

- ❖ Une chaleur latente élevée
- ❖ Une chaleur spécifique élevée
- ❖ Une conductivité thermique élevée pour faciliterait la charge et la décharge de l'énergie thermique.

B. Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

C. Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer

- ❖ Une stabilité critique ;
- ❖ Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable ;
- ❖ Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant
- ❖ Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif [13].

D. Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être

- ❖ Disponible en grande quantité
- ❖ Bon marché [13].

I.2.4 Classifications des MCP

Dans l'année 1983, Abhat a donné une classification détaillée sur les substances Utilisées pour le stockage de l'énergie thermique. (Figure I.9) présente cette classification. Cette figure montre

que les MCP solide-liquide sont principalement divisés en deux Catégories les matériaux organiques qui sont composés principalement d'acides gras et de Paraffines ainsi que les matériaux inorganiques composés principalement d'hydrates de sel. Chaque groupe possède ses propres intervalles de température de fusion et de chaleur Latente qui dépendent des effets moléculaires, en termes de liaison chimique [14].

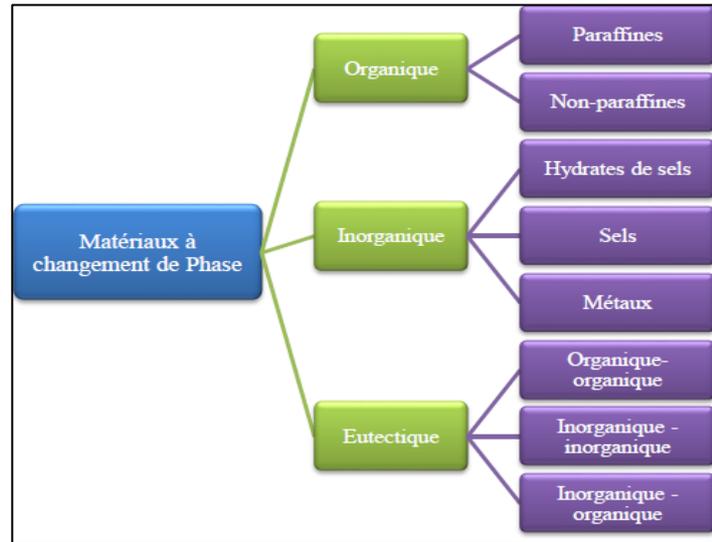


Figure I.9 Classification des MCP proposée par Abhat [14]

Les matériaux organiques ont une température de fusion comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés dans le domaine du stockage de la chaleur sont principalement à base de paraffine, d'acides gras et d'alcools. Ils présentent de nombreux avantages tels que leurs disponibilités dans une large gamme de températures et leurs stabilités chimiques. Ils ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. En outre, ils sont généralement non réactifs et recyclables. Leurs principaux inconvénients sont leur faibles conductivités et chaleur latente de fusion et ils sont inflammables. Les mcp organiques comportent deux types paraffines et non paraffines[12].

1. MCP organique

• Paraffines

La paraffine est un mélange d'alcane $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$. Le point de fusion et la chaleur latente de fusion de ce MCP augmentent avec la longueur de la chaîne (CH_3)-. La paraffine est un matériau peu coûteux, non corrosif et peu inflammable. Cependant, il ne peut pas être stocké dans un réservoir en plastique [15].

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, Aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variable, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application [8].

Tableau I.1 Point de fusion et chaleur latente de fusion des paraffines [8]

Name	No. of "C" Atoms	Melting Point (°C)	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/mK)	Latent Heat (kJ/kg)
n - Dodecane	12	-12	750	0.21 ^S	n.a.
n - Tridecane	13	-6	756		n.a.
n - Tetradecane	14	4.5-5.6	771		231
n - Pentadecane	15	10	768	0.17	207
n - Hexadecane	16	18.2	774	0.21 ^S	238
n - Heptadecane	17	22	778		215
n - Octadecane	18	28.2	814 ^S [14], 775 ^L [14]	0.35 ^S [14], 0.149 ^L [14]	245
n - Nonadecane	19	31.9	912 ^S , 769 ^L	0.21 ^S	222
n - Eicosane	20	37			247
n - Heneicosane	21	41			215
n - Docosane	22	44			249
n - Tricosane	23	47			234
n - Tetracosane	24	51			255
n - Pentacosane	25	54			238
Paraffin wax	n.a.	32	785 ^S [15], 749 ^L [15]	0.514 ^S [15], 0.224 ^L [15]	251[15]
n - Hexacosane	26	56	770	0.21 ^S	257
n - Heptacosane	27	59	773		236
n - Octacosane	28	61	910 ^S , 765 ^L		255
n - Nonacosane	29	64			240
n - Triacontane	30	65			252
n - Hentriacontane	31	n.a.	930 ^S , 830 ^L		n.a.
n - Dotriacontane	32	70			n.a.
n - Tritriacontane	33	71			189

- **Acide gras et Alcools**

La chaleur latente de fusion de ces produits est élevée, leur inflammabilité et leur conductivité thermique sont faibles. Leur niveau de toxicité est variable et ils sont instables à haute température. L'inconvénient majeur est leur coût, qui est de 2 à 2,5 fois supérieur à celui de la paraffine et ils sont peu corrosifs.

2. MCP inorganiques

La température de fusion de ces matériaux est comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont beaucoup d'avantages ils ont une chaleur latente de fusion importante, une conductivité thermique élevée, ne sont pas inflammables et ont un coût abordable. Parmi leurs inconvénients, citons la corrosion, la ségrégation et la surfusion [12].

- **Sels hydratés**

La formule générale d'un sel hydraté est sous la forme de $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (AB =formule du sel anhydre, n = nombre de molécule d'eau). Beaucoup de sels hydratés ont été utilisés comme matériaux à changement de phase. Les sels hydratés ont une chaleur latente de fusion par unité de volume et une conductivité thermique élevées. En outre, leur volume pendant la phase de transition est faible. Ils ne sont pas très corrosifs et sont compatibles avec le plastique. Le sel hydraté le plus utilisé est le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [12].

3. MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont composés de plusieurs mcp purs, en générale, de mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique). Ils ont deux principaux avantages leur point de fusion sont similaires à celui d'une substance pure et leurs chaleurs latentes de fusion sont supérieures à celle des composés organiques purs. Cependant, ils sont peu utilisés dans le domaine industriel et il y a peu de données sur leurs propriétés thermiques [12].

Tableau I.2 Propriété thermique de certains MCP [12].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCMs	Eau	0	333.6
Organiques	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCMs	KF.4H ₂ O	18.5	231
Inorganiques	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
PCMs	66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3%MgCl ₂ .6H ₂ O	25	127
Eutectiques	48%CaCl ₂ +4,3% NaCl+47,3%H ₂ O	26,8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53%Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

4. MCP organiques et inorganiques

Tableau I.3 présente les avantages et les inconvénients des matériaux à changement de phase organiques et inorganiques [12].

	Avantages	Inconvénients
MCP organiques	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de corrosion • Stabilité chimique et thermique • Surfusion négligeable • Recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible conductivité thermique • Inflammabilité • Coût élevé
MCP inorganique	<ul style="list-style-type: none"> • Conductivité thermique élevée • Non inflammabilité • Faible coût • Chaleur latente de fusion élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Ségrégation de phase • Surfusion • Corrosivité • Manque De stabilité • Thermique

I.2.5 Applications des MCP

A) Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent

principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [14].

B) Le stockage de l'énergie thermique

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide), etc. Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C.

