

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR, EL OUED

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département de génie mécanique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de : Énergies renouvelables

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Thème

**Étude expérimentale des performances thermiques d'un
séchoir solaire indirect plat équipé d'un matériau à
changement de phase pour le stockage de chaleur**

Présenté par :

- *Cherrahi Bachir*
- *Menacer Sadek*

Devant le Jury composé de :

Laouini Abdeljalil	Président	Université d'El Oued
Degoum Khalil	Examineur	Université d'El Oued
Meneceur Nouredine	Encadreur	Université d'El Oued

2024 - 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

À ceux qui ont semé en moi l'amour du savoir et ont été mon soutien à chaque étape...

À mon cher père et à ma précieuse mère, sans vos prières, vos sacrifices et votre foi en moi, je n'aurais jamais atteint ce jour... Merci du fond du cœur pour votre patience, votre générosité et votre amour inconditionnel.

À mes frères et sœurs, qui ont été pour moi un appui, une source de force et de motivation...

À mes professeurs estimés, et à tous ceux qui m'ont soutenu par une parole, un conseil ou une prière...

À mes amis et collègues de parcours universitaire, qui ont rendu ces années d'études inoubliables...

Je vous dédie le fruit de mes efforts à vous tous, car vous êtes les véritables partenaires de cette réussite.

Charahi Bachir

Dédicace

Ce travail est le couronnement d'un long voyage, riche en défis, en apprentissages et en espoir...

Je le dédie, avec tout mon amour et ma reconnaissance :

À mes parents bien-aimés, piliers de ma vie, dont les prières silencieuses et les sacrifices quotidiens ont éclairé mon chemin. Que Dieu vous protège et vous récompense pour tout.

À ma famille, source d'affection, de force et de réconfort, dans les jours faciles comme dans les moments d'incertitude.

À mes professeurs et encadrants, pour leur générosité intellectuelle et humaine, qui ont éveillé en moi la passion de la connaissance.

À mes amis sincères, compagnons de route et de souvenirs inoubliables.

Enfin, à moi-même, pour avoir cru, persévéré et rêvé jusqu'au bout.

Menacer Sadek

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères et ma profonde reconnaissance à Monsieur Meneceur noureddine, mon encadrant(e), pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail.

Votre rigueur scientifique, votre grande disponibilité et vos conseils avisés ont été essentiels à l'élaboration de ce mémoire. Grâce à votre encadrement bienveillant, j'ai pu progresser, structurer mes idées et surmonter les difficultés avec confiance.

Recevez ici l'expression de ma gratitude la plus profonde et de mon respect le plus sincère.

Résumé

Dans cette étude expérimentale, un séchoir solaire à convection forcée fonctionnant à l'énergie solaire a été conçu et développé, avec l'intégration de la paraffine comme matériau à changement de phase (MCP) afin d'améliorer l'efficacité thermique du système. Les étapes de travail ont couvert les aspects théoriques liés aux différents types de séchoirs et à leurs principes de fonctionnement, notamment le séchoir à capteur plan, ainsi que l'étude des propriétés des matériaux à changement de phase et leur potentiel à améliorer les performances thermiques. Deux prototypes ont été construits : l'un avec paraffine et l'autre sans. Les résultats ont montré que le séchoir contenant de la paraffine maintient des températures plus stables et plus élevées pendant la journée, ce qui a accéléré le processus de séchage et réduit la masse d'eau résiduelle par rapport au modèle sans MCP. L'effet de traitements appliqués à la surface absorbante a également été testé à l'aide de mélanges à base de ciment et de limaille d'aluminium ou de sel, ce qui a permis d'augmenter la masse thermique du système et d'améliorer le transfert de chaleur. Les mesures sur le terrain (température, vitesse de l'air, rayonnement solaire) et les données expérimentales ont confirmé que la combinaison des MCP avec des matériaux à forte conductivité thermique comme la limaille d'aluminium contribue efficacement à améliorer l'efficacité de séchage et la stabilité thermique du système. L'étude conclut que l'énergie solaire représente une alternative prometteuse et économique pour les processus de séchage dans les zones à ressources limitées, et recommande de poursuivre les recherches pour optimiser les propriétés physiques des séchoirs solaires et élargir l'usage des MCP selon les contextes climatiques.

Mots clés: Séchoir solaire, (PCM) → Matériau à changement de phase (MCP), Paraffine, Efficacité thermique, Limaille d'aluminium.

Abstract

In this experimental study, a forced-convection solar dryer powered by solar energy was designed and developed, incorporating **paraffin as a phase change material (PCM)** to enhance the thermal efficiency of the system. The work covered theoretical aspects related to different types of solar dryers and their operating principles, particularly the flat plate collector dryer, as well as an investigation into the properties of phase change materials and their potential to improve thermal performance.

Two prototypes were constructed: one with paraffin and the other without. The results showed that the dryer containing paraffin maintained more stable and higher temperatures during the day, which accelerated the drying process and reduced the residual water content compared to the model without PCM. The effect of treatments applied to the absorber surface was also tested using mixtures based on cement and aluminum shavings or salt, which increased the system's thermal mass and improved heat transfer.

Field measurements (temperature, air velocity, solar radiation) and experimental data confirmed that combining PCM with high thermal conductivity materials like aluminum shavings effectively enhances drying efficiency and the system's thermal stability. The study concludes that solar energy represents a promising and cost-effective alternative for drying processes in areas with limited access to conventional energy sources, and recommends further research to optimize the physical properties of solar dryers and expand the use of PCM under various climatic conditions.

Keywords: Solar dryer, (PCM) → Phase Change Material (PCM), Paraffin, Thermal efficiency, Aluminum shavings.

الملخص

في هذه الدراسة التجريبية، تم تصميم وتطوير مجفف شمسي يعمل بالهواء القسري يعتمد على الطاقة الشمسية، مع دمج مادة البارافين كمادة لتغيير الطور (PCM) لتعزيز الكفاءة الحرارية للنظام. شملت مراحل العمل الجوانب النظرية المتعلقة بأنواع المجففات ومبادئ عملها، وخاصة المجفف ذي اللوح المسطح، بالإضافة إلى دراسة خصائص مواد تغيير الطور وإمكانياتها في تحسين الأداء الحراري. تم بناء نموذجين تجريبيين: أحدهما يحتوي على البارافين والآخر لا يحتوي عليه، وقد أظهرت النتائج أن المجفف المزود بالبارافين يحتفظ بدرجات حرارة أكثر استقرارًا وارتفاعًا خلال النهار، مما أدى إلى تسريع عملية التجفيف وتقليل كتلة الماء المتبقية مقارنة بالنموذج الآخر. كما تم اختبار تأثير معالجة سطح الامتصاص باستخدام خلطات تعتمد على الأسمت وبرادة الألمنيوم أو الملح، حيث ساهمت هذه المواد في زيادة الكتلة الحرارية للنظام وتحسين انتقال الحرارة. أكدت القياسات الميدانية (درجة الحرارة، سرعة الهواء، الإشعاع الشمسي) والبيانات التجريبية أن الجمع بين مواد تغيير الطور والمواد ذات الخصائص الموصلة مثل برادة الألمنيوم يساهم بشكل فعال في رفع كفاءة التجفيف واستقرار الأداء الحراري. وخلصت الدراسة إلى أن الطاقة الشمسية تشكل بديلاً واعداً واقتصادياً للتجفيف في المناطق ذات الموارد المحدودة، وأوصت بمواصلة البحث لتطوير الخصائص الفيزيائية للمجففات الشمسية وتوسيع استخدام MCP حسب الظروف المناخية.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي، مادة تغيير الطور، البارافين، الكفاءة الحرارية، برادة الألمنيوم.

Summure

Dédicace	II
Résumé	V
Abstract	VI
المخلص	VII
Summure	VIII
LIST DE FIGURE	X
LIST TABLEAU.....	XIII

Introduction générale

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Revue bibliographique des séchoirs solaires	3
I.2.2 Conception et réalisation du capteur plan à air	19
I.3 CONCLUSION	20

Chapitre II : Le Séchage Solaire : Principes, Méthodes et Paramètres de l’Air

II.3.3 Séchage thermique.....	23
II 7. Composants principaux du système	38
II 8. MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE	40
8.1 Critère de sélection d’un bon MCP.....	40
8.2. Paraffines.....	41
II.9 Conclusion	42

Chapitre III : L’étude expérimentale

III.1 Présentation	44
III.2 Affichage du séchoir solaire	44
III.4 Comment fonctionne notre séchoir solaire en tant que système de séchage	47
III.4.1 Préparation de l’absorbeur pour chaque capteur solaire	47
III.4.1.1 Traitement des absorbeurs à partir d’un mélange de ciment et de limaille d’aluminium	47
III.4.1.2 Traitement de l’absorbeur à partir d’un mélange de sel et de limaille d’aluminium	49
III.4.2.1 Préparation de l’échantillon à sécher.....	51
III.5 Appareils de mesure	52
III.5.1 Mesure de la température	52

III.5.2 Mesure de la vitesse de l'air	54
III.5.3 Mesure du rayonnement solaire :.....	54
III.6 Constatations et interprétations	54
Résultats et discussions	55
III.7.3 En conclusion.....	59
Références Bibliographique.....	61

LIST DE FIGURE

Titles	Pâge
Figure I. 1 : <i>Vue schématique du séchoir avec capteur solaire à air</i>	05
Figure I. 2 : <i>Capteur solaire à air avec ailettes.</i>	05
Figure I. 3 : <i>La configuration expérimentale du séchoir solaire.</i>	06
Figure I. 4 : <i>Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé.</i>	06
Figure I.5 : <i>Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé double passes.</i>	07
Figure I. 6 : <i>Vue Schématique d'un capteur solaire à absorbeur inversé type plaque absorbantes.</i>	07
Figure I. 7 : <i>Séchoir solaire à absorbeur inversé.</i>	08
Figure I. 8 : <i>Séchoir solaire à absorbeur inversé avec stockage thermique et cheminée solaire.</i>	09
Figure I.9 : <i>Capteur avec disposition d'obstacles, DCL, OCL et muni d'obstacles TL.</i>	10
Figure I.10 : <i>Capteur avec des chicanes rectangulaire sur la plaque inférieure en bois.</i>	10
Figure I.11 : <i>Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur.</i>	11
Figure I.12 : <i>Capteur plan à air muni de rugosités.</i>	12
Figure I.13 : <i>Dispositif expérimental.</i>	12
Figure I.14 : <i>Schéma descriptif des chicanes.</i>	13
Figure I.15 : <i>Schéma descriptif des chicanes.</i>	13
Figure II.16 : <i>Montage expérimental (avec et sans ailerons).</i>	14
Figure II.17 : <i>Absorbeur chicanes de forme semi-cylindrique.</i>	14
Figure II.18 : <i>Efficacité thermique en fonction du débit massique d'air.</i>	15
Figure II.19 : <i>Capteur solaire avec système à ailettes sur la plaque arrière en bois.</i>	16
Figure II.20 : <i>(a) schéma d'assemblage et (b) vue de face de système.</i>	16

Figure I.21 : <i>Domaine de calcul : (I) zone d'entrée d'air, (II) zone d'échange de chaleur et (III) zone de sortie.</i>	17
Figure I.22 : <i>variation des caractères thermo aérodynamique avec nombre de Reynolds.</i>	18
Figure I.23 : <i>Schéma expérimental du capteur solaire.</i>	18
Figure I .24 : <i>Isolation thermique du capteur plan à air.</i>	19
Figure I .25 : <i>Isolation thermique des longueurs d'entrée.</i>	20
Figure I.26 : <i>Forme et emplacement des chicane étudiées.</i>	20
Figure II. 1 : <i>Température humide du gaz.</i>	26
Figure II.2 : <i>Représentation de l'activité de l'eau.</i>	28
Figure II.3 : <i>Représentation schématique d'un solide humide.</i>	29
Figure II.4 : <i>Vitesse de séchage en fonction du temps et de la masse.</i>	30
Figure II.5 : <i>Courbe représenté les périodes du séchage en fonction du temps.</i>	31
Figure II.6 : <i>Différents systèmes du séchage solaire.</i>	33
Figure II.7 : <i>Le séchoir solaire direct.</i>	34
Figure II.8 : <i>Séchage naturel Ou au soleil.</i>	35
Figure II.9 : <i>Schéma du séchoir solaire.</i>	35
Figure II.10 : <i>Schéma du séchoir solaire.</i>	36
Figure II.11 : <i>Séchoir solaire indirect.</i>	36
Figure II.12 : <i>Classification des différents types de stockage thermique.</i>	39
Figure III. 1 : <i>Séchoir solaire usagé.</i>	46
Figure III. 2 : <i>Schéma montrant les dimensions de la chambre de séchage, la longueur du capteur solaire et l'angle d'inclinaison.</i>	47
Figure III. 3 : <i>Schéma montrant les dimensions du capteur solaire.</i>	47
Figure III. 4 : <i>Le séchoir solaire utilisé dans l'atelier de menuiserie immédiatement après l'achèvement.</i>	48
Figure III. 5 : <i>Le poids d'une plaque remplie de limaille d'aluminium.</i>	49
Figure III. 6 : <i>Le poids d'une plaque remplie de ciment.</i>	49

Figure III. 7 : <i>Une plaque remplie d'un mélange de ciment et de limaille d'aluminium.</i>	50
Figure III. 8 : <i>Peindre les feuilles avec de la peinture noire mate.</i>	50
Figure III. 9 : <i>Plaque remplie de limaille d'aluminium.</i>	51
Figure III. 10 : <i>Le poids d'une assiette remplie de sel.</i>	51
Figure III. 11 : <i>Mélange de sel avec de la limaille d'aluminium.</i>	52
Figure III. 12 : <i>Peinture noire du mélange</i>	52
Figure III. 13 : <i>Mise en place du mélange en mat. Complexe.</i>	52
Figure III. 14 : <i>Le poids d'un échantillon de citrouille verte.</i>	53
Figure III. 15 : <i>L'échantillon de paraffine, découpé en morceaux de 0,5 cm d'épaisseur, est soigneusement placé dans les chambres de séchage selon une disposition uniforme, afin d'assurer un séchage homogène.</i>	53
Figure III. 16 : <i>Thermocouple.</i>	54
Figure III. 17 : <i>Arduino.</i>	54
Figure III. 18 : <i>Enregistrement automatique des données de température dans l'ordinateur toutes les dix secondes.</i>	54
Figure III. 19 : <i>Anémomètre.</i>	55
Figure III. 20 : <i>Pyranomètre.</i>	55
Figure III. 21 : <i>Évolution du flux solaire et de la température ambiante au cours de la journée de mesure du 21 mai 2025.</i>	56
Figure III. 22 : <i>Comparaison de l'évolution de la température à travers le collecteur avec et sans matériau à changement de phase (PCM) au cours de la journée.</i>	57
Figure III. 23 : <i>Comparaison de l'évolution de la température à travers la chambre de séchage avec et sans matériau à changement de phase (PCM) au cours de la journée.</i>	58
Figure III. 24 : <i>Comparaison de l'évolution de la masse d'eau au cours du temps avec et sans matériau à changement de phase (PCM) lors de l'expérimentation de séchage.</i>	59

LIST TABLEAU

Titles	Pâge
Tableau II.1 : <i>Quelques exemples des méthodes de séchage</i>	23

Introduction générale

Introduction générale

Le monde connaît aujourd'hui une croissance rapide du recours aux énergies renouvelables en tant qu'alternative durable et propre aux sources d'énergie traditionnelles, face aux défis environnementaux et économiques qui s'imposent avec acuité. Parmi ces énergies prometteuses, l'énergie solaire se distingue comme une ressource inépuisable et sûre, pouvant être exploitée dans de nombreuses applications quotidiennes et industrielles. Parmi celles-ci figure la technologie du séchage solaire, qui représente une solution efficace et économique pour la conservation des produits agricoles et alimentaires.