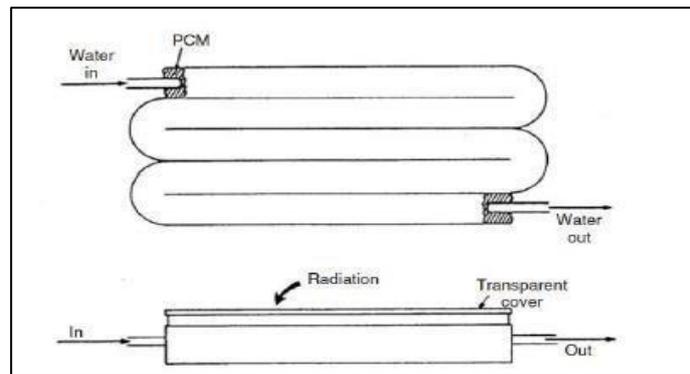


Figure I.10 Applications de MCP dans le stockage solaire

C) Applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang. Récipients usagés pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussins chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [16].

CHAPITRE II

Synthèse bibliographique

Ce chapitre a présente un ensemble d'études bibliographiques récentes qui se sont intéressées à l'optimisation des performances des séchoirs solaires indirects par l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP). En tant que solution de stockage thermique, ces travaux ont permis de mieux cerner l'influence des conditions climatiques, de la configuration du système thermique et du choix des matériaux sur l'efficacité énergétique et la qualité du séchage.

II. 1 Études antérieures sur l'intégration des MCP dans les séchoirs solaires

El Khadraoui et al. 2017 ont conçu, fabriqué et testé expérimentalement. Le système comprend un capteur solaire à air, un accumulateur d'énergie solaire avec cavité PCM, et une chambre de séchage. Des essais à vide ont été réalisés avec et sans PCM pour évaluer la faisabilité du stockage de l'énergie solaire le jour et sa restitution la nuit. L'unité de stockage a atteint un rendement énergétique journalier de 33,9 % et un rendement exergetique de 8,5 %. La température de la chambre de séchage est restée supérieure à celle de l'ambiance de 4 à 16 °C durant toute la nuit, avec une humidité relative inférieure de 17 à 34,5 % [17].

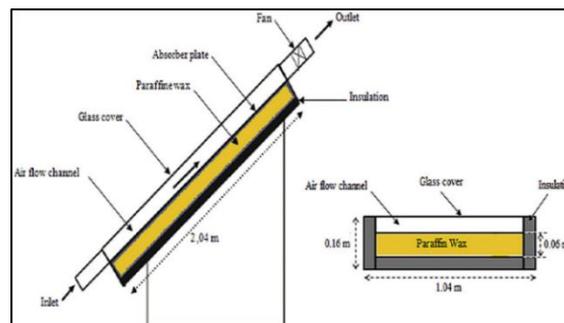


Figure II.1 Un schéma du dispositif expérimental[17].

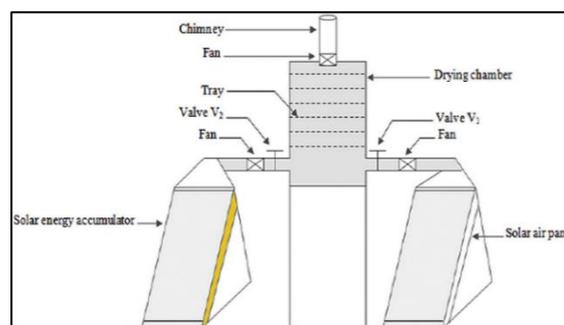


Figure II.2 Coupe schématique et dimensions de l'accumulateur d'énergie solaire [17].

Rabha et Muthukumar 2017 ont porté sur un séchoir solaire à convection forcée intégré à un système de stockage à chaleur latente de type « shell and tube » utilisant de la cire de paraffine. Le séchage de 20 kg de piments rouges a permis de réduire l'humidité de 73,5 % à 9,7 % en 4 jours, avec une température de séchage entre 36 et 60 °C. Les rendements énergétiques et exergetiques des capteurs solaires ont atteint respectivement 32,4 % et 0,9 % pour le premier, et 14,1 % et 0,8 % pour le second. Le stockage thermique a affiché jusqu'à 49,8 % d'efficacité énergétique. L'efficacité moyenne de la chambre de séchage a été de 52,2 % [18].

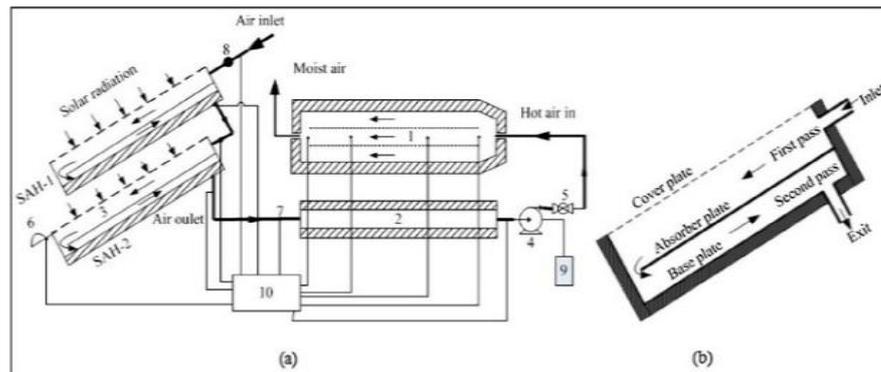


Figure II.3 (a) 1. Séchoir tunnel ; 2. Échangeur de chaleur à calandre et tubes pour le stockage d'énergie ; 3. Chauffe-air solaire ; 4. Souffleur d'air ; 5. Vanne à bille ; 6. Pyranomètre ; 7. Thermocouple ; 8. Débitmètre ; 9. Compteur d'énergie ; 10. Système d'acquisition de données[18].

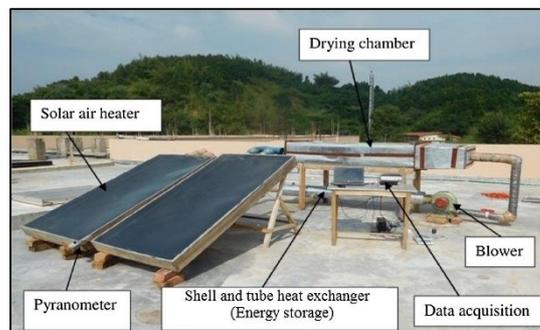


Figure II.4 (a) Schéma d'agencement du séchoir solaire, (b) vue en coupe du capteur solaire à air, (c) photographie du système de séchage[18].

Mojarrad et al. 2017 ont analysé un séchoir solaire à plateaux à convection forcée indirecte utilisant de la cire de paraffine comme stockage d'énergie. Un modèle énergétique a été établi pour étudier l'impact de la vitesse de l'air et de la surface du capteur. Des essais à 1 Et 3 m/s ont été menés avec un capteur de 2 m², avec et sans stockage. L'ajout du PCM a amélioré l'efficacité de 37 % et réduit l'humidité finale. Une faible vitesse d'air et une grande surface de captation ont donné de meilleurs résultats. Les données expérimentales ont montré une corrélation de 96,27 % avec les simulations [19].



Figure II.5 La présentation du séchoir solaire et des réservoirs de stockage d'énergie thermique [19]

Yadav et al. 2018 ont analysé numériquement un dispositif de stockage thermique à chaleur latente utilisant de la cire de paraffine comme PCM pour le séchage solaire indirect de produits agricoles. Le système comprenait des tubes concentriques un tube en cuivre pour l'air chaud et un tube en plastique contenant le PCM. Des simulations CFD en 2D ont été réalisées avec ANSYS Fluent 2015. Le séchage a pu être maintenu jusqu'à 22h sans apport de chaleur supplémentaire. La fusion et la solidification du PCM ont été influencées par la vitesse de l'air. Une vitesse de 1 m/s a permis de conserver une température de sortie stable plus longtemps [20].

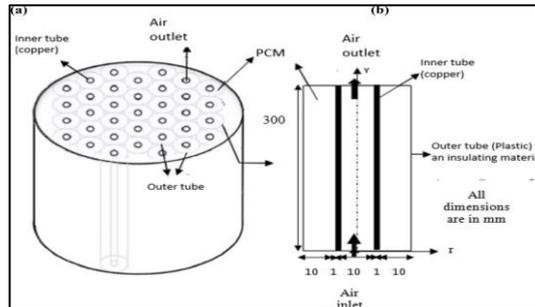


Figure II.6 a) Vue d'ensemble du contenant de PCM b) Vue 2D des tubes Concentriques en cuivre et en plastique[20].

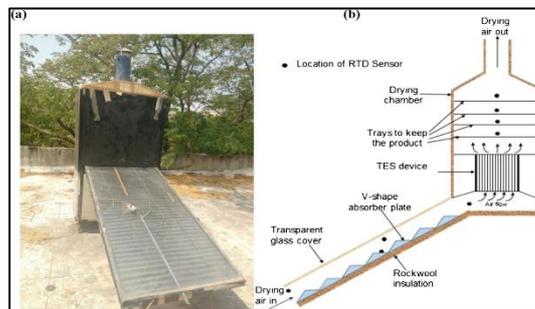


Figure II.7 a) Montage expérimentale avec capteur solaire plan b) Emplacement des capteurs [20].

Vijayan et al. 2020 ont étudié un séchoir solaire indirect à convection forcée, conçu à faible coût et testé à Coimbatore pour le séchage de la margose. L'appareil comprenait un capteur solaire de 2 m², une chambre de séchage et un ventilateur. L'étude a évalué l'influence du débit d'air sur l'efficacité énergétique, qui variait entre 28,74 % et 40,67 %. Le séchage a réduit la masse des tranches de 4000 g à 723 g en 7 heures. Le temps de retour énergétique était de 2,21 ans, avec une réduction des émissions de CO₂ de 33,52 tonnes. L'étude confirme l'efficacité et la durabilité du séchoir pour la conservation agricole Environnementale [21].

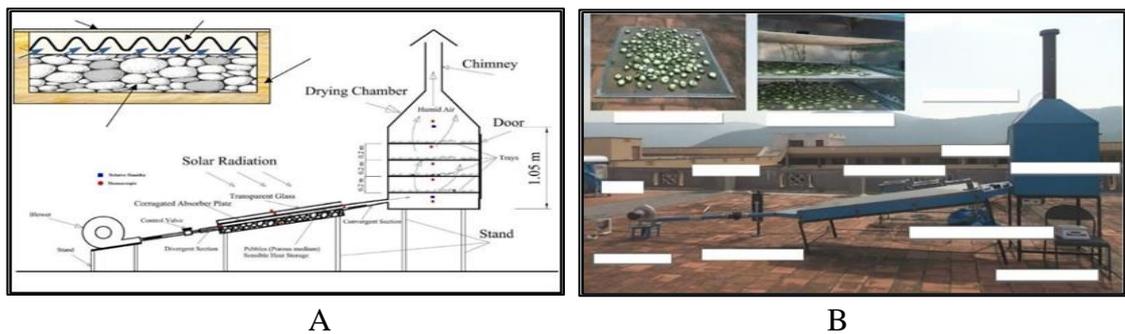


Figure II.8 (A) Schéma du dispositif expérimental (B) Configuration expérimentale avec divers instruments et dispositions de tranches de margose séchage solaire indirect [21].

Ramirez et al.2020 ont proposé un modèle thermique pour analyser les performances d'un four de séchage solaire indirect (ISD) équipé d'un système de stockage de chaleur utilisant un matériau à changement de phase (MCP). Ce modèle a permis une analyse détaillée du système dans des conditions de fonctionnement spécifiques et a estimé divers paramètres thermiques, tels que la température du vitrage, la plaque absorbante, le MCP, la chaleur utile, les performances thermiques et le stockage. Leur étude a révélé que l'intégration d'un MCP a amélioré les performances thermiques nocturnes et prolongé la durée de vie du système. Les résultats ont confirmé la contribution significative du MCP dans l'amélioration de l'efficacité thermique du système [22].

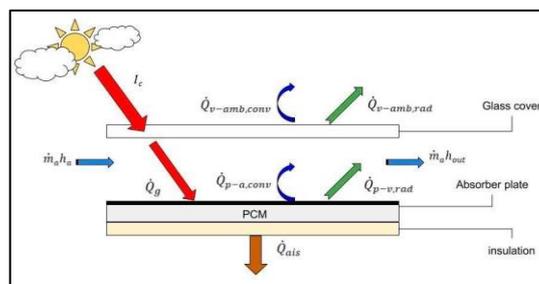


Figure II.9 Termes de transfert de chaleur impliqués dans le modèle[22]

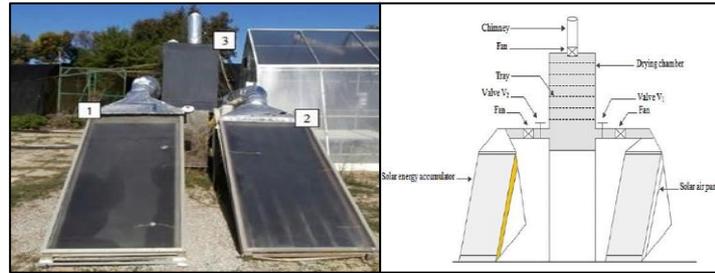


Figure II.10 Prototype du séchoir solaire indirect (ISD) et schéma du ISD [22]

Shalaby et al.2020 Ont analysé la qualité de l'huile essentielle extraite des feuilles de basilic en utilisant une méthode de séchage solaire indirect (IMFCSD), qui a permis de réduire le temps de séchage à 31 heures. Cette méthode a également permis d'identifier 62 composés organiques volatils (COV) dans les feuilles séchées, tout en favorisant des concentrations plus élevées de 31 COV détectés. L'étude a mis en évidence la supériorité du séchage solaire indirect par rapport au séchage naturel, grâce à des conditions de séchage précises et une stabilité thermique accrue, permettant ainsi de mieux préserver les composants volatils de l'huile essentielle de basilic [23].



Figure II.11 (a) Photographie des unités de séchage solaire et des capteurs solaires, (b) intérieur de la chambre de séchage. [23]

Bhardwaj et al. 2020 ont étudié un séchoir solaire indirect innovant pour le séchage des piments dans l'Himalaya occidental. Le système utilise un stockage de chaleur sensible (SHS) avec des débris de fer, des graviers et de l'huile moteur, ainsi qu'un matériau à changement de phase (PCM) en cire de paraffine. Il a réduit l'humidité des piments de 86,50 % à 4,85 % en 21 heures, contre 96 h pour le séchage solaire classique et 150 h pour le séchage naturel. Le temps

de séchage a été diminué de 78,12 % et 86 %, respectivement. La qualité des piments séchés était améliorée, avec une meilleure couleur, texture et teneur en nutriments [24].