La présente étude s'inscrit dans cette dynamique, et vise à analyser et concevoir un système de séchage solaire (séchoir solaire) fonctionnant à l'énergie solaire, à travers une approche multidimensionnelle couvrant les aspects théoriques, de conception et expérimentaux. Le mémoire a été structuré en trois chapitres principaux, étroitement liés. Le premier chapitre est consacré à une étude théorique et bibliographique des différents types de séchoirs solaires, avec un accent particulier sur les composants du système, notamment le capteur plan à air, ainsi qu'un examen approfondi du concept des matériaux à changement de phase (MCP) et de leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité thermique du système.

Le deuxième chapitre propose une étude plus approfondie des composantes du système thermique, en analysant les principes physiques du séchage, les caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que les critères de sélection d'un MCP performant. Cette partie est enrichie par une étude comparative des différentes substances (telles que les paraffines), en mettant en évidence leurs principales propriétés et leurs applications spécifiques dans ce domaine.

Le troisième chapitre est consacré à l'aspect expérimental de l'étude. Il présente l'essai sur le terrain du système de séchage, depuis la préparation des composants – notamment les absorbeurs, confectionnés à partir de diverses combinaisons – jusqu'à la préparation des échantillons à sécher, en passant par la mesure des paramètres physiques tels que la température, la vitesse de l'air et l'intensité du rayonnement solaire. Une analyse rigoureuse des résultats expérimentaux est ensuite réalisée, en les confrontant aux normes scientifiques et techniques.

Dans son ensemble, cette étude ambitionne de proposer une vision intégrée d'un séchoir solaire performant, alliant innovation technologique, efficacité énergétique et coût réduit, avec une contribution tangible à la rationalisation de l'usage de l'énergie et à la promotion du développement durable, notamment dans les zones rurales et agricoles.

Chapitre I :

Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Les technologies de stockage de chaleur occupent une place cruciale dans les systèmes énergétiques modernes, car elles permettent d'améliorer l'efficacité énergétique tout en réduisant les pertes thermiques. Dans un contexte marqué par l'augmentation constante de la demande en énergie et la nécessité impérieuse de préserver l'environnement, des solutions innovantes sont activement recherchées. Parmi celles-ci, les matériaux à changement de phase (PCM) se distinguent par leur capacité remarquable à stocker et restituer l'énergie thermique. Ces matériaux fonctionnent en absorbant ou en libérant de la chaleur lors de leur passage d'un état solide à liquide (et inversement), ce qui leur permet de stocker de grandes quantités d'énergie sur de longues périodes.

Grâce à cette propriété, les PCM sont utilisés dans diverses applications, allant de la régulation thermique des bâtiments intelligents à l'optimisation des systèmes à énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien. Ils contribuent à lisser les pics de consommation, à améliorer l'autonomie énergétique et à renforcer le confort thermique des usagers. Cependant, l'intégration des PCM n'est pas sans défis. Les principaux obstacles concernent le coût élevé de certains matériaux, la complexité de conception des systèmes et leur compatibilité avec les dispositifs existants.

Malgré ces limitations, le potentiel des PCM en matière de transition énergétique durable est considérable. Cette étude se propose donc d'analyser les avantages de leur intégration dans les systèmes de stockage de chaleur, d'identifier les principales difficultés techniques rencontrées et d'explorer les perspectives d'évolution de cette technologie. Elle vise à fournir des repères utiles tant aux chercheurs qu'aux professionnels œuvrant dans le domaine de l'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique.

I.2 Revue bibliographique des séchoirs solaires

En 1999, Ekechukwu [10] a présenté une revue approfondie des principes fondamentaux et des théories du séchage des produits agroalimentaires, allant des premiers modèles de sorption et d'équilibre hygroscopique jusqu'aux modèles de la couche mince. Les séchoirs solaires sont des systèmes conçus pour capter l'énergie solaire et sécher les denrées alimentaires placées à l'intérieur. Les recherches sur ces dispositifs ont démontré leur efficacité, leur simplicité d'utilisation, leur faible coût et leur praticité. Ils peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement : direct, indirect ou mixte. Dans les séchoirs solaires directs, le produit est exposé directement au rayonnement solaire. Ces séchoirs sont souvent fabriqués en bois et recouverts d'un vitrage pour créer un effet de serre.

Les séchoirs solaires indirects sont généralement composés d'un capteur solaire destiné à chauffer l'air ambiant, lequel est ensuite conduit vers une chambre de séchage contenant les produits. Pour faire circuler l'air, ces dispositifs utilisent soit un ventilateur (convection forcée), soit une cheminée installée à l'extrémité supérieure de la chambre (convection naturelle). Dans ce système, le produit est protégé du soleil et même de la lumière, ce qui permet de conserver de meilleures qualités nutritionnelles [11].

Les séchoirs mixtes, quant à eux, combinent les deux approches précédentes. Ils utilisent simultanément la chaleur du rayonnement solaire direct et celle générée par un capteur solaire pour accélérer le processus de séchage.

Une revue sur les capteurs solaires à air et les séchoirs solaires à basse température a été publiée par Ekechukwu et Norton [12]. En 2009, Sharma et al. [13] ont réalisé une autre synthèse sur les systèmes de séchage solaire. L'année suivante, Fudholi et al. [14] ont analysé divers types de séchoirs solaires en tenant compte des caractéristiques des produits agricoles et marins, et ont proposé une classification en quatre types : direct, indirect, mixte et hybride. En 2012, El-SEBAII [15] a décrit en détail les travaux fondamentaux concernant les séchoirs solaires ainsi que leurs capteurs pour les modes indirects et mixtes.

Selon le mode de circulation de l'air, on distingue deux grandes catégories de séchoirs solaires : actifs et passifs [13]. Les séchoirs solaires actifs (à convection forcée) utilisent des ventilateurs pour assurer le mouvement de l'air chauffé à l'intérieur de l'unité de séchage. Les séchoirs passifs (à convection naturelle) reposent sur une cheminée aménagée au sommet de la chambre pour favoriser la circulation de l'air.

Cependant, les séchoirs à convection naturelle sont souvent peu efficaces, car la circulation de l'air y est généralement insuffisante [16]. Cela peut provoquer des températures trop élevées dans la chambre, conduisant parfois à une cuisson partielle du produit au lieu d'un séchage adéquat. Certaines études ont montré que des cheminées solaires bien conçues peuvent améliorer le débit d'air dans le séchoir [17].

Les recherches récentes s'orientent principalement vers diverses innovations techniques visant à améliorer l'efficacité des séchoirs solaires, telles que :

- l'amélioration des performances thermiques des capteurs solaires,
- utilisation des cheminées solaires,
- le prolongement de la durée de fonctionnement des séchoirs en utilisant le stockage thermique,

- l'amélioration de la circulation d'air et de la température dans la chambre deséchage.

En 2016, une étude expérimentale d'un séchoir solaire indirect à convection forcée ont été présentée par FEVZI et al. [23], le dispositif de cette étude est présenté dans la figure I.1.

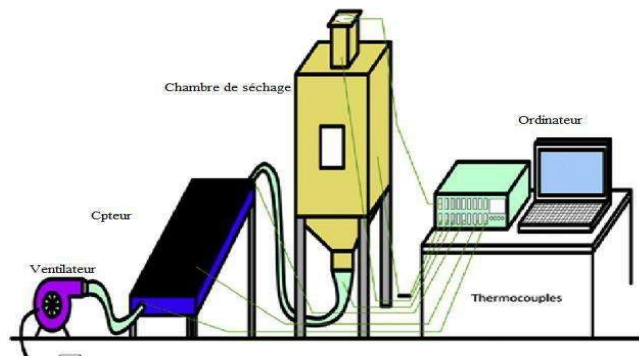


Figure I. 1 : *Vue schématique du séchoir avec capteur solaire à air [23].*

Le capteur solaire utilisé contient un absorbeur plat galvanisé muni d'ailettes fixes inclinées avec trois angles différents (30° , 45° et 60°) (Fig. I. 2). Ils ont conclu que le débit massique de l'air est directement proportionnel à l'efficacité du capteur qui peut atteindre 63 % pour un débit de 0,033 kg/s. Cette efficacité est nettement plus importante que celle d'un capteur classique avec absorbeur simple dont l'efficacité varie entre 20 et 25 %. Le séchoir solaire développé a réduit le temps de séchage à 7 h au lieu de 22 h pour un séchage à l'air libre. Les chercheurs ont développé aussi un nouveau modèle mathématique de la teneur en humidité donnant des résultats plus fiables pour le basilic sucré et les produits feuillus.



Figure I. 2 : *Capteur solaire à air avec ailettes.*

MOHANRAJ et al. [29] ont réalisé une autre étude expérimentale sur le séchage du piment dans un séchoir solaire indirect à convection forcée. Ce dispositif comporte une chambre de séchage connectée à un capteur solaire (voir Fig. I.3). Le capteur utilise un mélange de sable et de résidus d'aluminium comme matériau de stockage thermique durant les heures

d'ensoleillement. Le séchoir a une capacité maximale d'environ 50 kg de piment. Le capteur solaire est installé avec une inclinaison d'environ 25° par rapport à l'horizontale. Grâce à l'intégration du système de stockage thermique, le séchage peut être prolongé d'environ 4 heures par jour, tout en assurant une température de l'air relativement constante. Le taux d'humidité du piment diminue ainsi de 72,8 % initialement à environ 9,2 % dans le plateau inférieur et 9,7 % dans le plateau supérieur. Le rendement thermique global du séchoir a été évalué à près de 21 %.



Figure I. 3 : La configuration expérimentale du séchoir solaire [29].

I.2.1 Séchoir solaire avec capteur à absorbeur inversé

Les capteurs solaires plans conventionnels présentent des pertes significatives de chaleur par rayonnement et convection. Réduire ces pertes peut améliorer l'efficacité thermique du capteur. Dans une étude menée par SAKUTA et al. [30], un nouveau concept de capteur solaire à absorbeur inversé a été développé. Dans ce concept, la plaque absorbante est positionnée horizontalement et orientée vers le bas. Un réflecteur cylindrique est placé sous cette plaque pour réfléchir le rayonnement solaire. De plus, un vitrage est disposé sous l'absorbeur pour permettre la circulation du fluide caloporteur (voir Fig. I. 4). Les résultats des expériences montrent que ce capteur est capable de convertir l'énergie solaire en températures élevées (environ 200°C), ce qui n'est pas possible avec les capteurs solaires plans conventionnels.

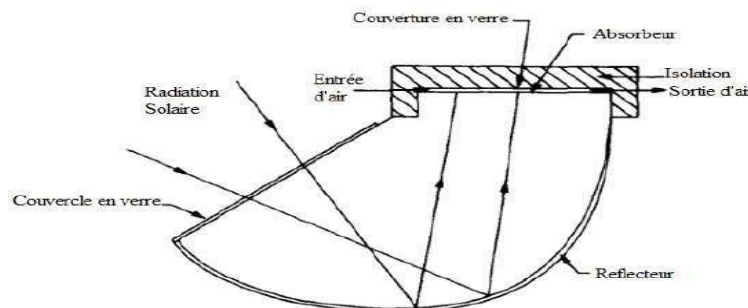


Figure I. 4 : Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé.

Chandra et al. [31] ont réalisé une étude numérique sur une modification d'un capteur solaire à absorbeur inversé, comprenant deux plaques absorbantes séparées par un vitrage (voir Fig. I. 5). Ce capteur fonctionne selon un système à deux passages : l'air circule d'abord entre l'absorbeur 1 et le vitrage 2, puis entre l'absorbeur 2 et le vitrage 2. La méthode globale a été utilisée pour modéliser thermiquement ce capteur. Les résultats ont montré que les performances du capteur modifié sont supérieures à celles d'un capteur à absorbeur inversé simple [30] et d'un capteur plat classique. La configuration à double passage permet d'atteindre des températures de l'air plus élevées que la configuration à simple passage. Cependant, la perte de pression est moins importante dans cette dernière configuration.

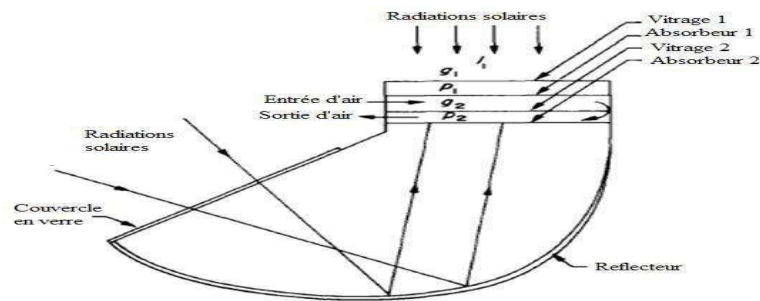


Figure I.5 : *Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé double passes.*

Goelet et al. [32] ont présenté deux versions modifiées du capteur à absorbeur inversé original. Les nouvelles conceptions sont de type simple et double absorbeur (Fig. I. 6). Les performances thermiques de ces capteurs sont comparées à celle d'un capteur à un seul absorbeur et celle d'un capteur plan normal. La méthode globale a été utilisée pour la modélisation des capteurs et validée expérimentalement. Ils ont constaté que la conception à deux absorbeurs donne les meilleures performances thermiques par rapport aux autres configurations. Ce type de capteur peut donner des températures supérieures à 100 °C.

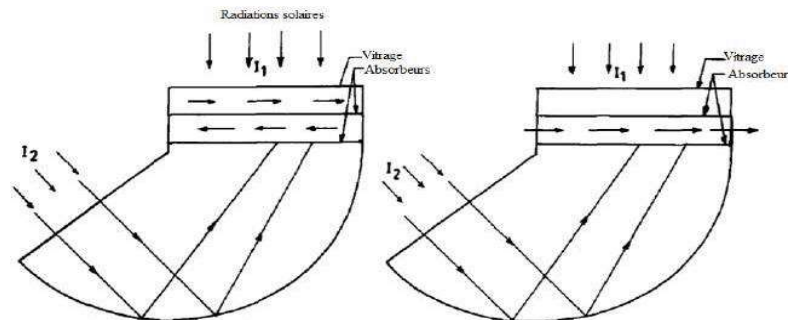


Figure I. 6 : *Vue Schématique d'un capteur solaire à absorbeur inversé type plaque absorbantes.*

GOYAL et TIWAR [33, 34] ont développé et analysé un séchoir solaire contenant une chambre de séchage et un absorbeur inversé comme dispositif chauffant (Fig. 7). La plaque absorbante est horizontalement orientée vers le bas. Un réflecteur cylindrique est placé en dessous pour réfléchir le rayonnement solaire par le haut. La chambre de séchage est montée sur l'absorbeur avec un espace de 0,03 m pour que la circulation de l'air s'écoule. L'inclinaison du vitrage est de 45° . Les performances thermiques du séchoir proposé sont analysées en utilisant la méthode globale et la technique des différences finies. Les résultats obtenus montrent que le séchoir proposé peut fonctionner plus longtemps et fournir une température plus élevée que les séchoirs standards. Le séchage de la récolte est plus uniforme puisque la culture n'est pas exposée directement au rayonnement.