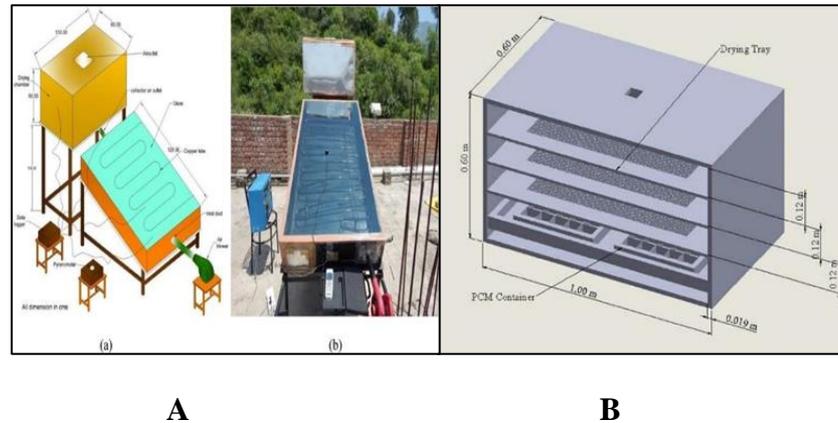


Figure II .12 (A) (a) Schéma du montage expérimental. (b) Montage expérimental
(B) Schéma de la chambre de séchage avec les plateaux
 Et le conteneur de PCM dans l'unité de séchage[24]

Vignes hKumar et al. 2021, ont conçu et fabriqué un four à énergie solaire indirect avec de la paraffine intégrée pour optimiser les performances après l'encapsulation. L'étude a révélé que la présence de paraffine augmentait la température de la salle de séchage et améliorait l'efficacité du séchage de 5,1 % [25].

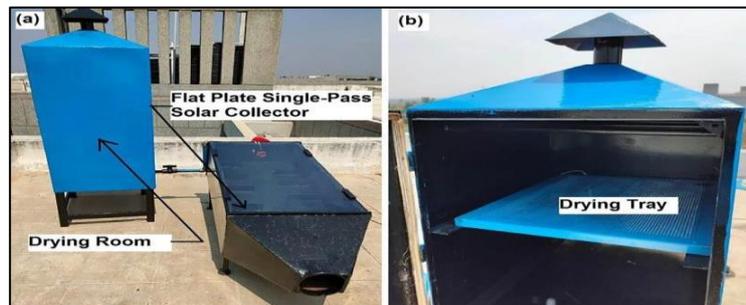


Figure II.13 Séchoir solaire expérimenté (a) Installation Complète (b) Intérieur de la chambre de séchage[25]

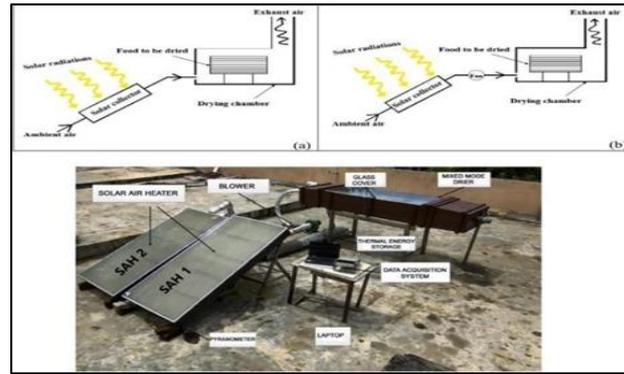


Figure II.15 Séchoir solaire de type mixte (a) Schéma de la convection naturel (b) Schéma de la convection forcée (c) Vue illustrée de la convection forcée[27]

Sharma et al. 2021 ont montré que le séchage solaire, en particulier à l’aide de séchoirs solaires indirects, permettait d’obtenir des produits de meilleure qualité avec un faible investissement. Ils ont mis en avant l’intégration de matériaux à changement de phase (PCM), notamment la cire de paraffine, pour maintenir l’efficacité du séchage même en l’absence de soleil. Les recherches récentes ont porté sur l’amélioration de ces séchoirs indirects à base de PCM. Le système développé par Atalay et Cankurtaran a présenté la meilleure efficacité thermique et une réduction notable des émissions de CO₂ parmi les dispositifs analysés [28].

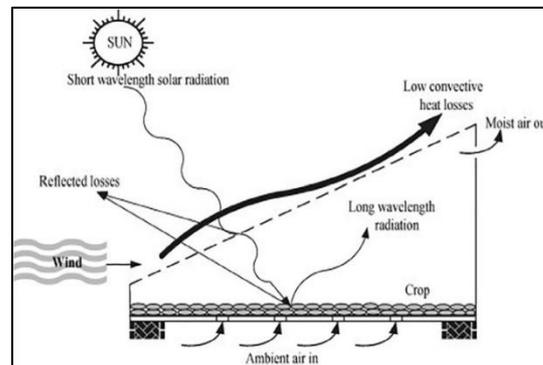


Figure II.16 Principe de fonctionnement des séchoirs solaires de type direct [28]

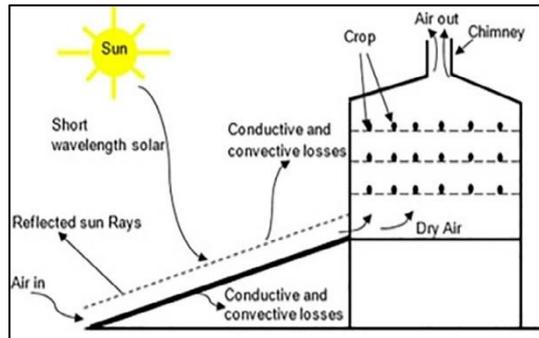


Figure II.17 Fonctionnement d'un séchoir solaire de type indirect [28].

Sabareesh et al. 2021 ont développé une méthode innovante de séchage solaire indirect à convection forcée pour le gingembre, utilisé durant la pandémie de COVID-19 à des fins médicinales. Ils ont intégré un dessiccant liquide (chlorure de calcium) diffusé par un atomiseur ultrasonique pour déshumidifier l'air, ainsi que de la cire de paraffine comme matériau de stockage thermique. Ils ont comparé ce système au séchage en plein air, avec et sans dessiccant, à des débits d'air de 0,153 kg/s et 0,077 kg/s. À 0,153 kg/s, ils ont réduit l'humidité de plus de 80 % à environ 10 %, avec un gain de 13 h avec dessiccant et 9 h sans. À 0,077 kg/s, l'humidité a été abaissée à 20 %, avec un gain de 11 h avec dessiccant et 6 h sans. Le modèle de séchage parabolique a donné les meilleurs résultats [29].

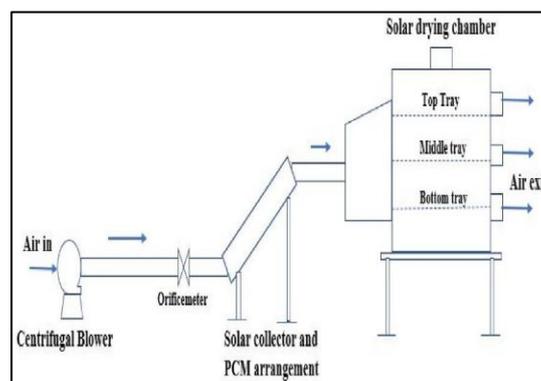


Figure II.18 Schéma d'agencement du séchage solaire sans dessiccant[29].

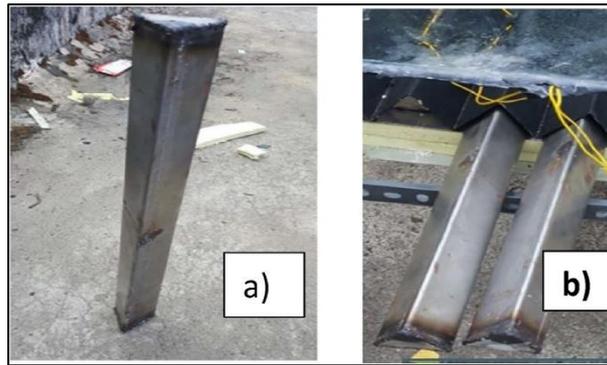


Figure II.19 (a) Module à matériau à changement de phase (PCM)
(b) Agencement du module PCM dans le capteur solaire[29].

Chaatouf et al.2021 Ont développé et a analysé les performances d'un séchoir solaire indirect doté d'un système de stockage thermique utilisant des tubes en cuivre remplis de PCM. Des simulations ont été réalisées avec Ansys Fluent, en intégrant un code C++ et les conditions climatiques de la ville d'Oujda. L'influence du nombre de couches de tubes et de différents PCM a été étudiée. Une nouvelle définition du rendement basée sur la température de séchage a été proposée. Les résultats ont montré une amélioration de 3,12 % du rendement nocturne avec stockage. Le Paraffine RT58 a offert les meilleures performances, avec un écart thermique de 11 °C [30].

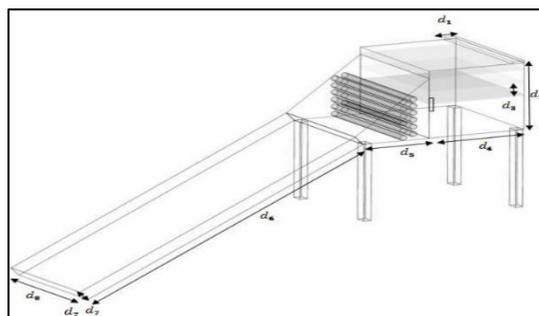


Figure II.20 Schéma du système étudié[30].

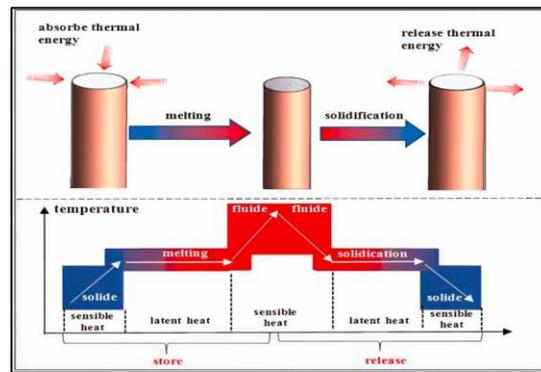


Figure II.21 Processus de charge et de décharge du matériau à changement de phase (PCM) [30].

Palacio et al.2022 Ont porté dans cette étude sur l'analyse expérimentale d'un capteur solaire à air à double canal (SAH) avec et sans matériau à changement de phase (PCM) pour le stockage thermique. Deux prototypes identiques ont été conçus, l'un intégrant du PCM macro-encapsulé. Les performances ont été évaluées sous trois conditions climatiques différentes. Le SAH avec PCM a atteint des températures de sortie supérieures d'environ 10 °C par rapport au capteur sans PCM. Le stockage PCM a permis de stabiliser la température face aux variations du rayonnement solaire et de prolonger la phase de chauffage après le coucher du soleil. L'étude a conclu à la nécessité de travaux supplémentaires en modélisation et optimisation du design [31].



Figure II.22 Vue générale de l'installation expérimentale [31].

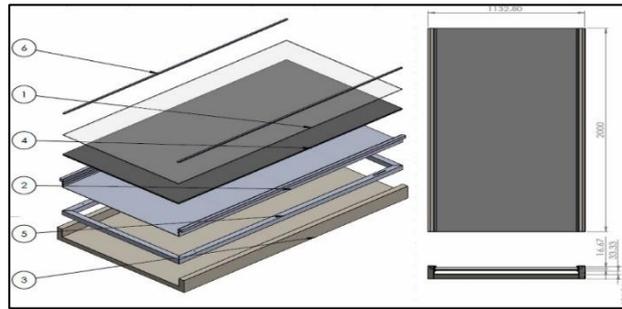


Figure II.23 Principales parties et dimensions du capteur solaire[31].

Verma et al.2022 ont développé les performances thermiques d'un chauffe-air solaire à flux parallèle intégrant un PCM ont été prédites par une méthode itérative transitoire. Les températures du capteur sur un cycle de 24 h ont été simulées en utilisant la méthode des volumes finis avec un schéma explicite sous MATLAB. Un schéma d'advection du premier ordre a été appliqué pour l'air. Les résultats ont montré un stockage thermique important dans le PCM et un rendement maximal de 63 % pour un débit de 0,05 kg/s. Des conditions de débit permettant une température de sortie ≥ 303 K la nuit ont été identifiées. L'effet de l'épaisseur du PCM sur les performances thermiques a également été étudié[32].

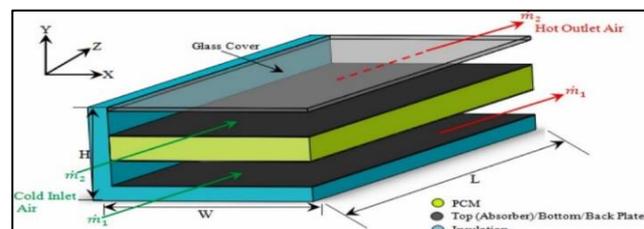


Figure II.24 Schéma du design proposé [32].

Vengadesan et al. 2023 ont développé et a analysé l'amélioration du transfert thermique d'un chauffe-air solaire (SAH) utilisant un absorbeur à tubes inclinés remplis de PCM. Des tests avec de la paraffine à différents débits d'air ont montré que le SAH avec PCM atteignait 64°C contre 58°C pour un absorbeur classique. L'efficacité énergétique maximale a été de 77,7 % contre 62,5 %. Le coefficient de transfert de chaleur a augmenté de 252 %. L'absorbeur proposé a réduit la période de retour sur investissement [33].



Figure II.25 Vue expérimentale du SAH actuel [31].

Lad et al.2023 ont étudié un séchoir solaire intégré à un matériau à changement de phase (PCM) pour stabiliser la température de séchage entre 50 °C et 55 °C, évitant ainsi la surchauffe et la perte de qualité des aliments sous climat tropical. Trois configurations ont été testées un séchoir conventionnel, un séchoir avec PCM dans le capteur solaire et un séchoir avec PCM dans la chambre de séchage. Les résultats ont montré que la troisième configuration assurait une meilleure stabilité thermique. L'étude confirme l'efficacité du PCM pour optimiser le séchage de divers aliments [34].

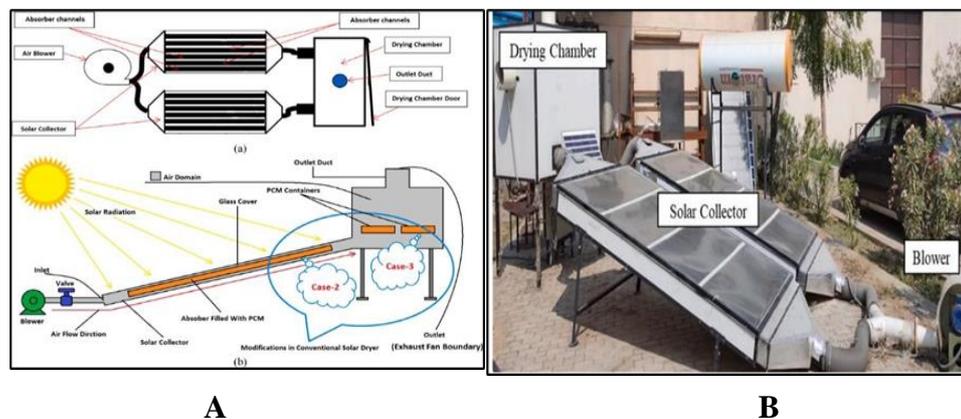


Figure II.26 (A) (a) Schéma du séchoir solaire indirect conventionnel (vue de dessus)(b) Modifications apportées au séchoir solaire selon les cas étudiés(B) Séchoir solaire indirect à convection forcée traditionnel commercial[34].