Dans le but d'améliorer les performances d'un séchoir solaire, Jain [35] a proposé une modification du modèle développé par GOYAL et TIWARI [32][24], en y intégrant un lit de gravier de 0,15 m d'épaisseur comme unité de stockage thermique, ainsi qu'une cheminée solaire équipée d'un système de stockage à base de granit pour générer un flux d'air naturel accéléré (voir Fig. I.8). Ce dispositif a permis de sécher 95 kg d'oignons, en faisant passer leur teneur en humidité de 6,14 à 0,27 kg d'eau par kg de matière sèche en 24 heures de séchage. Ce type de séchoir solaire ne nécessite aucune source d'énergie externe pour fonctionner. Pour modéliser le système, une approche globale a été adoptée, reposant sur les connaissances des coefficients de transfert de chaleur et de masse entre les différents éléments du séchoir. L'auteur a conclu que le stockage thermique joue un rôle crucial en stabilisant la température, prolongeant la durée de fonctionnement et réduisant ainsi le temps total de séchage.

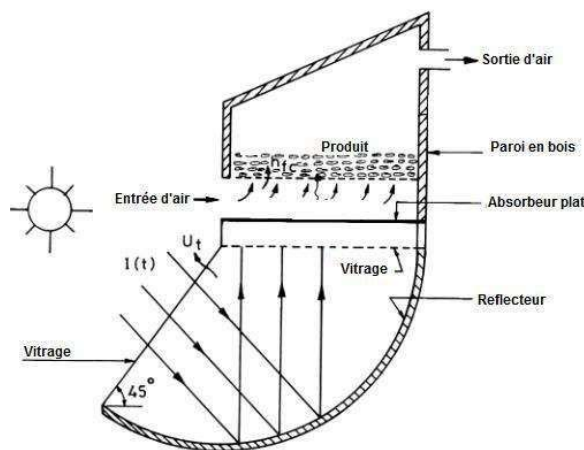


Figure I. 7 : Séchoir solaire à absorbeur inversé.

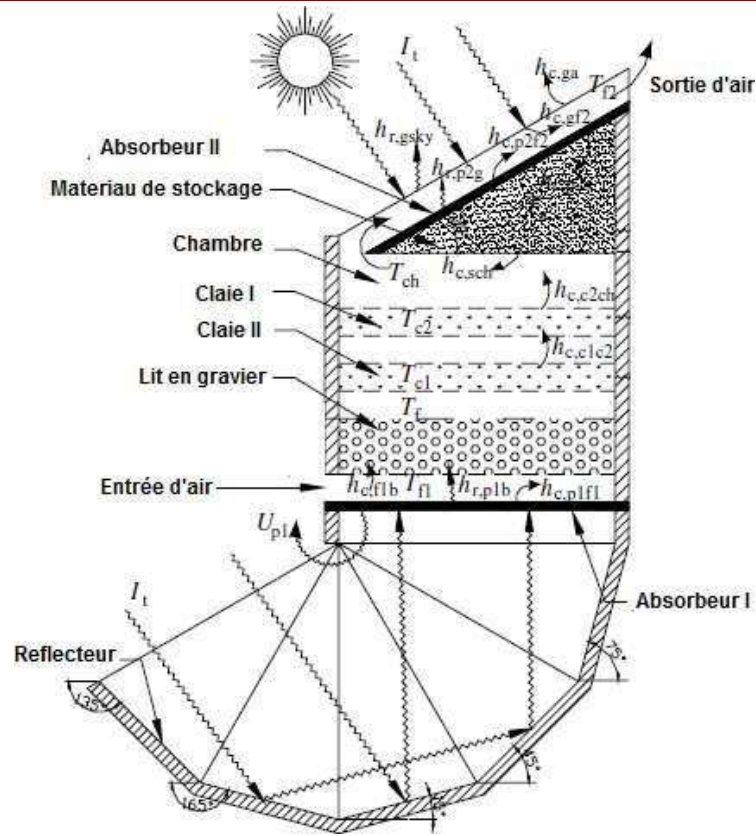
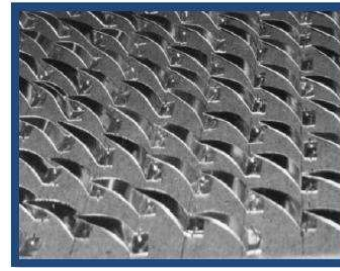


Figure I. 8 : Séchoir solaire à absorbeur inversé avec stockage thermique et cheminée solaire.

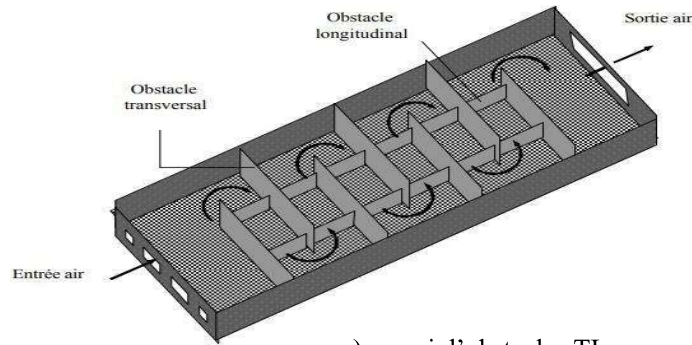
Ahmed Zaïd présentent une comparaison entre les résultats obtenus dans les cas du capteur solaire muni d'obstacles et du capteur sans obstacles (SC). Les différentes formes étudiées, à la fois simples et intéressantes, concernent, comme le montre la figure I.9, les chicanes Delta Cintrées Longitudinalement (DCL), Ogivales Cintrées Longitudinalement (OCL) et transversales longitudinales (TL) Après analyse des résultats, le capteur muni d'obstacles TL paraît le meilleur [3].



a)- DCL



b)- OCL



c)- muni d'obstacles TL

Figure I.9 : Capteur avec disposition d'obstacles, DCL, OCL et muni d'obstacles TL [3].

Moumami et al. [4] travers une étude expérimentale sur un banc d'essai comprenant un convertisseur solaire. Ils ont créé un écoulement turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière par l'utilisation des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement et qui permettent de réduire les zones mortes. Fig. (I.10)

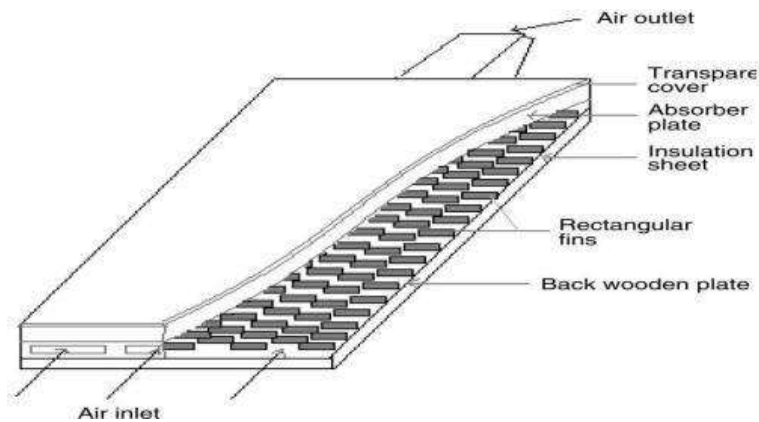


Figure I.10 : Capteur avec des chicanes rectangulaire sur la plaque inférieure en bois. [4].

Par comparaison de ce type de capteurs avec un autre sans obstacles, utilisant deux types d'absorbeurs, sélectif et non sélectif, l'auteur a trouvé que la sélectivité de l'absorbeur ne présente pas une amélioration remarquable en présence des plaques rectangulaires. Ils ont donné également une approche approximative du coefficient du transfert convectif dans le canal d'air tenant compte de la géométrie de l'absorbeur et de la nature de l'écoulement. S. YUCEF ALI a étudié expérimentalement un capteur solaire plan à air muni de rugosités dans le canal d'écoulement du fluide caloporteur. Ces obstacles dits chicanes sous forme de plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur [5].

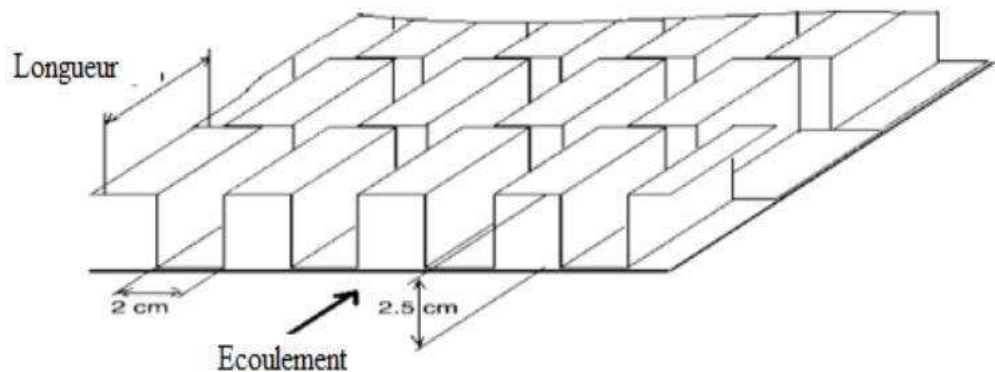


Figure I.11 : *Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur [5].*

Parallèlement, des essais expérimentaux ont été menés afin de comparer les performances d'un capteur solaire à double vitrage avec celles d'un capteur à triple vitrage. Les résultats ont révélé que l'ajout de plaques supplémentaires améliore le transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'air, ce qui permet de limiter les pertes thermiques vers l'extérieur et d'augmenter l'efficacité globale du système. Il a également été démontré que les capteurs à triple vitrage surpassent ceux à double vitrage en termes de performance, en réduisant davantage les pertes thermiques [5]. Plus récemment, K. AOUES et collaborateurs ont proposé une approche théorique pour optimiser le coefficient de transfert convectif entre le fluide caloporteur et la plaque absorbante. Leur méthode consiste à intégrer des chicanes cylindriques disposées perpendiculairement au flux d'air, dans le canal d'écoulement situé entre l'absorbeur et l'isolant [7]. Les différentes configurations cylindriques examinées dans cette étude sont illustrées à la Figure (I.12) [7].

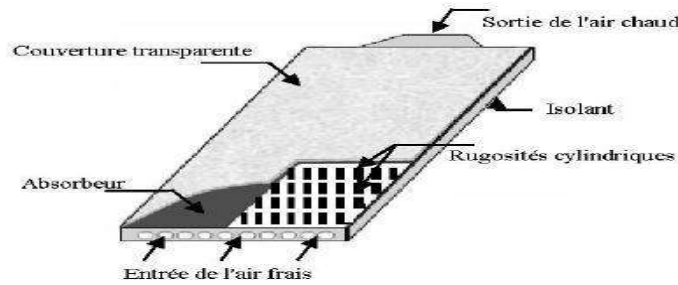


Figure I.12 : Capteur plan à air muni de rugosités [7].

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en rangés alignées.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces.

K. AOUES et al. ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur

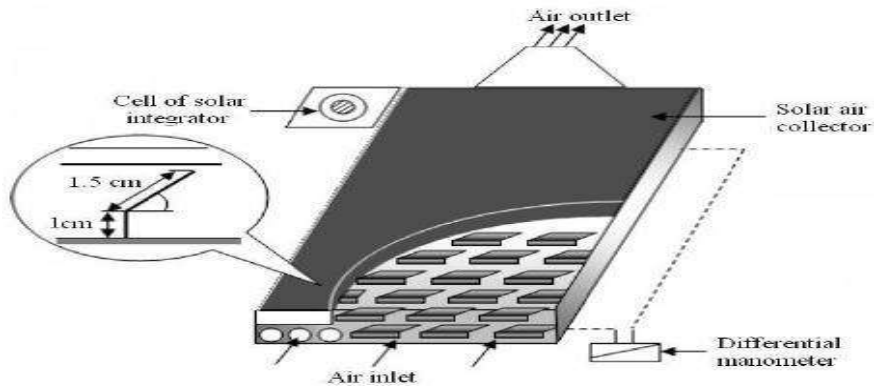


Figure I.13 : Dispositif expérimental.

La veine d'air dynamique du capteur est de 25mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant, cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle α respectivement égale à 60° et 120° . Ces chicanes sont espacées d'une distance respectivement à $d=10$ cm et $d=5$ cm suivant deux configurations A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes (figure I-13).

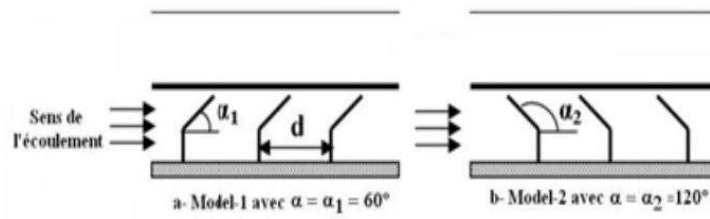


Figure I.14 : Schéma descriptif des chicanes.

Après une série de tests expérimentaux, les auteurs ont conclu que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important et ont trouvé que les chicanes modèle 1 ($\alpha = 60^\circ$) placées dans les configurations A1, B1 donnent les meilleurs résultats par rapport à ceux des configurations A2, B2 qui sont des chicanes modèles 2 ($\alpha = 120^\circ$). Cela s'explique par le fait que les chicanes du modèle 1 permettent l'orientation du fluide caloporteur en écoulement vers la plaque absorbante, d'où l'augmentation des échanges convectifs. Par contre, les chicanes du modèle 2 orientent le fluide caloporteur vers la plaque inférieure [16].

Chabane et al [5] a mené une étude expérimentale sur les collecteurs thermiques plans sans ailettes (type A) et avec ailettes longitudinales type (B) (voire figure I.14). Il a conclu que les collecteurs de type B (avec ailettes) ont une efficacité thermique plus grande que les collecteurs de type A (sans ailettes) pour le même débit d'air $m = 0,015 \text{ kg} / \text{s}$. Cette différence atteint une valeur de 15,93 % pour une intensité solaire de $285 \text{ W} / \text{m}^2$.

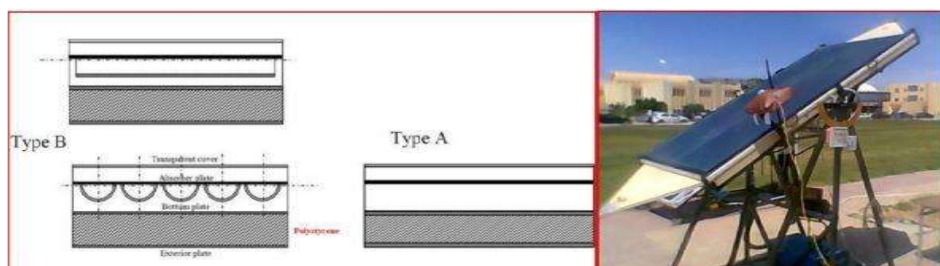


Figure I.15 : Schéma descriptif des chicanes.

Chabane et al, [21] ont ajouté des ailettes supplémentaires pour présenter les performances thermiques d'un capteur solaire. Nous avons mené une expérience pour comparer les performances thermiques d'un capteur solaire à air avec et sans déflecteur semi-cylindrique. Il représentait l'angle d'inclinaison optimal de la ville de Biskra lorsque l'on tentait de modifier les temps de débits massiques pour les deux configurations correspondant à l'angle

d'inclinaison 37° . Les paramètres les plus importants sont les mesures de température de sortie, d'entrée et ambiante, ainsi que la couverture en fonction de la vitesse du vent.

Des expérimentations sur un capteur solaire conçu à cet effet ont permis de déterminer le rendement thermique de capteurs solaires avec et sans déflecteurs semi-cylindriques à différents intervalles de débit pour suivre effectivement l'évolution de la température de sortie du capteur solaire.