Thaker et al.2023 Ont développés un nouveau système de séchage solaire indirect pour le séchage des bananes, en s'appuyant sur le logiciel Ansys pour la simulation numérique. Ce système comprenait un capteur à tube solaire ainsi qu'une salle de séchage intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) afin d'améliorer l'efficacité du processus. Des simulations numériques étaient menées pour optimiser les paramètres de conception et de fonctionnement. Les résultats indiquaient que le système pouvait générer des températures élevées, particulièrement adaptées aux produits à faible teneur en eau comme les bananes. L'efficacité maximale était estimée à 67,40 %, avec des performances optimales observées entre 60 et 65 °C [35].

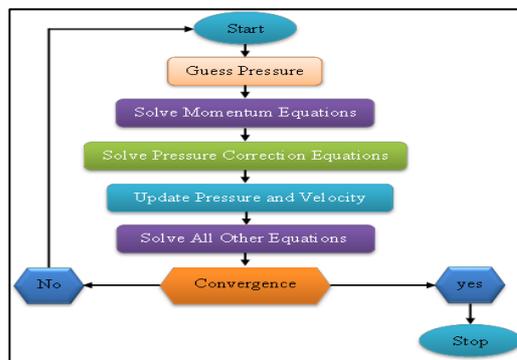


Figure II.27 Organigramme de la solution numérique[35]

Barbosa et al., 2023 ont étudié le séchage agricole, un processus énergivore nécessitant des améliorations pour optimiser l'efficacité et préserver la qualité des produits. Les séchoirs solaires, utilisant une énergie gratuite et abondante, bénéficient de techniques de stockage thermique pour pallier l'irrégularité de l'ensoleillement. Toutefois, en raison du coût des expérimentations, la modélisation numérique s'impose comme une solution efficace pour optimiser leurs performances. L'étude explore différents types de séchoirs, propose des paramètres de conception et met en avant l'importance du stockage thermique et des simulations pour améliorer les systèmes de séchage [36].

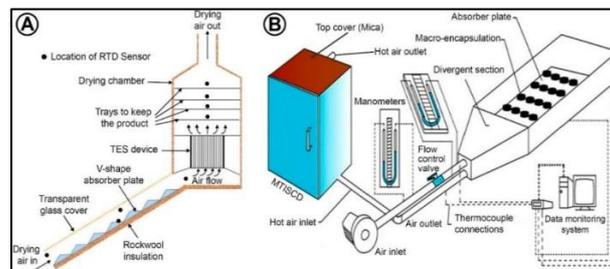


Figure II.28 Schéma des séchoirs solaires avec stockage thermique

(A) dans la chambre de séchage et (B) dans le système de collecte d'énergie [36].

Ennissioui et al. 2023 ont conçu, construit et étudié l'efficacité d'un système de séchage solaire indirect (ISD) à Meknès, au Maroc, intégrant un capteur solaire incliné à 34° et une température de départ maximale de 58°C. Le système réduit le poids des bananes de 549,76 g à 138,41 g, avec une efficacité moyenne de 23,37 % et 18,8 % respectivement. L'ISD a montré une meilleure élimination de l'humidité que le système de séchage à l'air libre [37].



Figure II.29 Dispositif expérimental ; (a), (b) Capteur solaire, (c) Chambre de séchage, (d) Cheminées, (e) Montage expérimental [37].

Singh et Mall. 2024 ont étudié un séchoir solaire indirect à convection naturelle utilisant un matériau à changement de phase (PCM) pour le séchage des tranches de banane. La cire de paraffine stocke et libère de la chaleur, permettant un séchage prolongé de 5 heures après le coucher du soleil. Lors des tests réalisés en Inde, 400 g de bananes ont été séchées de 73,2 % à 20 % d'humidité en 18 heures. L'analyse statistique a identifié le modèle modifié de Henderson et Pabis comme le plus adapté. L'efficacité maximale du séchoir était de 9,88 %, et celle du capteur solaire de 85,46 %. Ce système s'avère efficace pour le séchage des bananes et d'autres produits agricoles [38].

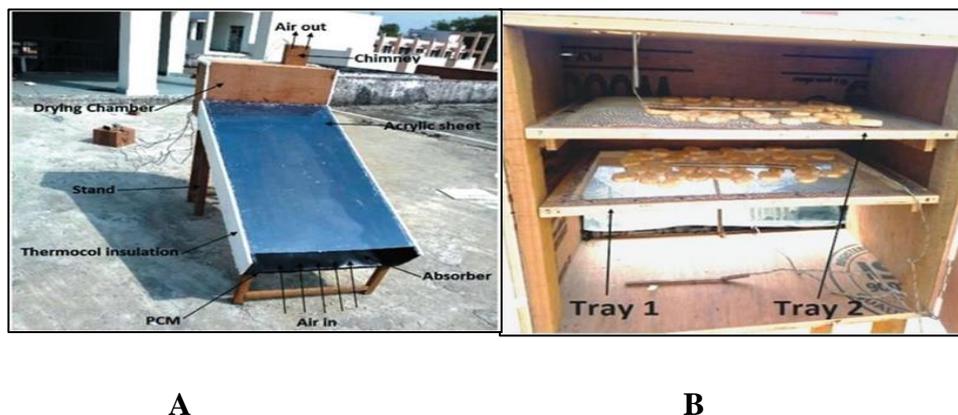


Figure II.30 (A) Installation expérimentale pendant l'expérience
(B) Tranches de banane placées sur des plateaux [38].

Majeed et al.2024 ont étudié et évalués les performances d'un système de séchage solaire indirect utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) pour la déshydratation des aliments. Les résultats montraient une amélioration significative de l'efficacité du séchage avec les PCM, permettant de réduire l'humidité de 10 % en 24 heures et le flux thermique de 3,26 % [39].

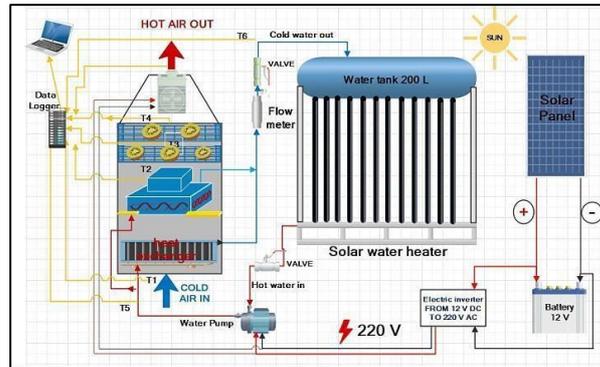


Figure II.31 schéma du montage expérimental [39].