Figure II.16 : *Montage expérimental (avec et sans ailerons). [21].*

Ils ont trouvé que les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité thermique et la température de sortie de capteur solaire avec chicanes sont améliorées par contre sans chicanes.



Figure II.17 : *Absorbeur chicanes de forme semi-cylindrique [21].*

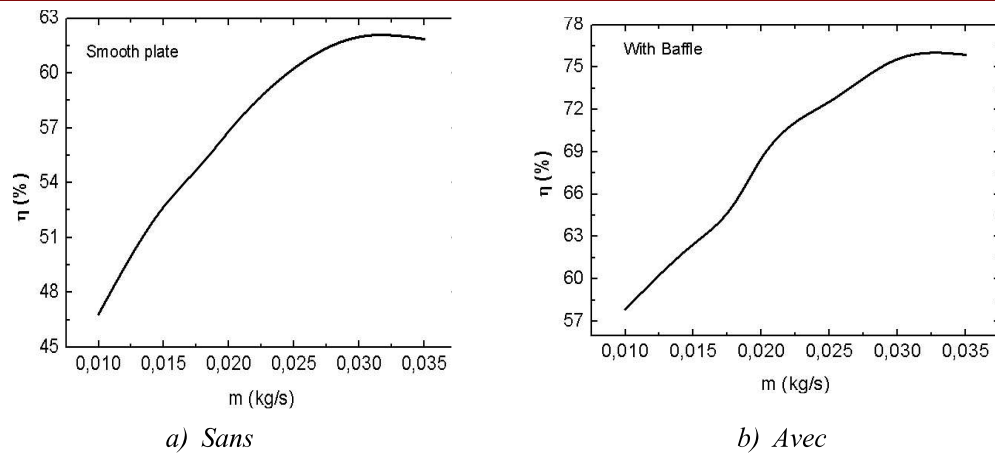


Figure II.18 : Efficacité thermique en fonction du débit massique d'air [21].

Dans le but d'améliorer le rendement des capteurs solaires, A. MOUMMI et al. [22] ont travaillé sur la création d'un flux turbulent accru entre l'absorbeur et la plaque inférieure en bois. Pour ce faire, ils ont utilisé des obstacles de formes variées. Dans cette étude, ils ont choisi d'insérer des ailettes rectangulaires perpendiculaires au flux. Les espaces entre les ailettes d'une même rangée permettent un bon écoulement du fluide et réduisent les zones mortes. Par la suite, ils ont évalué le coefficient de transfert pour cette configuration, en comparant les résultats à ceux obtenus avec un capteur solaire à air sans ailettes, utilisant deux types d'absorbeurs : sélectifs en cuivre ou non sélectifs en aluminium peint en noir.

Ils ont déterminé les profils de température de l'air et de la plaque absorbante en présence d'ailettes rectangulaires à l'issue de cette étude grâce aux expériences menées. L'ajout d'ailettes permet un transfert de chaleur accru, comme en témoignent des valeurs enregistrées. En présence d'ailettes, la sélectivité de l'absorbeur ne montre pas d'amélioration significative. Ceci s'explique par le fait qu'un absorbeur non sélectif s'échauffe en l'absence d'ailettes et émet à un rythme plus élevé, entraînant des pertes thermiques plus élevées, alors qu'un absorbeur sélectif a des pertes plus faibles et la différence de coefficients d'émission est compensée par la présence d'ailettes qui refroidissent l'absorbeur. Ils ont également fourni une estimation.

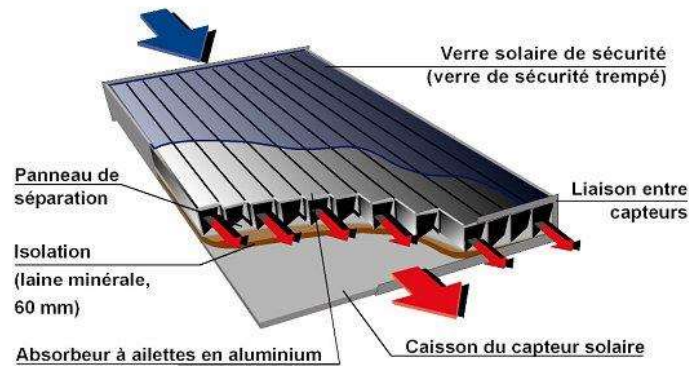


Figure II.19 : Capteur solaire avec système à ailettes sur la plaque arrière en bois [22].

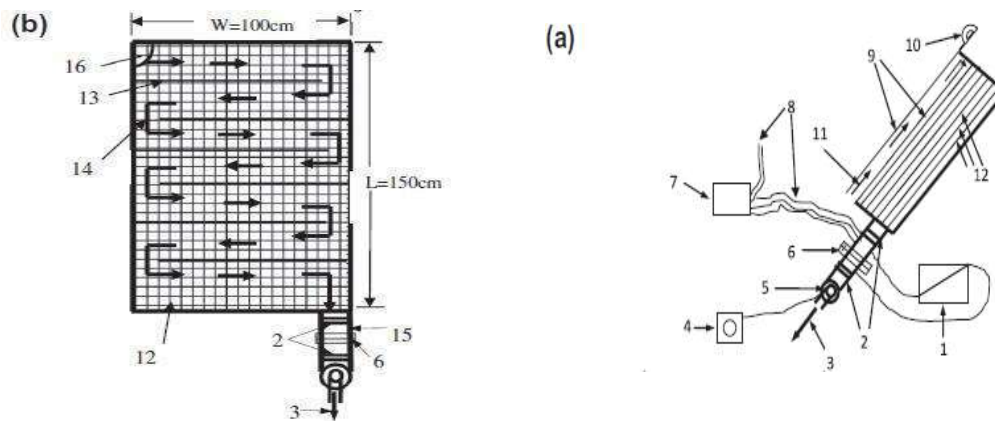


Figure II.20 : (a) schéma d'assemblage et (b) vue de face de système [26].

M.F. ELKHAWJAH et al, [26] ont utilisés un réchauffeur d'air solaire à double passage avec 2, 4 et 6 ailettes ont été étudiées. Au lieu d'une plaque absorbante, des couches ont été utilisées entre les ailettes. Effets du débit massique d'air sur la température de sortie et l'efficacité thermique. Les résultats indiqués montrent que l'augmentation du débit massique augmente l'efficacité pour la plage de débit. Voir figure I.20. Le débit variait de 0,0121 à 0,042 kg/s dans cette étude. De plus, l'utilisation de six ailettes au même débit massique a permis d'obtenir le rendement le plus élevé. Pour le débit massique de 1 ml/s, l'efficacité maximale obtenue pour les 2, 4 et 6 ailettes de ce système était de 75,0 %, 82,1 % et 85,9 %, respectivement. De plus, pour 6 ailettes, la différence de température moyenne maximale entre l'entrée et la sortie, était plus élevé par rapport 2 et 4 ailettes pour les mêmes débits massiques. Lorsque le débit massique était de 0,0121 kg/s, les températures pour les 6 ailettes étaient respectivement de 43,1 C° et 62,1 C°. Les résultats d'un compteur sont comparés. L'efficacité

thermique du collecteur à lit tassé est nettement supérieure à celle d'un collecteur conventionnel lorsqu'on le compare.

D. PASHENKO [28] a utilisé une modélisation numérique des processus thermiques et aérodynamiques, l'étude est réalisée au moyen d'un ANSYS Fluent Solver avec un calculateur solaire intégré pour la ville de Samara, en Russie. L'influence de la conception (l'étape entre les ailettes) et des variables technologiques (le nombre de Reynolds) sur les processus d'échange de chaleur et le débit l'aérodynamique a été établie lors de l'analyse CFD

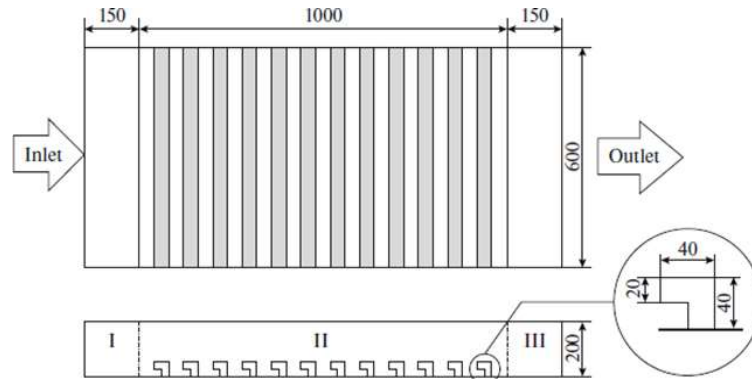


Figure I.21 : *Domaine de calcul : (I) zone d'entrée d'air, (II) zone d'échange de chaleur et (III) zone de sortie [28].*

La distribution de vitesse, pression, contours et autres caractéristiques du flux d'air dans la boîte de chauffe-air solaire ont été obtenus. Il a été établi que le nombre moyen de Nusselt augmente avec une diminution du pas des ailettes. En moyenne, pour diverses valeurs du nombre de Reynolds, le Nusselt le nombre pour le pas de 30 mm est de 5 à 7 % supérieur au Nombre de Nusselt obtenu pour le pas de 60mm.

La valeur de la caractéristique thermo aérodynamique utilisée pour déterminer la conception de capteur, qui est dans la plage entre 1,62 et 1,91, a été déterminée pour divers fin hauteurs et nombres de Reynolds. La valeur maximale de la caractéristique thermo aérodynamique pour le solaire réchauffeur d'air avec une surface absorbant la lumière à ailettes, qui est optimal pour ces paramètres, vaut 1,91 pour $Re = 1500$ et un pas minimum des ailettes d'essai de 30mm.

A. LABED et al, [30] ont présentés une étude pour améliorer la performance d'un capteur solaire air, le système étudié est un capteur solaire à simple passage composé d'une vitre, une plaque absorbante mince en acier galvanisé peint en noir mat, Une plaque arrière mince en

acier galvanisé placée sur l'isolant et d'une isolation arrière qui est assurée grâce à une feuille de polystyrène, la veine d'air dynamique d'une hauteur de 25mm.

Après une série des tests expérimentaux, il a trouvé que les résultats expérimentaux sont valides par les résultats théoriques, et conclu que l'emplacement de ce type des chicanes affecte avec un pourcentage important sur l'échange thermique. Dans le présent travail expérimental, les tests effectués nous ont permis de mesurer les températures, le rayonnement solaire global et la vitesse du vent pendant que le capteur solaire plan à air est orienté en plein sud, sachant que l'angle de l'inclinaison est de 30° . (Figure I.24)

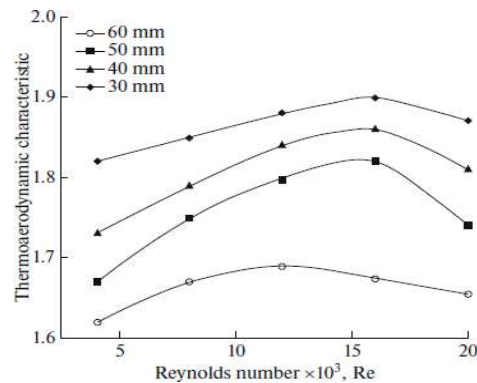


Figure I.22 : variation des caractères thermo-aérodynamique avec nombre de Reynolds [28].

Le graphique montre l'effet du nombre de Reynolds (Re) sur la caractéristique thermo-aérodynamique pour quatre longueurs différentes (30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm). On observe que la performance s'améliore avec l'augmentation de Re jusqu'à un certain point, puis commence à diminuer. De plus, les longueurs plus courtes (comme 30 mm) offrent de meilleures performances pour une même valeur de Re par rapport aux longueurs plus grandes.

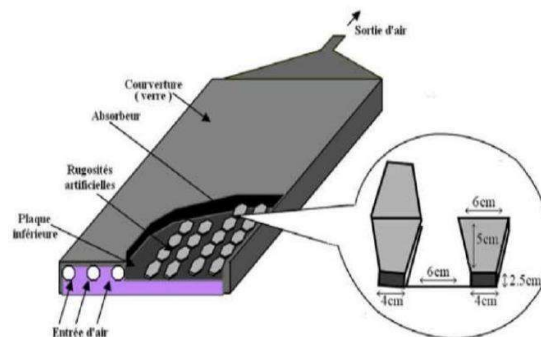


Figure I.23 : Schéma expérimental du capteur solaire [30].



Figure I .24 : *Isolation thermique du capteur plan à air [30].*

L'isolation thermique vers l'arrière du capteur est assurée par la superposition d'une couche de polystyrène de 30 mm, tandis que l'isolation latérale est assurée par le fer de la bâtée d'une épaisseur de 1mm comme indiqué par la (Figure I.24).

I.2.2 Conception et réalisation du capteur plan à air

Le dispositif expérimental est fabriqué d'un simple conduit rectangulaire en bois, il a les dimensions de la section transversale interne de $1450 \times 600 \times 110 \text{ mm}^3$. Ce conduit est composé de trois parties, à avoir une longueur de 1000 mm de la section testée, une longueur d'entrée et une longueur de dimensions 450 mm respectivement (Figure I .25). L'air entre d'abord dans la longueur d'entrée pour garantir le développement hydrodynamique de l'écoulement avant d'être acheminer vers la section de test, tandis que la longueur de sortie, est pour réduire les effets de bout, ce qui rend l'air très mélangé et hydro dynamiquement développé avant de quitter le dispositif expérimental définitivement.

Les longueurs d'entrée sont thermiquement bien isolées à l'aide d'une couche de polystyrène de 30 cm d'épaisseur, ensuite, le tout est recouvert d'une couche fine de fer pour empêcher que le rayonnement direct tombe sur les surfaces de ces longueurs et aussi, pour éviter que les points de mesures des températures de l'air circulant soient affectés comme le montre parla (Figure I .25).

Il y a deux types des chicanes sont fabriquées en fer de formes chanfreinés, placées transversalement sur le fond du canal d'écoulement (Partie testée uniquement) avec un pas entre eux de 8 cm, pour prolonger le parcours et la recirculation de l'air afin d'améliorer les performances thermiques.



Figure I.26 : *Forme et emplacement des chicanes étudiées.*



Figure I.25 : *Isolation thermique des longueurs d'entrée*

I.3 CONCLUSION

En conclusion, l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans les systèmes de stockage de chaleur constitue une avancée majeure dans la gestion énergétique moderne. Grâce à leur capacité à stocker et à restituer efficacement l'énergie thermique, les PCM offrent des solutions fiables face aux défis croissants liés à la demande énergétique et à la nécessité de préserver l'environnement.

Le recours aux PCM permet non seulement d'optimiser la consommation d'énergie dans les bâtiments et les infrastructures, mais contribue également à une meilleure intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique. En réduisant les pics de demande et en assurant une source de chaleur stable, ces matériaux jouent un rôle clé dans la transition vers des systèmes énergétiques plus durables et résilients.

Toutefois, pour tirer pleinement parti de cette technologie, il est nécessaire de surmonter certains obstacles, notamment le coût des matériaux et les contraintes de conception. Une recherche continue et une innovation soutenue sont indispensables pour améliorer les performances des PCM et étendre leur champ d'application à de nouveaux domaines.

En somme, l'utilisation des PCM dans le stockage thermique représente une perspective prometteuse pour renforcer l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte environnementale, ouvrant ainsi la voie à un avenir énergétique plus durable.