Kavya et Ramana. 2024 ont étudié l'utilisation des séchoirs solaires qui exploitent l'énergie thermique du soleil pour éliminer l'humidité des produits et prolonger leur conservation. Ils soulignent l'importance des matériaux à changement de phase (PCM) comme moyen de stockage thermique, grâce à leurs propriétés isothermes permettant une utilisation même en l'absence d'ensoleillement. Plusieurs recherches ont démontré que l'intégration des PCM améliore la flexibilité d'utilisation, l'efficacité énergétique et la qualité des produits séchés. Cette revue analyse les tendances récentes et les facteurs influençant la performance des séchoirs solaires avec PCM, tout en abordant les défis liés à leur mise en œuvre. Enfin, les auteurs proposent des recommandations pour optimiser le séchage en termes d'efficacité énergétique et de rentabilité [40].

a augmenté de 3,9 % et 9,5 %, et le rendement thermique de 2,5 % et 6,8 %. L'analyse économique a montré une réduction du temps de retour énergétique de plus de 33 % [42].



Figure II.34 Séchoirs solaires expérimentaux[42].



Figure II.35 Fabrication des boîtes de PCM [42].

Kerse et al. 2025 ont étudié un séchoir solaire indirect avec un capteur à double passage d'air (DPSAH) et des déflecteurs pour améliorer le séchage des piments rouges. Le système a permis de réduire l'humidité de 81 % à environ 11,7-14,32 % en 29 à 56 heures. La température du capteur variait entre 33,9 °C et 70,9 °C, avec une efficacité thermique moyenne de 31,1 %. L'ajout de matériau à changement de phase (PCM) a stabilisé la température de séchage. L'étude souligne l'efficacité énergétique et la faisabilité économique de cette technologie pour une conservation optimale des aliments [43].

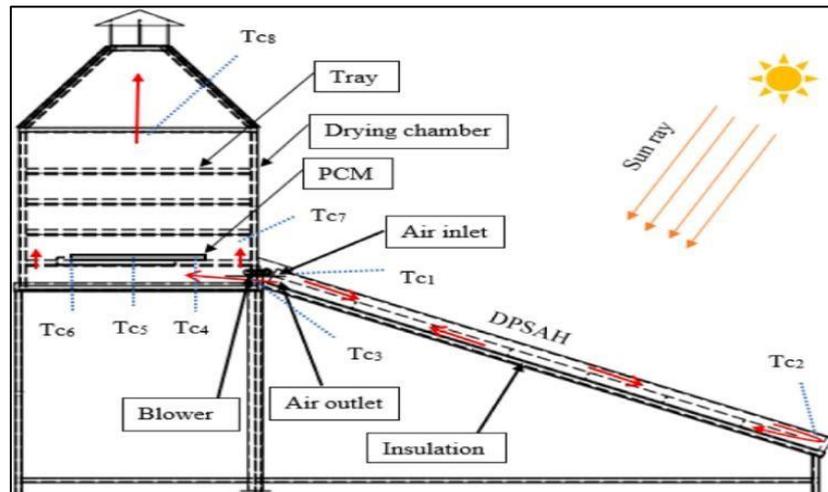


Figure II.36 Schéma du séchoir solaire [41].

Références Bibliographiques

- [1] K. Gairaa, Y. Bakelli, Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area Case of Ghardaïa Region, *Journal of Renewable Energy* 2013 (2013). <https://doi.org/10.1155/2013/496348>.
- [2] A. Sharma, C.R. Chen, N. Vu Lan, Solar-energy drying systems A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1185–1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>.
- [3] A. Boulemtafes, Le séchage solaire des produits agricoles, *Bulletin Des Energies Renouvelables* 21 (2011) 10–12.
- [4] S.Y. Khaldi, Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie, (n.d.).
- [5] T. Boumediene, Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*), (n.d.).
- [6] S. Boughali, Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques, PhD Thesis, Université de Batna 2, 2010. <http://eprints.univ-batna2.dz/249/> (accessed April 26, 2025).
- [7] Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée mémoire de magistère énergétique, Université Abou-Bekr belkaid-Tlemcen, 06 Juillet 2011 - Recherche Google, (n.d.).
- [8] A. Bouchaala, A.M.I. Meziani, CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DE SÉCHOIR SOLAIRE INDIRECT À CONVECTION FORCÉE PAR L'INTÉGRATION DES MATÉRIAUX DE STOCKAGE THERMIQUE, Thesis, 2020. <http://dSPACE1.univ-tlemcen.dz/handle/112/15786> (accessed March 12, 2025).
- [9] Séchage solaire du raisin, variété sultanine'' thèse de magister 2005. Institut National Agronomique Alger - Recherche Google, (n.d.).
- [10] Y. Naiti, K. imad eddine Melouah, Conception, fabrication et investigation expérimentale d'un dispositif de stockage d'énergie thermique par matériau à changement de phase couplé avec un séchoir solaire de type serre, Thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA, 2022. <http://dSPACE.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/30074> (accessed March 12, 2025).
- [11] M. Boutaoui, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule elliptique, Thesis, 2016. <http://192.168.100.28080/handle/123456789/8835> (accessed April 9, 2025).

- [12] O. Aumporn, Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase., (n.d.).
- [13] Etude de l'effet de l'intégration d'une couche MCP sur les performances d'un séchoir solaire direct-said-1-mimoire, (n.d.).
- [14] A.S. Soupart-Caron, Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase, (n.d.).
- [15] S. Noureddine, B. Djamel, B. Abdelghani, Présenté et soutenu publiquement par LOUAZENE Abderrahmane et BOUHNİK Abdallah, (n.d.).
- [16] Teop1de1, (n.d.).
- [17] A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat, A. Guizani, Thermal behavior of indirect solar dryer Nocturnal usage of solar air collector with PCM, *Journal of Cleaner Production* 148 (2017) 37–48. [https //doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149).
- [18] D.K. Rabha, P. Muthukumar, Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax–based latent heat storage system, *Solar Energy* 149 (2017) 214–226. [https //doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.012](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.012).
- [19] M. Mojarrad, A. Rahimi, M.R. Abdollahpour, A. Takzadeh, Modeling and Experimental Investigation a Solar Tray Dryer with Indirect Forced Convection using Phase Change Materials, (n.d.).
- [20] S. Yadav, A.B. Lingayat, V.P. Chandramohan, V.R.K. Raju, Numerical analysis on thermal energy storage device to improve the drying time of indirect type solar dryer, *Heat Mass Transfer* 54 (2018) 3631–3646. [https //doi.org/10.1007/s00231-018-2390-7](https://doi.org/10.1007/s00231-018-2390-7).
- [21] S. Vijayan, T.V. Arjunan, A. Kumar, Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices, *Renewable Energy* 146 (2020) 2210–2223. [https //doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.066](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.066).
- [22] C. Ramirez, M. Palacio, M. Carmona, Reduced model and comparative analysis of the thermal performance of indirect solar dryer with and without PCM, *Energies* 13 (2020) 5508.
- [23] S.M. Shalaby, M. Darwesh, M.S. Ghoname, Sh.El. Salah, Y. Nehela, M.I. Fetouh, The effect of drying sweet basil in an indirect solar dryer integrated with phase change material on essential oil valuable components, *Energy Reports* 6 (2020) 43–50. [https //doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.035](https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.035).
- [24] A.K. Bhardwaj, R. Kumar, R. Chauhan, S. Kumar, Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region, *Thermal Science and Engineering Progress* 20 (2020) 100713.
- [25] N. Vigneshkumar, M. Venkatasudhahar, P. Manoj Kumar, A. Ramesh, R. Subbiah, P. Michael Joseph Stalin, V. Suresh, M. Naresh Kumar, S. Monith, R. Manoj Kumar, M.

Kriuthikeswaran, Investigation on indirect solar dryer for drying sliced potatoes using phase change materials (PCM), *Materials Today Proceedings* 47 (2021) 5233–5238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562>.