Chapitre II :
Le Séchage Solaire : Principes,
Méthodes et Paramètres de
l’Air

II.1 Introduction

Le séchage, en particulier le séchage solaire, représente l'une des méthodes les plus anciennes employées par l'homme pour la conservation des produits agroalimentaires. Cette technique consiste à exposer les produits à la lumière du soleil et à l'air ambiant. Dans ce chapitre, nous explorerons les diverses méthodes de séchage solaire ainsi que leurs principales applications.

II.2 Séchage**II.2.1 Définition**

Parmi les nombreuses techniques de conservation utilisées dans l'industrie agroalimentaire, le séchage occupe une place essentielle. L'opération unitaire visant à éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide est appelée le séchage. Le terme "déshydratation" a un sens plus restreint, se référant uniquement à l'élimination de l'eau dans un solide ou un liquide. Le séchage est une opération qui vise à réduire l'activité liquide d'un produit jusqu'à un seuil en dessous duquel les réactions enzymatiques, l'oxydation et le développement des microorganismes sont inhibés. [17] [18].

II.2.2 Historique :

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [19].

II.2.3 Intérêt du séchage

Le séchage offre de nombreux avantages, parmi lesquels on peut citer.[20] :

- D'alléger le produit.
- De permettre (ou de faciliter) surtout sa conservation par diminution de 'l'activité de l'eau'. Mais en revanche :
- Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

II.2.4 Principes de séchage

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, où celle-ci se vaporise. Cependant, en réalité, ce principe n'est pas le plus couramment utilisé, et il est souvent préférable de travailler à des températures plus basses en utilisant l'air comme gaz d'entraînement.

II.3 Différents méthodes du séchage

II.3.1 Séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. [20]

Tableau II.1 : Quelques exemples des méthodes de séchage [20].

Opération	Technique	Mécanisme	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation force	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduelles
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum
Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

On pourrait ajouter à cette liste l'osmose inverse (concentration des jus de fruits) bien que cette technique constitue un cas limite plus assimilable à une opération de transfert de masse qu'à un processus de transfert de quantité de mouvement et que l'eau subisse déjà une sorte de changement d'état puisqu'elle passe à l'état de solution dans la membrane.

L'élimination d'eau par voie mécanique se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur.

II.3.2 Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,) pour extraire l'eau.

II.3.3 Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.

- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

Le séchage thermique se divise lui-même en deux types :

a)- Séchage par ébullition

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur P de l'eau de ce liquide est égale à la pression totale ambiante P_t : $P = P_t$. L'ébullition proprement dite (formation de bulles de vapeur d'eau) est plus difficile à observer dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides. L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué :

- Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou demicro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [20]

b)- Séchage par entraînement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

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

Un exemple typique du début de séchage d'un produit très hydraté, Les concentrations de l'air en eau sont exprimées en pressions partielles d'eau (en Pascal). Le séchage est dit 'isenthalpique' si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud. L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau enlevée : entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud.

Le séchage par entraînement est plus important par rapport au séchage par ébullition. Généralement l'intérêt se limite à ce premier mode de séchage. Les séchoirs à "entraînement" peuvent être divisés en deux catégories :

1- Le séchage actif

Les séchoirs utilisés dans ce processus de séchage sont équipés d'isolateurs (capteurs) qui sont placés en amont d'une chambre de séchage. Leur fonction principale est de préchauffer l'air avant de le diriger dans cette chambre. Ces isolateurs sont variés, avec environ un tiers

d'entre eux fonctionnant en convection naturelle et les deux tiers restants en convection forcée. Certains de ces isolateurs peuvent être équipés d'un système de chauffage d'appoint ou de recyclage pour améliorer leurs performances, particulièrement dans les pays industrialisés. En général, ces types de séchoirs sont qualifiés de séchoirs indirects, et ils sont caractérisés par leur isenthalpie, c'est-à-dire que l'enthalpie de l'air ne change pas pendant le processus [21].

2- Le séchage passif

Qui sont constitués d'une enceinte dont le toit et (ou) les côtés en matériau transparent laissent pénétrer le soleil. Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeur. Ces séchoirs sont dits séchoirs serres directs. Si le rayonnement détériore le produit ; on interpose alors entre la couverture transparente et le produit une surface opaque servant d'absorbeur. Ce genre de séchoir est dit séchoir serre indirect.

Quant aux séchoirs mixtes qui sont peu présentés ; ceux sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement. Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpique.

II.4 Caractéristiques de l'air de séchage

II.4.1 L'humidité :

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

II.4.2 L'humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \left[Kg_v.Kg_{as}^{-1} \right] \quad (II.1)$$

Avec :

M_a : Masse d'air Kg_v

M_e : Masse d'eau en Kg_{as}

II.4.3 Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température [22] [23] :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \times 100 \quad (0\% \leq H_r \leq 100\%) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

P_v : Pression partielle de vapeur en (Pa).

P_s : Pression de saturation de vapeur en (Pa).

II.4.4 Température sèche :

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant [24].

II.4.5 Température humide du gaz :

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement [24].

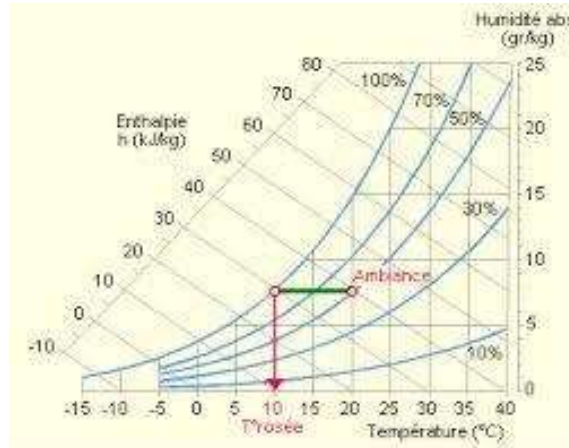


Figure II. 1 : Température humide du gaz. [60]

II.5 Caractéristiques des solides humides

Le solide à un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. Soit une masse (M_h) de matériau humide contenant une masse M_e d'eau et une masse M_s de matière sèche [25] [17] :

$$M_h = M_e + M_s \quad (\text{II.3})$$

II.5.1 Humidité absolue :

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur (kgav/kgas) en eau à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche exprimée par la relation suivante [25][17] :

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_e + M_s}{M_s} \quad (\text{II.4})$$

II.5.2 Teneur en eau à base humide :

L'humidité relative où titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime parla masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X_r = \frac{M_e}{M_s + M_e} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{II.5})$$

II.5.3 Taux d'humidité :

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

II.5.4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [25]

$$Y_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

II.5.5 Activité de l'eau :

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide « a_w », par le rapport de la pression (P_{vp}) (de la vapeur à la surface du produit) et de la pression (P_{sat}) (de la vapeur saturante à la température de surface du produit). Si le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux), il en résulte que la pression (P_{vp}) s'égale avec la pression partielle de vapeur (P_v) dans l'air et que l'activité de l'eau du produit et l'humidité relative de l'air deviennent identiques ($a_w = \phi$).

Pour qu'il y ait séchage, il faut que l'humidité relative de l'air soit inférieure à l'activité de l'eau du produit ($a_w < \phi$) de façon à ce que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression partielle de vapeur dans l'air ($P_{vp} > P_v$).

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 [26-28] :

$$A_w = P_{vp}/P_{vs} = HR(\%)/100 \quad (II.7)$$

- 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 (%).

II.5.6 Activité de l'eau dans un produit :

L'activité de l'eau est le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit et la pression de la vapeur d'eau sur la surface plane d'un liquide à la même température.

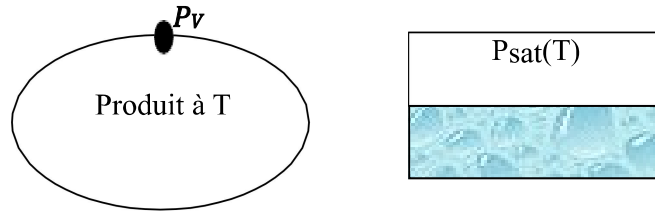


Figure II 2 : Représentation de l'activité de l'eau.

$$a_w = P_v / P_{sat} \quad (II.8)$$

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre, P_v, T, P_{va} et T_a étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air. L'équilibre impose :

- $P_v = T = P_{va}$: pas de transfert de masse
- T_a : pas de transfert de chaleur

Or l'humidité relative de l'air s'écrit :

$$H_r = \left(\frac{P_{va}}{P_{sat}(T)} \right) \times 100 \quad (II.9)$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc également l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. Pour qu'un produit puisse se conserver à température ambiante, son activité (a_w) doit être abaissée en-dessous de 0,6 (les moisissures ne peuvent plus se développer [26-28]).

II.5.7 Transfert de masse d'un produit humide :

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière.

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau [18].

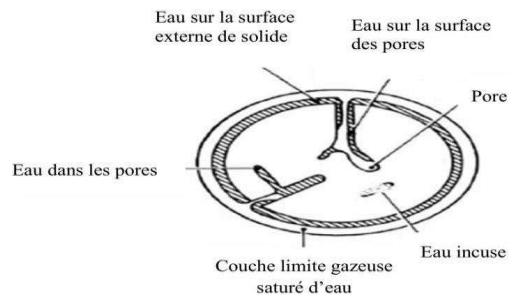


Figure II.3 : Représentation schématique d'un solide humide.

II.5.8 Vitesse de séchage :

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide a séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou toute simplement la limite du quotient de la différence de teneur « Δm » par l'intervalle de temps « Δt », c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse du l'air. [29][21]

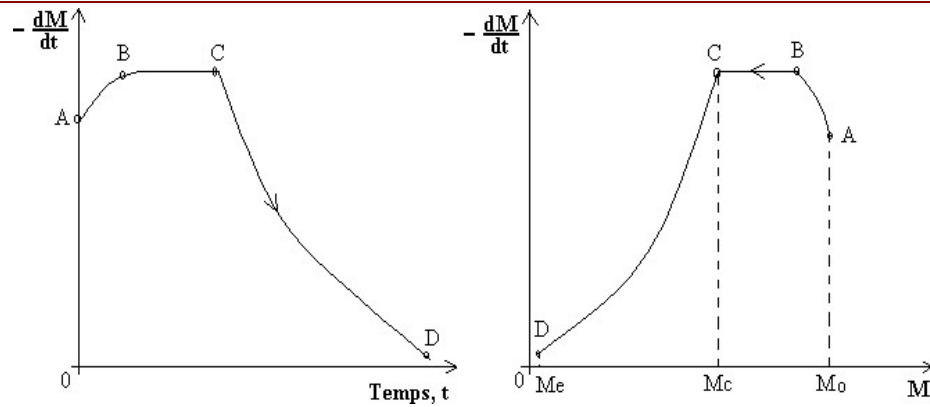


Figure II.4 : Vitesse de séchage en fonction du temps et de la masse.

a)- Courbes de Séchage

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue (X) du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps t ou même la courbe proposée par KRISHER (dX/dt) en fonction de l'humidité absolue X [30].

b) - Cinétique du séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ($Kg_{d'eau}/m^2s$) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent d'une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit [29].

On obtient la courbe de séchage expérimentale en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organoleptiques et nutritionnelles [31] [21].

On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de $\varphi_{eq} = 11\%$ [32].

c)- Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une

couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps [17].

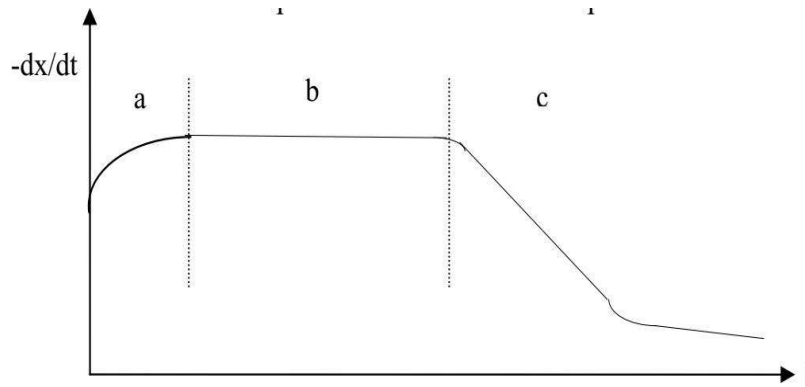


Figure II.5 : Courbe représentée les périodes du séchage en fonction du temps.

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage. Dans (la figure II.5) on distingue trois périodes :

d)- Période de mise en température (région a)

Quand un produit d'une température de surface (T_s) et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global [17].

e)- Période à allure constante (région b)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau.

Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante.

Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de

séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [31][17].

f)- Période de ralentissement (région c)

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit [33] [17]. Cette période représente souvent la quasi-totalité du séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- **Disparition de l'eau libre en surface de produit :** La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.
- **L'épaisseur du produit :** si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.
- **La diffusivité de l'eau dans le produit :** elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes :** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.
- **Le croutage :** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit [17].

II.6 Les séchoirs solaires

Il s'agit d'un dispositif utilisé pour sécher des produits en vue de leur conservation. Il existe différents types de séchoirs, et les séchoirs solaires sont généralement classés en plusieurs catégories selon leur mode de chauffage ou de fonctionnement, comme illustré dans la figure (II.6).

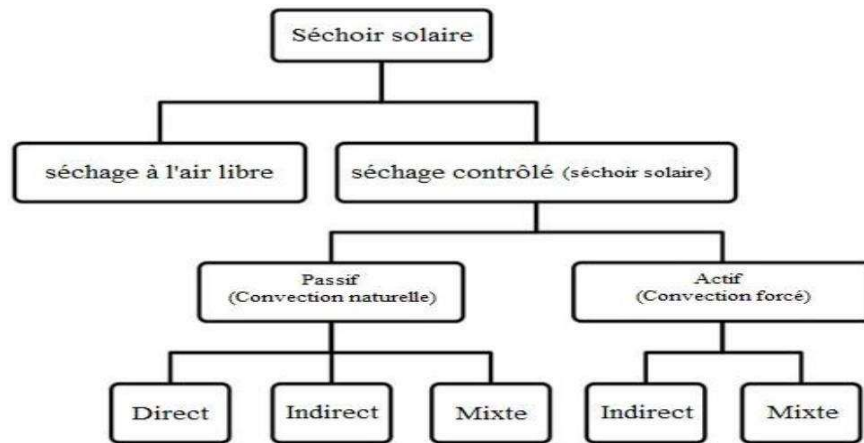


Figure II.6 : *Différents systèmes du séchage solaire.*

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [34] :

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

II.6.1 Les séchoirs solaires directs

Par définition, les rayons du soleil frappent directement sur ces séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques composés d'un châssis vitré sous lequel sont disposées des clayettes pour les produits à sécher. Une circulation d'air se produit à travers l'appareil grâce à un tirage naturel résultant du réchauffement (effet cheminée) ou grâce à l'action du vent sur les ouvertures, mais l'utilisation d'un ventilateur est rare en raison de la simplicité des modèles.

a)- Principe de fonctionnement

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 collecteur 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).

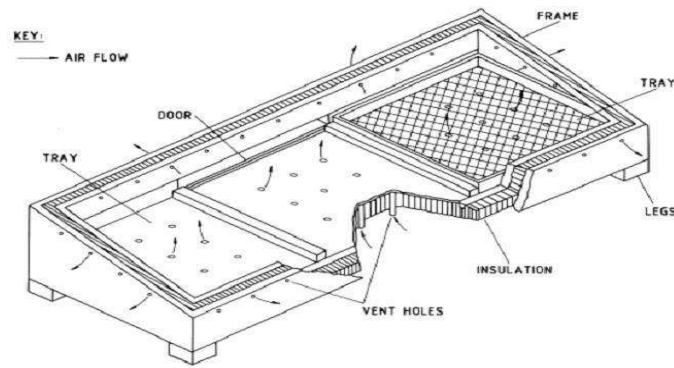


Figure II.7 : *Le séchoir solaire direct.*

b)- Les avantages

- Les produits sont mieux protégés contre les poussières, des mouches et autres insectes, et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception.

c)- Les inconvénients

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration. [35]
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments [36].

II.6.2 Séchoirs naturels (traditionnel)

Le séchage naturel est un séchoir direct et effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant. Ces séchoirs sont très bon marché, mais supposent une intervention humaine régulière et soutenue : protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre au problème de la conservation temporaire du produit en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant des inconvénients :

- Pertes de produits mal séchés ou gâchés.
- Lors de remuage, destruction de vitamines A et C par l'exposition directe au soleil,
- Dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussière). Ainsi, le séchage du poisson sur le sable peut entraîner des pertes allant jusqu'à 50 % du

fait du développement de larves.

- Une longue durée de séchage.
- L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis.
- L'attaque par les champignons et les insectes (cas du bois).

Toutes ces raisons ont conduit les professionnels à s'orienter vers le séchage artificiel.

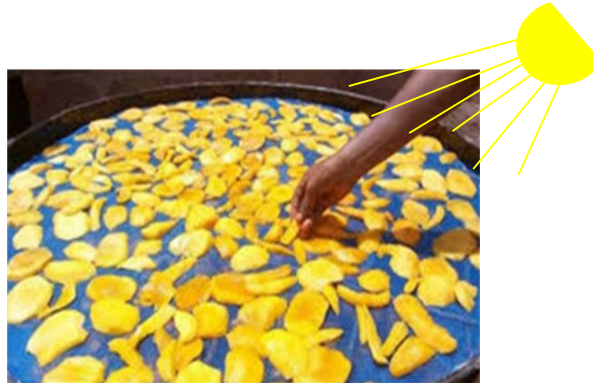


Figure II.8 : Séchage naturel Ou au soleil.

II.6.3 Séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

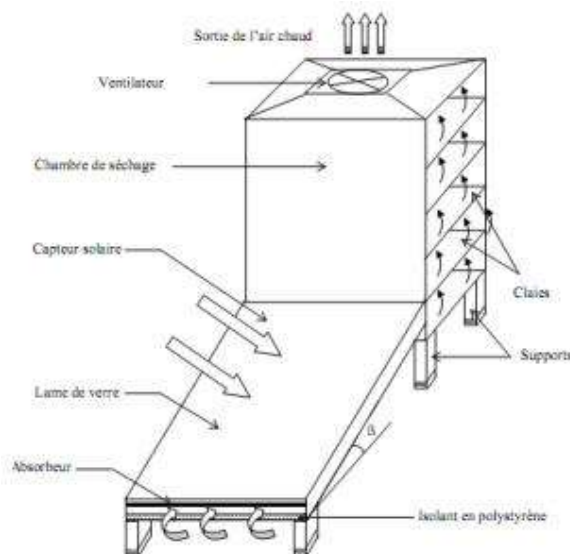


Figure II.9 : Schéma du séchoir solaire [2].

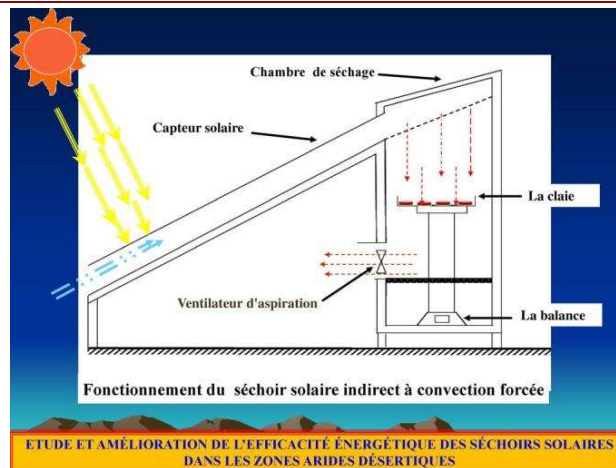


Figure II.10 : Schéma du séchoir solaire [2].

a) - Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure II.9). L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

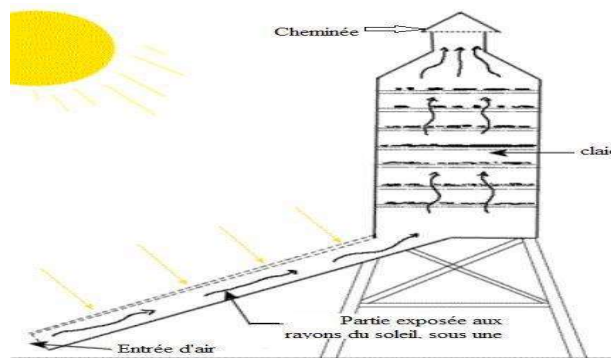


Figure II.11 : Séchoir solaire indirect.

b)- Avantages :

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit. [37]
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [38]

c) - Inconvénients

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la

conception du séchoir.

- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

Le déplacement de l'air peut être produit mécaniquement (ventilateur) mais il est fréquemment possible de faire appel au tirage naturel avec une cheminée solaire éventuellement. Ce type d'appareil est souvent plus compliqué et plus coûteux à construire que le séchoir direct.

Il peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé (séchage pour germination ; produits à faible température Maximum). Il devrait en fait être adopté aussi souvent que possible dans le cas de produits alimentaires. La durée de séchage est très variable et peut être supérieure à celle du séchage naturel. Pendant le séchage, il faut souvent prévoir de faire une ou plusieurs rotations des claies car dans beaucoup de modèles les produits placés dans le haut du séchoir sèchent moins vite que ceux placés en bas.

II.6.4 Les séchoirs mixtes

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Les transferts de chaleur et de vapeur d'eau y sont complexes et assez mal connus.

II.6.5 Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas, de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques.

Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- Le séchage à la vapeur surchauffée.
- Le séchage par pompe à chaleur.
- Le séchage par chambre chaude.
- Le séchage sous vide.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage du bois.

a)- Avantage

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.

- Meilleur contrôle du séchage. [39]
- Forte augmentation de la production par rapport aux autre type des séchoirs solaires, carle dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

b)- Inconvénient

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange. Personnel qualifié pour la maintenance.

II 7. Composants principaux du système

Le système de stockage thermique pour capteurs solaires est un élément clé des systèmes solaires thermiques, permettant de stocker l'énergie thermique collectée par les capteurs pour une utilisation différée. Ces systèmes sont indispensables lorsque l'énergie solaire n'est pas immédiatement consommée, comme la nuit ou par temps nuageux. Le stockage peut être sensible, latent ou chimique, selon la technologie choisie. Le stockage thermique sensible repose sur l'élévation de la température d'un matériau tel que l'eau ou les huiles thermiques. La quantité d'énergie thermique Q stockée est donnée par la relation :

$$Q=m \times c_p \times \Delta T$$

Où m est la masse du matériau de stockage (en kg), c_p est la capacité thermique massique du matériau (en J/kg·K), et ΔT est la variation de température (en Kelvin).

Dans le cas du stockage par chaleur latente, l'énergie stockée au cours du changement de phase est calculée par :

$$Q=m \times L$$

Où L est la chaleur latente du matériau (en J/kg).

Le rendement thermique du capteur solaire, noté η , est souvent calculé par :

$$\frac{uQ}{G \times Q} = \eta$$

a) Le Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible permet de fournir, par le biais d'un flux thermique, de l'énergie à un support de stockage dont la température est différente de celle de l'environnement. Il utilise la chaleur sensible du matériau de stockage, ce qui implique que la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce type de stockage

non isotherme, accumule une quantité de chaleur dans le matériau qui est proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique. Dans le domaine du bâtiment, on utilise des systèmes de stockage d'eau chaude (réservoirs, ballons). Pour les applications à haute température, on utilise des huiles thermiques et des sels fondus, qui jouent un rôle essentiel notamment dans le domaine des centrales solaires thermiques à concentration (CSP). Le stockage sensible intervient aussi bien au niveau du stockage à courte durée (le chauffage sanitaire, chauffage des locaux et séchage solaire) que dans le stockage saisonnier (chauffage des serres, réservoirs d'eau chaude dans les bâtiments, fosses ou puits de stockage thermique (pit storage **).

b) Le Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps. Lors de la transition de phase, le matériau absorbe ou libère une quantité de chaleur liée à la transformation appelée « enthalpie de changement d'état » (ΔH) ou chaleur latente, qui dépend de la quantité de matière mise en jeu. Ainsi, l'énergie stockée puis restituée dépend des propriétés intrinsèques du matériau mais également de la masse du matériau de stockage.

c) Le Stockage thermochimique

Le stockage chimique de la chaleur ou stockage thermochimique, emmagasine l'énergie sous forme de liaisons chimiques lors de réactions réversibles, par exemple solide-gaz. Le stockage thermochimique s'effectue selon plusieurs voies possibles. Il se divise en deux procédés essentiels : les procédés de sorption d'une part (absorption et adsorption), et les réactions thermochimiques d'autre part.

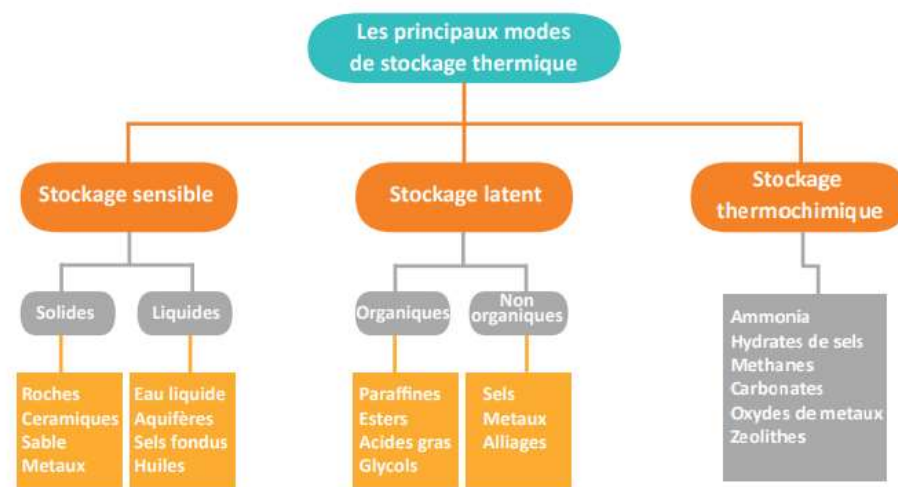


Figure II.12 : Classification des différents types de stockage thermique.

II 8. MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE

Les MCP, appelés matériaux à changement de phase, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [3]. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres. Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine qui sont bon marché avec une densité de stockage thermique modérée et une faible conductivité thermique. Les sels hydratés sont des MCP avec une plus grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase. Farid et al. [4] Ont mis l'accent sur les matériaux MCP (paraffines, sels hydratés), l'encapsulation et d'autres applications, allant du stockage de chaleur et de fraîcheur dans les bâtiments à l'entreposage thermique dans les satellites, ainsi que les vêtements de protection. Kuznik et al. 2008 [5] se sont intéressés à l'évaluation des MCP en se basant sur les propriétés et les applications. Ils ont décrit le MCP comme un matériau possédant la capacité de stocker de l'énergie thermique. L'augmentation de la température provoque un changement d'état solide à liquide par réaction endothermique accompagnée d'une absorption de chaleur. D'autre part, la diminution de la température induit un changement de la phase liquide à la phase solide par réaction exothermique avec une libération de chaleur. Le MCP permet de stabiliser les fluctuations thermiques extrêmes afin que les variations se fassent plus lentement dans le bâtiment pour réduire la quantité de chauffage ou de refroidissement diminuant ainsi la consommation en carburant ainsi que les émissions en CO₂.

8.1 Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique [6]. Cependant, il n'existe aucune méthode privilégiée.

Cependant, dans notre étude, nous utiliserons la paraffine pour l'expérience

8.2. Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{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 variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22$ °C), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4$ °C) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4$ °C) [7].

A) - Avantages

En général, plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont grandes. En utilisant cette relation, des mélanges de différentes paraffines peuvent être faits pour imaginer le MCP approprié à chaque cas. Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables. En effet, Hadjieva et al. [8] A pu tester la robustesse de trois échantillons de paraffine pendant 900 cycles d'opération. A. Sharma et al. [9] Affirme même que les propriétés des paraffines restent stables après 1500 cycles. Parmi les avantages des paraffines, on peut aussi citer la faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation. De plus, certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion. Enfin, elles sont produites en quantités importantes par l'industrie des procédés chimiques et sont donc facilement disponibles et peu coûteuses.

b) Inconvénients

Cependant, leur conductivité thermique reste très faible ($\approx 0,25$ W/m.K) et elles présentent une expansion volumique assez élevée (≈ 15 %) et une densité peu importante. (≈ 800 kg/m³). Par ailleurs, des précautions sont à prendre lors de l'utilisation des réservoirs en plastique, car les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir [10].

Il est important de souligner que la plage de température des paraffines, comprise entre -10 °C et 150 °C, reste insuffisante pour couvrir l'ensemble des besoins liés à la valorisation de la chaleur fatale. Pour pallier cette limitation, l'élargissement du choix des matériaux à changement de phase (MCP) à des composés non-paraffiniques permet d'explorer un éventail

de températures beaucoup plus vaste. Parmi ces alternatives, deux grandes familles se distinguent : les acides gras et les alcools de sucre, qui seront détaillés ci-après.

II.9 Conclusion

En conclusion, le séchage et les séchoirs solaires présentent de nombreux avantages pratiques, écologiques et économiques. Ils offrent une solution efficace pour la conservation des produits, notamment dans les régions où l'accès à l'électricité peut être limité.

Cependant, il convient de mentionner qu'un essai expérimental sur un dispositif de séchoir solaire indirect à convection forcée intégrée à un système pour le stockage de la chaleur, a été présenté dans le chapitre précédent. Ce dispositif spécifique utilise un mécanisme de convection forcée pour améliorer le processus de séchage et peut améliorer l'efficacité de collecteur. Il est important de continuer à explorer et à développer de telles variantes de séchoirs solaires, afin d'optimiser leurs performances et leur efficacité

Chapitre III : L'étude expérimentale

III.1 Présentation

Dans cet article, nous menons une étude expérimentale d'un séchoir solaire indirect en utilisant un mélange de limaille d'aluminium avec du sel, et un autre mélange de limaille d'aluminium avec du ciment. La recherche vise à améliorer l'efficacité du séchage à l'aide de ce mélange qui peut améliorer l'absorption et le stockage de la chaleur, améliorant ainsi les performances du séchoir solaire dans diverses conditions environnementales et contribuant au développement de technologies de séchage avancées et durables.

III.2 Affichage du séchoir solaire

L'appareil est un séchoir solaire composé d'un capteur plat recouvert d'un couvercle en verre d'une épaisseur de (0,005 mètre). Les dimensions du capteur (1,75 mètre $\times$ 0,75 mètre) Il convertit le rayonnement solaire en énergie thermique. Chaque capteur se compose d'un absorbeur composé de l'un des deux types de mélange à utiliser, d'une épaisseur de (0,025 mètre) et d'une longueur et d'une largeur égales à (1,65 mètre $\times$ 0,65 mètre), et il a été peint en noir mat. Les côtés et le fond du capteur sont isolés thermiquement à l'aide de liège blanc. Le collecteur est incliné à un angle de 33° (correspondant à la latitude de la ville de la vallée) par rapport au plan horizontal et dirigé vers le sud. La chambre de séchage d'une superficie de (0,273 mètre cube), l'air chauffé par l'absorbeur est pompé vers la chambre de séchage par des ventilateurs électriques placés dans la face inférieure du collecteur.