[26] S. Madhankumar, K. Viswanathan, W. Wu, Energy, exergy and environmental impact analysis on the novel indirect solar dryer with fins inserted phase change material, *Renewable Energy* 176 (2021) 280–294.

[27] G. Srinivasan, D.K. Rabha, P. Muthukumar, A review on solar dryers integrated with thermal energy storage units for drying agricultural and food products, *Solar Energy* 229 (2021) 22–38.

[28] M. Sharma, D. Atheaya, A. Kumar, Recent advancements of PCM based indirect type solar drying systems A state of art, *Materials Today Proceedings* 47 (2021) 5852–5855. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.280>.

[29] V. Sabareesh, K.J. Milan, C. Muraleedharan, B. Rohinikumar, Improved solar drying performance by ultrasonic desiccant dehumidification in indirect forced convection solar drying of ginger with phase change material, *Renewable Energy* 169 (2021) 1280–1293. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.085>.

[30] D. Chaatouf, M. Salhi, B. Raillani, S. Amraoui, A. Mezrhab, Assessment of a heat storage system within an indirect solar dryer to improve the efficiency and the dynamic behavior, *Journal of Energy Storage* 41 (2021) 102874. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102874>.

[31] M. Palacio, C. Ramírez, M. Carmona, C. Cortés, Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater, *Solar Energy* 247 (2022) 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.046>.

[32] G. Verma, S. Singh, S. Chander, P. Dhiman, Numerical investigation on transient thermal performance predictions of phase change material embedded solar air heater, *Journal of Energy Storage* 47 (2022) 103619. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103619>.

[33] E. Vengadesan, V. Dhinakaran, S. Senthil, P. Renugadevi, R. Senthil, Performance augmentation of solar air heater using absorber with multi-functional encapsulated PCM tubes, *Journal of Energy Storage* 72 (2023) 108296. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108296>.

[34] P. Lad, R. Kumar, R. Saxena, J. Patel, Numerical investigation of phase change material assisted indirect solar dryer for food quality preservation, *International Journal of Thermofluids* 18 (2023) 100305. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100305>.

[35] A.S. Thaker, F.M. Hussien, J.J. Faraj, Numerical Simulation of an Indirect Solar Dryer Equipped with Thermal Conduction Enhancer Augmented Phase Change Materials (PCMs) for Banana Drying, *IJHT* 41 (2023) 1158–1166. <https://doi.org/10.18280/ijht.410506>.

- [36] E.G. Barbosa, M.E.V. de Araujo, A.C.L. de Oliveira, M.A. Martins, Thermal energy storage systems applied to solar dryers Classification, performance, and numerical modeling An updated review, *Case Studies in Thermal Engineering* 45 (2023) 102986.
- [37] J. Ennissoui, E.M. Benghoulam, T. El Rhafiki, Experimental study of a natural convection indirect solar dryer, *Heliyon* 9 (2023) e21299. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21299>.
- [38] D. Singh, P. Mall, Experimental investigation of thermal performance of indirect mode solar dryer with phase change material for banana slices, *Energy Sources, Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 46 (2024) 15268–15285. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1810825>.
- [39] A.H. Majeed, J.J. Faraj, F.M. Hussien, Enhancing Solar Drying Efficiency Through Indirect Solar Dryers Integrated with Phase Change Materials., *International Journal of Heat & Technology* 42 (2024). <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=03928764&AN=175952624&h=Eh6B%2FIoSRCgDLNazxomXWw5P6fkLS%2Fc7q7q%2B1BhRciI6Sgegkn7N7rdqINHR6moYdxwq1XpCz8645RyIBA7MQ%3D%3D&crl=c> (accessed March 6, 2025).
- [40] V.S. Kavya, A.S. Ramana, Recent Trends in PCM-Integrated Solar Dryers, *Engineering Proceedings* 61 (2024) 6. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061006>.
- [41] P. Dutta, H. Das, P.P. Dutta, P. Kalita, Evaluation of an improved indirect solar dryer for Curcuma Amada without and with stone chips as thermal energy storage An investigation on kinetics, energy, exergy, quality and economic aspects, *Journal of Energy Storage* 79 (2024) 110199. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110199>.
- [42] M. Alktrane, Q. Al-Yasiri, K.S. Mohammed, M. Arıcı, M. Szabó, P. Bencs, Energy, exergy, and economic analysis of indirect solar dryer integrated phase change material cans, *Energy Conversion and Management* X 26 (2025) 100986. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100986>.
- [43] A.Y. Kerse, D.T. Embiale, D.G. Gunjo, Dehydration of red chilli using an indirect type forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage, *International Journal of Thermofluids* 26 (2025) 101045.
- [44] A. Balbay, Ö. Şahin, Microwave Drying Kinetics of a Thin-Layer Licorice Root, *Drying Technology* 30 (2012) 859–864. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.670682>.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة غرداية
حاضرة أعمال جامعة غرداية



رقم: 268 / ح.أ.ج.غ/2025

شهادة توظيف مشروع مبتكر وفق القرار 008 المعدل والمتمم للقرار 1275

أنا الممضي أسفله، السيد: د/ طالب أحمد نور الدين

مسير حاضرة الأعمال: جامعة غرداية

المقر الاجتماعي/ العنوان: المنطقة العلمية، ص ب 455، غرداية، 47000، الجزائر

بتاريخ: 2025/04/10

رقم علامة الحاضرة: 1004253146

طبيعة المشروع: مؤسسة ناشئة

أشهد أن الطالب(ة) / الطلبة التالية أسماؤهم:

الإسم واللقب	الطور الدراسي	التخصص	الكلية
منال وذان	M2	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا
رميصة بوشعالة	M2	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا

تحت إشراف الأستاذ(ة)/الأستاذة التالية أسماؤهم:

الإسم واللقب	الرتبة	التخصص	URER
عبد الوهاب بن صديق	أستاذ باحث	طاقات متجددة	وحدة الطاقات المتجددة غرداية
عبد الله بوشعالة	أستاذ مؤقت	طاقات متجددة	وحدة الطاقات المتجددة غرداية

تم توظيفه على مستوى حاضرة أعمال جامعة غرداية - بمشروع تحت اسم:

DEVELOPPEMENT ET TEST D'UN SECHOIRE SOLAIRE INDIRECT AVEC STOCKAGE
D'ENERGIE PAR MATERIEUX A CHANGEMENT DE PHASE MCP POUR LA
CONSERVATION DES PRODUITS LOCAUX EN REGIONS SEMI-ARIDES.

خلال السنة الجامعية: 2025/2024

سلمت هذه الشهادة بطلب من المعني للإدلاء بها في حدود ما يسمح به القانون.

حرر في غرداية بتاريخ: 16/06/2025

مدير الحاضرة

جامعة غرداية
حاضرة الأعمال
* طالب أحمد نور الدين *



Université de Ghardaïa

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examinateur 1	AOUF Mohammed	
Examinateur 1		
Encadrant	BENSEDDIK Abdelouahab	
Co-encadrant	BOUCHAALA Abdallah	

Sousigne Mr: MANSOURI Khaled

Président de jury des étudiant (s): Bouchaala Roumaïssa & Ouddane Mannal

Filière : Génie des procédés ; Spécialité : Génie chimique

Thème: Développement et test d'un séchoir solaire indirect avec stockage d'énergie par matériau à changement de phase (MCP) pour la conservation des produits locaux en régions semi-arides

Autorise le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final au niveau du département.

Charadaïa 09025... 0... 9...

Président de jury

Le chef de département