Dans cette étude, nous présentons une série de tests expérimentaux menés sur deux modèles de capteur solaire plat, qui a été conçu et testé dans la région de la vallée. L'équipement expérimental comprend la mesure du rayonnement solaire total, de la vitesse du vent, de la température ambiante, de la température de l'air d'entrée et de sortie et de la température d'absorption. Dans le but d'améliorer les performances thermiques en utilisant un mélange de sel, de limaille d'aluminium, de mélanges de ciment et de limaille d'aluminium dans chacun de ces sécheurs. Ceci est principalement représenté comme le montre la figure (33).

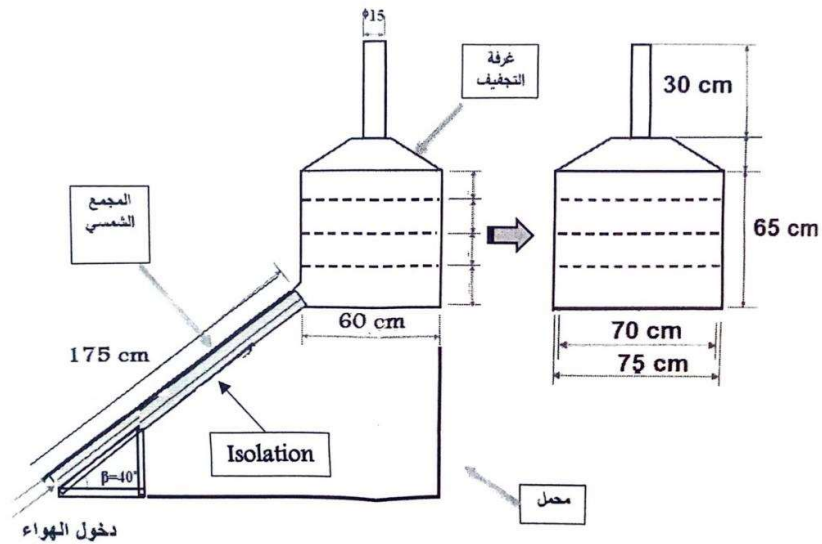


Figure III. 2 : Schéma montrant les dimensions de la chambre de séchage, la longueur du capteur solaire et l'angle d'inclinaison.

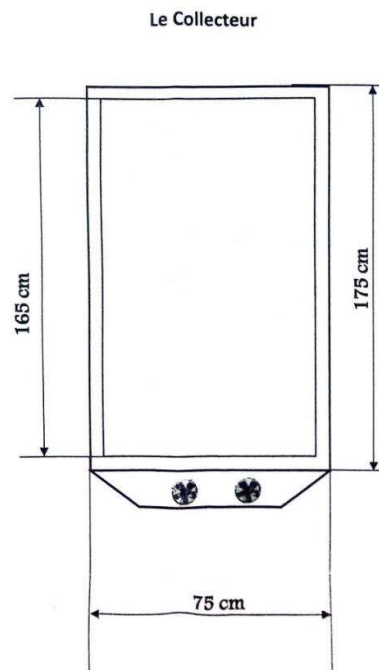


Figure III. 3 : Schéma montrant les dimensions du capteur solaire.

Ce plan a été exécuté par un menuisier dans l'un des ateliers de menuiserie de la vallée, voir Figure 36 :



Figure III. 7 : *Une plaque remplie d'un mélange de ciment et de limaille d'aluminium.*

Quatrièmement : Peindre les feuilles avec de la peinture noir mat

Voir la figure 40 :



Figure III. 8 : *Peindre les feuilles avec de la peinture noire mate.*

III.4.1.2 Traitement de l'absorbeur à partir d'un mélange de sel et de limaille d'aluminium

Premièrement : Remplissage de deux feuilles de limaille d'aluminium

Comme nous l'avons fait auparavant, nous remplissons (1,5 kg) de limaille d'aluminium dans chaque plaque. Voir la figure 41 :



Figure III. 9 : *Plaque remplie de limaille d'aluminium.*

Deuxièmement : remplissez complètement deux feuilles de sel

Après avoir placé la plaque sur la balance, nous la remettons à zéro, puis commençons à ajouter du sel jusqu'à ce que la plaque soit complètement remplie, nous constatons que le poids du sel dans une plaque est égal à (7 kg), et donc le poids des copeaux dans l'ensemble du complexe est égal à (14 kg), voir Figure (42) :



Figure III. 10 : *Le poids d'une assiette remplie de sel.*

Troisièmement : Mélanger tous les poids précédents

Nous mélangeons ce que nous avons pesé à partir des copeaux et du sel, voir Figure (43) :



Figure III. 16 : *Thermocouple.*

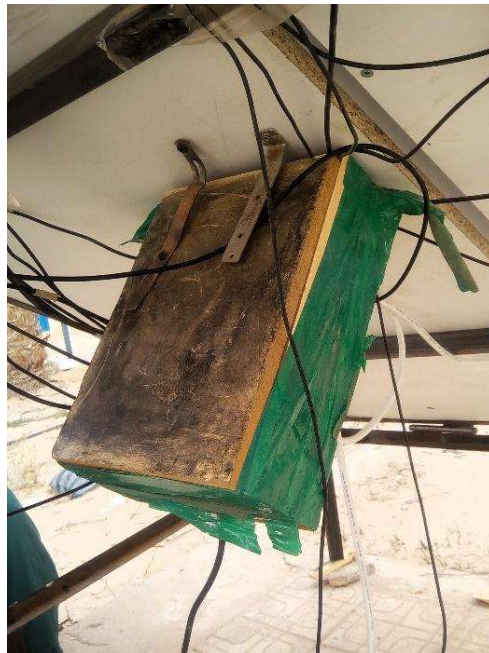


Figure III. 17 : *Arduino.*

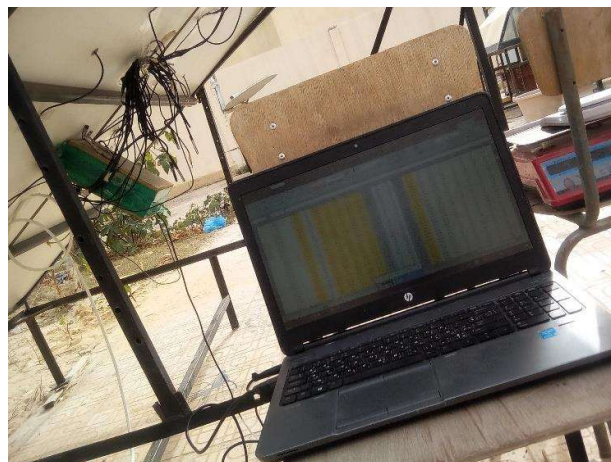


Figure III. 18 : *Enregistrement automatique des données de température dans l'ordinateur toutes les dix secondes.*

III.5.2 Mesure de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air à l'entrée de l'air dans le capteur solaire et la sortie de l'air chaud aux orifices d'aération à la sortie de la chambre de séchage ont été mesurées à l'aide d'un anémomètre (voir Fig. 51) :



Figure III. 19 : *Anémomètre.*

III.5.3 Mesure du rayonnement solaire :

La quantité de rayonnement solaire a été mesurée à l'aide de l'appareil Pyranomètre (voir Figure 52) :



Figure III. 20 : *Pyranomètre.*

III.6 Constatations et interprétations

Enfin, nous présenterons les résultats expérimentaux de ce travail expérimental mené le 20 mai 2025 à l'Incubateur Technologique de la vallée, où les résultats seront présentés sous forme de graphiques.

Ces constatations portent sur deux choses :

- La température change au niveau de l'absorbeur en termes de temps de 8h00 à 18h00 (9 heures).
- Évolution de la masse de paraffine séchée dans chaque chambre de séchage sur une

Conclusion Générale :

période de deux jours.

Les variations de la masse de paraffine placée dans chaque chambre de séchage ont été suivies pendant une durée de 33 heures, allant de 08h00 le premier jour à 18h00 le deuxième jour.

Résultats et discussions

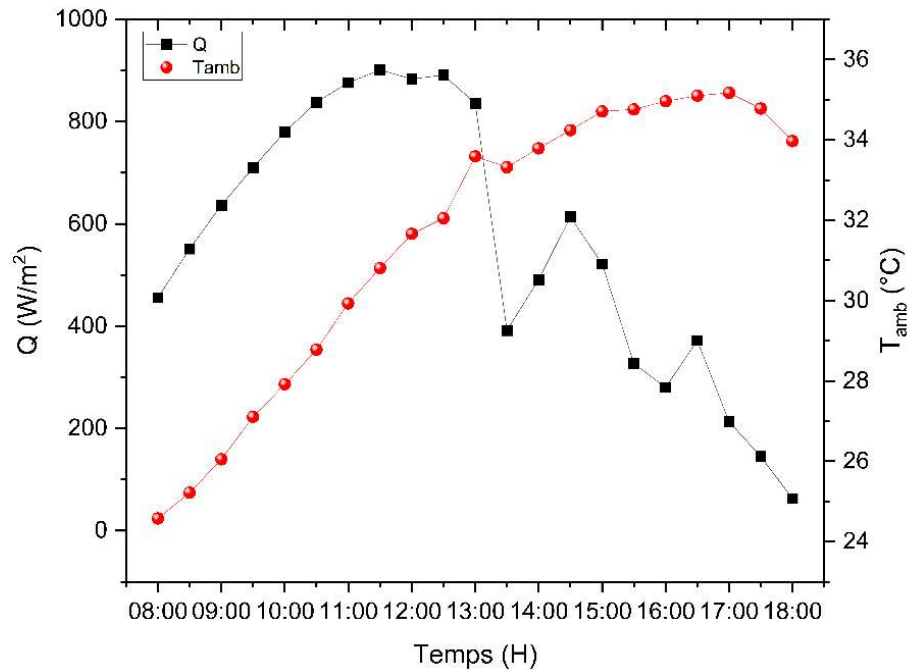


Figure III. 21 : Évolution du flux solaire et de la température ambiante au cours de la journée de mesure du 21 mai 2025.

La figure montre l'évolution simultanée du flux solaire Q (en W/m^2) et de la température ambiante T_{amb} (en $^{\circ}C$) au cours de la journée. On observe que le flux solaire atteint son maximum vers 12h30 avec une valeur supérieure à $850 W/m^2$, puis chute brutalement à partir de 13h00. En revanche, la température ambiante augmente progressivement de 08h00 jusqu'à environ 15h00, où elle se stabilise autour de 35 à 36 $^{\circ}C$, indiquant une inertie thermique par rapport à l'ensoleillement.

Le pic du rayonnement solaire est enregistré à midi, alors que la température ambiante continue d'augmenter même après la baisse du flux solaire, ce qui suggère un décalage temporel entre les deux grandeurs dû à l'accumulation de chaleur dans l'environnement.

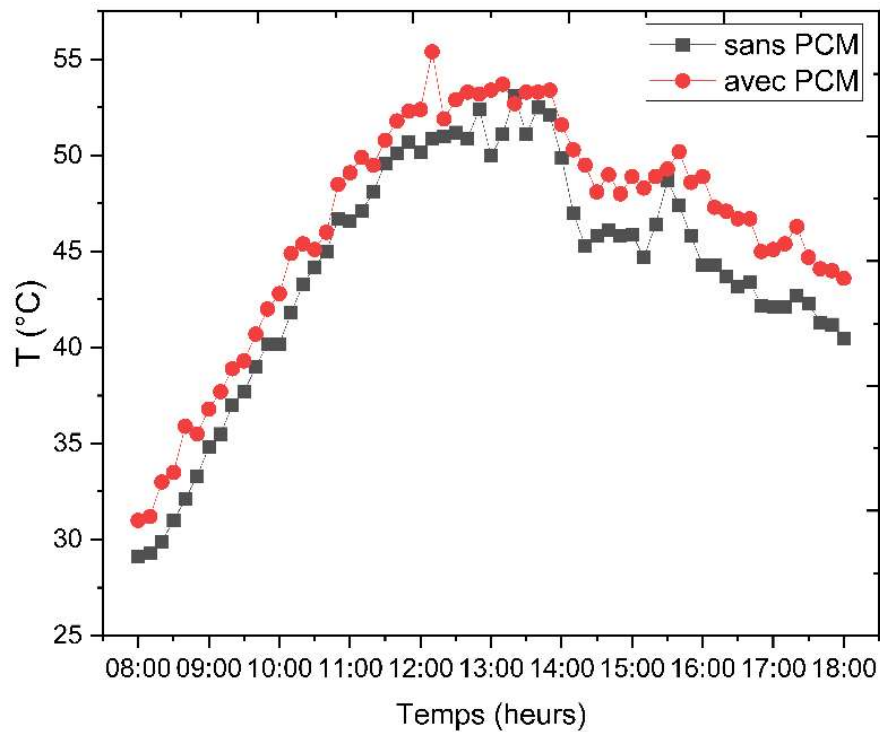


Figure III. 22 : *Comparaison de l'évolution de la température à travers le collecteur avec et sans matériau à changement de phase (PCM) au cours de la journée.*

Le graphique illustre la variation de la température en fonction du temps dans deux cas : avec et sans matériau à changement de phase (PCM). On remarque que la température dans le collecteur avec PCM (courbe rouge) est globalement plus élevée entre 09h00 et 17h00, atteignant un pic d'environ 54 °C vers midi. En comparaison, la température sans PCM (courbe noire) reste inférieure, avec un maximum proche de 52 °C. Le PCM agit ici comme un accumulateur thermique, emmagasinant la chaleur pendant les heures de fort ensoleillement, puis la restituant progressivement, ce qui permet une meilleure régulation thermique.

La baisse ou la stabilité temporaire de la température malgré l'augmentation de la chaleur solaire est due à l'absorption d'énergie par le PCM pendant sa phase de fusion, ce qui joue un rôle de régulation thermique naturel.

L'utilisation du PCM améliore les performances thermiques du collecteur en maintenant une température plus élevée et plus stable sur une plus longue période de la journée.

Conclusion Générale :

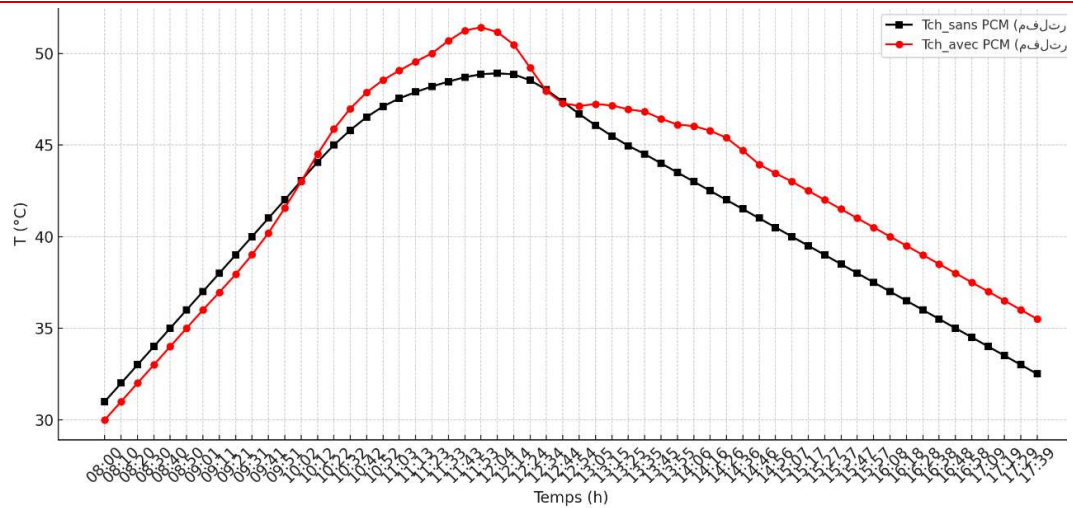


Figure III. 23 : Comparaison de l'évolution de la température à travers la chambre de séchage avec et sans matériau à changement de phase (PCM) au cours de la journée.

Le graphique présente l'évolution de la température dans la chambre de séchage pour deux cas : avec matériau à changement de phase (PCM) et sans PCM. On observe que la température avec PCM (courbe rouge) est systématiquement plus élevée que celle sans PCM (courbe noire) entre 09h00 et 17h00, atteignant un maximum d'environ 52 °C vers 13h00. Le PCM permet de mieux capter et redistribuer la chaleur, ce qui contribue à maintenir une température plus stable et plus élevée dans la chambre, particulièrement utile pour assurer un séchage continu et efficace même lorsque l'ensoleillement diminue.

L'intégration du PCM dans la chambre de séchage améliore la performance thermique globale en prolongeant la durée de maintien de températures élevées, ce qui optimise le processus de séchage.

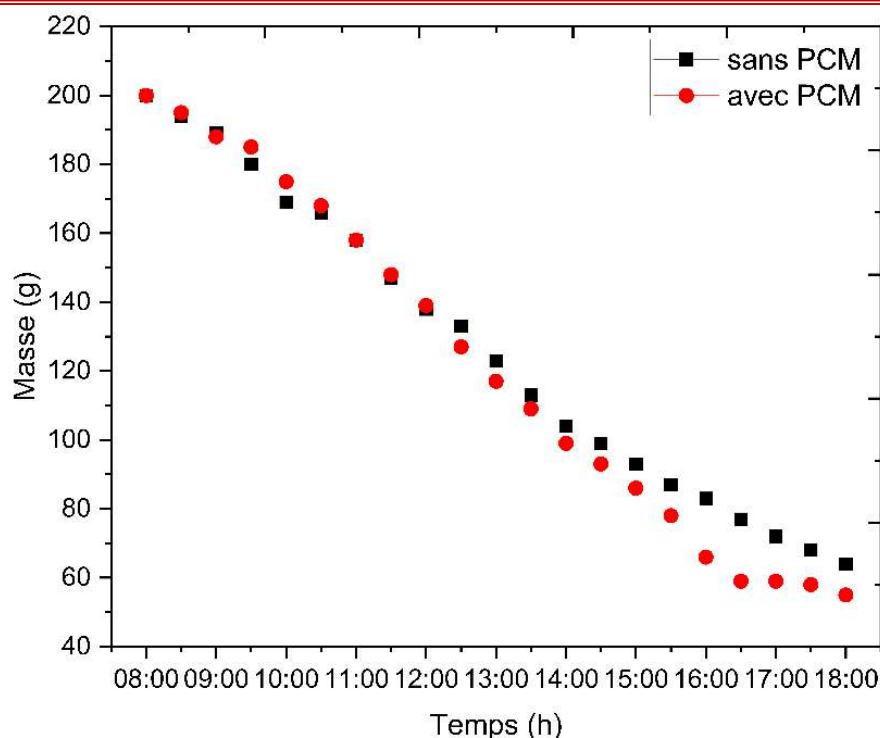


Figure III. 24 : Comparaison de l'évolution de la masse d'eau au cours du temps avec et sans matériau à changement de phase (PCM) lors de l'expérimentation de séchage.

Le graphique présente la diminution de la masse d'eau (en grammes) contenue dans le produit à sécher, en fonction du temps, pour deux cas : avec PCM (courbe rouge) et sans PCM (courbe noire). On constate une perte de masse plus rapide et plus importante dans le cas avec PCM, notamment à partir de 13h00 jusqu'à la fin de l'expérience à 18h00. Cela indique que le matériau à changement de phase favorise un environnement thermique plus stable et plus chaud dans la chambre de séchage, ce qui accélère l'évaporation de l'eau.

Le PCM a permis une réduction plus rapide et plus importante de la masse d'eau dans le produit, en assurant un séchage plus efficace grâce à une température intérieure plus stable et prolongée.

L'utilisation du PCM permet d'améliorer l'efficacité du séchage, avec une réduction plus marquée de la masse d'eau sur toute la période expérimentale. Ce résultat confirme l'intérêt thermique et fonctionnel du PCM dans les systèmes de séchage solaire.

III.7.3 En conclusion

Dans cette étude expérimentale, nous avons présenté un séchoir solaire à convection forcée intégrant de la paraffine comme matériau à changement de phase (PCM), en détaillant les étapes de conception, de réalisation et de test. Deux configurations du système ont été comparées : l'une équipée de paraffine et l'autre sans. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de la paraffine dans la chambre de séchage permet de maintenir une température plus stable et plus élevée durant la journée, ce qui a contribué à accélérer le processus de séchage et à réduire la masse d'eau résiduelle plus efficacement que dans le cas sans PCM. Les courbes expérimentales de température et de perte de masse ont confirmé l'efficacité thermique du système avec paraffine, soulignant ainsi le potentiel de ce matériau pour améliorer les performances des séchoirs solaires, notamment dans les conditions climatiques chaudes et ensoleillées.

Par ailleurs, l'introduction de ciment dans la structure du collecteur a permis une meilleure inertie thermique, en limitant les pertes de chaleur et en prolongeant l'effet de stockage. De même, l'utilisation de limaille d'aluminium a amélioré la conductivité thermique globale du système, facilitant un transfert de chaleur plus rapide et plus uniforme vers l'air de séchage. L'association de ces matériaux avec la paraffine a ainsi contribué à optimiser le rendement thermique et à améliorer l'efficacité globale du séchage.

Conclusion Générale :

Au terme de cette étude portant sur le développement et l'expérimentation d'un système de séchage solaire utilisant des capteurs thermiques intégrés à des matériaux à changement de phase (MCP), plusieurs résultats significatifs ont été obtenus, mettant en évidence l'importance de l'énergie solaire comme alternative propre et efficace pour les processus de séchage thermique.

La première partie du travail a consisté en une approche théorique approfondie, présentant les différents types de séchoirs solaires, leurs principes de conception et de fonctionnement, tout en mettant l'accent sur le rôle fondamental des capteurs plans à air. Une attention particulière a été accordée aux caractéristiques physiques et thermiques des matériaux à changement de phase – notamment les paraffines – et à leur efficacité dans l'amélioration des performances thermiques du système.

Sur le plan expérimental, un prototype de séchoir solaire a été conçu et réalisé. L'efficacité de l'absorption thermique a été étudiée à travers l'utilisation de différents mélanges (ciment + limaille d'aluminium, sel + limaille d'aluminium) comme absorbeurs. Les résultats ont été comparés en fonction de variables telles que la température, la vitesse de l'air et l'intensité du rayonnement solaire. Les essais ont montré que l'intégration de matériaux à forte capacité de stockage thermique latent, comme les paraffines, améliore considérablement la stabilité thermique du système et accroît son efficacité de séchage.

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de technologies de séchage dans les zones à accès limité aux énergies conventionnelles. Ils confirment la viabilité de l'énergie solaire non seulement en tant qu'option écologique, mais également comme solution économique durable dans les applications agricoles et industrielles. L'étude recommande d'approfondir les recherches appliquées en vue d'optimiser les propriétés physiques des séchoirs solaires et d'élargir l'utilisation des MCP selon les contextes climatiques variés.

Références Bibliographique

- [1] Ekechukwu, O.V., Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 1999. 40(6): p. 593-613.
- [2]. Belessiotis, V. and E. Delyannis, Solar drying. *Solar Energy*, 2011. 85(8): p. 1665-1691.
- [3]. Ekechukwu, O.V. and B. Norton, Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 1999. 40(6): p. 657-667.
- [4]. Sharma, A., C.R. Chen, and N. Vu Lan, Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(6): p. 1185-1210.
- [5]. Fudholi, A., et al., Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(1): p. 1-30.
- [6]. El-Sebaili, A.A. and S.M. Shalaby, Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. 16(1): p. 37-43.
- [7]. Ekechukwu, O.V. and B. Norton, Design and measured performance of a solar chimney for natural-circulation solar-energy dryers. *Renewable Energy*, 1997. 10(1): p. 81-90.
- [8]. Afriyie, J.K. and A. Bart-Plange, Performance Investigation of a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet Areas with a Fixed Outlet Area. *ISRN Renewable Energy*, 2012. 2012: p. 9
- [9]. Gulcimen, F., H. Karakaya, and A. Durmus, Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable Energy*, 2016. 93: p. 77-86.
- [10]. Mohanraj, M. and P. Chandrasekar, Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2009. 4(3): p. 305-314.
- [11]. K. Sakuta, J.T., S. Sawata, T. Tanaka and T. Horigome, Energy Developments in Japan, 1979. 1: p. 267-275.
- [12]. Chandra, R., V. Goel, and B. Raychaudhuri, Performance comparison of two-pass modified reverse flat-plate collector with conventional flat-plate collectors. *Energy Conversion and Management*, 1983. 23(3): p. 177 184.
- [13]. Goel, V., R. Chandra, and B. Raychaudhuri, A study on the performance of a two-absorber reverse flat-plate collector. *Energy Conversion and Management*, 1987. 27(4): p. 335-341.
- [14]. Goyal, R. and G. Tiwari, Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *Energy Conversion and Management*, 1999. 40(4): p. 385-392.

- [15]. Goyal, R. and G. Tiwari, Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *Solar Energy*, 1997. 60(1): p. 41-48.
- [16]. Jain, D., Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer. *Journal of food engineering*, 2007. 78(2): p. 637-647.
- [17]. Ahmed-Zaïd, A., et al., Amélioration des performances des capteurs solaires plans a air: application au sechage de l'oignon jaune et du hareng. 2001. 4: p. 69-78.
- [18]. Moummi, N., et al., Energy analysis of a solar air collector with rows of fins. 2004. 29(13): p. 2053-2064.
- [19]. MANAA, S., Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des isolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques. 2017, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [20]. Aoues, K., et al. Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air. 2008. 11(2): p. 219-227.
- [21]. K. Aoues, N. Moummi, M. Zellouf, A. Moummi, A. Labed, E. Achouri, A. Benchabane, « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air », Etude expérimentale dans la région de Biskra, *Revue des Energies Renouvelables*, vol 12, N°2, p 237-248, (2009).
- [22] F. Chaaban, N. Moummi, A. Brima, « Experimental study of thermal efficiency of a solar air heater with an irregularity element on absorber plate », *international journal of heat technology*, vol. 36, no.3, september, 2018, pp.855-860.
- [23] N. Moummi, S. Youcef-Ali, A. Moummi, J.Y. Desmons, « Energy analysis of a solar air collector with rows of fins », *Renewable Energy* 29 (2004) 2053–2064
- [24] M.F. Elkhawjah, L.B.Y. Aldabbagh, F. Egelioglu, « The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber », *Solar Energy* 85 (2011) 1479–1487
- [25] D. I. Pashchenko, « ANSYS Fluent CFD Modeling of Solar Air-Heater Thermoaerodynamics », 2018, published in *Geliotekhnika*, 2018, No. 1, pp. 37–47.
- [26] A. Labed, N. Moummi, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moummi. "Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle". *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°4 (2009) 551 – 561

- [27] [https:// lutroninstruments.eu/with-datalogger/thermometer-lutron-btm-4208sd](https://lutroninstruments.eu/with-datalogger/thermometer-lutron-btm-4208sd)
- [28] BOUGHALI, Slimane. Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. PhD Thesis. Université de Batna 2.
- [29] N.Chalal, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine (2007).
- [30] A.Bensedik, Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de magister. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen. (2011).
- [31] Technique de l'ingénieur-génie des procédés séchage par André Charreau et Roland Cavaillé, J 2480-2 ; 2480- 22 .
- [32] DAGUENET, Michel. Les séchoirs solaires : théorie et pratique. 1985.
- [33] W. Belachi, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah- Ouargla(2009).
- [34] D.Mennouche "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire", Thèse de Magistère, Ouargla(2006)
- [35] W.L.McCabe, J.C. Smith et P.Harriott "Unit operation of chemical engineering", Hill Book Company(1985)
- [36] H. Ben cheikh, M. Ould Sidimed et Y.Draoui, Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah –Ouargla. (juin 2011).
- [37] G. Lewis & M. Randall, 1923, Thermodynamics, New-York, Addition-Wesley Publishing Company,
- [38] W. Scott, 1957, Water relations of foods spoilage microorganisms, Advances in Food Research, 7, pp83-127,
- [39] M. Loncin, 1961, Les opérations unitaires du génie chimique, Edition Dunod, Paris ,France,
- [40] N.Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [41] A. Charreau et R. Cavaillé., Séchage (théorie et calculs), technique de l'ingénieur, J2480, 1-23.
- [42] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod,

Paris.

- [43] I. Doymaz., 2007. Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 78, 1291-1297.
- [44] J.P Nadeau, Puiggali J.R., Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Tec & Doc- Lavoisier, 1995.
- [45] H. Communay "Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs" Groupe De Recherche et D'édition, France (2002).12
- [46] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. KalengaSaka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", *Renewable Energy*, 27 (27 - 37)(2001).13
- [47] Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A.Jamali, "Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel ", *Energy* 29 (211 - 244)-(2004).14
- [48] B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Daschowdury and S. Janjai "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier", *Renewable Energy* 28(183-90) (2003).18
- [49] I. N. Simatc "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers ", *Renewable Energy*, 28 (435 - 453) - (2003).19
- [50] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", *Energy* 27(579-590) (2002).20
- [51] Mohamed Yacine NASRI , Azeddine BELHAMRI , "SIMULATION D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT A CONVECTION FORCEE POUR LES PRODUITS AGROALIMENTAIRES." *Sciences & Technologie B* ,pp. 57-62 ,12 11 2015.
- [52] A. C , S. a , " "Fatty Acid/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Blends as Form-Stable Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage." *Solar Energy* ,pp. 118 - 124 ,2008.
- [53] M.M. Farid ,A.M. Khudhair , S.A.K. Razack , "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications *Energy Conversion and Management*," p. 1597–1615 , 2008.
- [54] F. Kuznik ,J. Virgone , J.J. Roux , "Energetic Efficiency of Room Wall Containing PCM Wallboard: A Full-Scale Experimental Investigation," *Energy and buildings* ,p. 148 – 156 , 2008.
- [55] A. Kaizawa ,H. Kamano ,A. Kawai ,T. Jozuka ,T. Senda ,N. Maruoka , T. Akiyama , "Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material." *Energy Conversion and Managemen* ,pp. 698-706 ,2008.

- [56] K. Pielichowska و K. Pielichowski , "Phase change materials for thermal energy storage," Progress in Materials Science ,pp. 67-123 ,2014.
- [57] M. Hadjieva ,S. Kanev و J. Argirov , "Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage," Solar Energy Materials and Solar Cells ,pp. 181-187.
- [58] A. Sharma ,V. Tyagi ,C. R. Chen و D. Buddh , "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews ,pp. 318-345 ,2009.
- [59] O. Aydin ,M. Akgün و K. Kaygusuz, , "Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM," Energy Conversion and Management ,pp. 669-678 ,2007.
- [60] e. lesite" ,Grandeurs hygrométriques " ,*energieplus lesite* .2007 09 25 ,.