



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Hamma Lakhdar d'El-Oued Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

Thème :

**Etude expérimentale des performances thermiques
d'un séchoir solaire à capteur plan avec différents
chicanes**

Devant le jury composé de :

	Président
	Examineur
Mr. MENECEUR Noureddine	Encadreur
Aoun Yacine	Co-Encadreur

Réalisé par :

GHENBAZI Abdessalam
HADJ SAD Salah
DEHDA Messaoud

Année Universitaire 2022/2023



Remerciements

Merci avant tout au bon dieu ALLAH,
le clément, le miséricordieux, le

Tout puissant... Au terme de notre travail et bien sur notre université
Hamma Lakhdar d'El-Oued Faculté de Technologie.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre
Encadreur, **Dr. MENECEUR NOUREDDINE.** Qui a bien voulu accepter
de diriger ce travail avec ses précieux conseils, ses encouragements et
qui avait manifesté un intérêt particulier pour le mener à terme.

A nos familles qui ont porté avec nous le poids de nos soucis et nos
difficultés. Que nos parents et frères trouvent ici l'expression de nos
plus profonds attachements et de notre gratitude infinie.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de
près ou de loin, à mener ce travail à terme. A nos ami(e)s qui ont tenté
de nous porter de l'aide et du soutien.

A tous ceux que nous n'avons pas cités, qu'ils trouvent ici l'expression
de notre sincère gratitude





Dédicaces

Nous dédie ce modeste travail

A nos chers parents

A nos frères et mes sœurs

A toute notre famille

A notre encadreur **Dr. MENECEUR NOUREDDINE.**

A tous mes condisciples et mes ami(e)s partout

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien

Et la prospérité de l'humanité



REMERCIEMENT.....	I
DÉDICACE	II
SOMMAIRE.....	III
NOMENCLATURE.....	VI
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
RESUME.....	X
INTRODUCTION GÉNÈREALE	1

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1. Introduction	5
I.2. Revue bibliographique des séchoirs solaires	5
I.2.1 Séchoir solaire avec capteur à absorbeur inversé	8
I.2.2 Conception et réalisation du capteur plan à air :	19
I.3 CONCLUSION.....	20

Chapitre II : Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires

II.1 Introduction.....	23
II.2 Séchage.....	23
II.2.2 Historique :	23
II.2.3 Intérêt du séchage	23
II.2.4 Principes de séchage.....	24
II.3 Différents méthodes du séchage	24
II.3.2 Séchage chimique	24
II.3.3 Séchage thermique.....	24
II.4 Caractéristiques de l'air de séchage.....	26
II.4.2 L'humidité absolue :	26
II.4.3 Humidité relative :	26
II.4.4 Température sèche :	28
II.4.5 Température humide du gaz :	28
II.4.6 Caractéristiques des solides humides	28
II.4.7 Humidité absolue :	28
II.4.8 Teneur en eau à base humide :	28
II.4.9 Taux d'humidité	28
II.4.10 Taux d'humidité à l'équilibre :	29
II.4.11 Activité de l'eau :	29
II.4.12 Activité de l'eau dans un produit :	29
II.4.13 Transfert de masse d'un produit humide :	30
II.5 Les séchoirs solaires	34
II.5.1 Les séchoirs solaires directs	35

II.5.2Séchoirs naturels (traditionnel).....	36
II.5.3Séchoirs solaires indirects	36
II.5.4Les séchoirs mixtes.....	38
II.5.5Les séchoirs hybrides	38
II.6Conclusion.....	38

Chapitre III : Approche expérimentale

III.1 Introduction	41
III.2. Conception et réalisation d'un séchoir solaire	41
III.2.1Les différents composants de prototype de séchoir :	41
III.2.2Le chicane de collecteur	43
III.2.3. Verrière en verre pour la couverture du collecteur du séchoir	44
III.2.4Le ventilateur	44
III.2.5La carte de L'arduino	45
III.3. Le Montage de prototype	45
III.4. Appareillages de mesures.....	46
III.4.1Thermocouples	46
III.4.2.Mesure de la vitesse de l'air	47
III.4.3Mesure du rayonnement solaire global	47
III.4.4Balance	48
III.5Résultats et discussion.....	48
III.6Conclusion.....	49

Références Bibliographies

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Vue schématique du séchoir avec capteur solaire à air [9].	6
Figure I. 2 : Capteur solaire à air avec ailettes.	7
Figure I. 3 : La configuration expérimentale du séchoir solaire [10].	7
Figure I. 4 : Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé.	8
Figure I.5 : Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé doublepasses.	8
Figure I. 6 : Vue Schématique d'un capteur solaire à absorbeur inversé type plaqueabsorbantes.	9
Figure I. 7 : Séchoir solaire à absorbeur inversé.	10
Figure I. 8 : Séchoir solaire à absorbeur inversé avec stockage thermique et cheminéesolaire.	10
Figure I.9 : Capteur avec disposition d'obstacles, DCL, OCL et muni d'obstacles TL [17].	11
Figure I.10 : Capteur avec des chicane rectangulaire sur la plaque inférieure en bois [18].	11
Figure I.11 : Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la faceinférieure de l'absorbeur [19].	12
Figure I.12 : Capteur plan à air muni de rugosités [20].	12
Figure I.13 : Dispositif expérimental.	13
Figure I.14 : Schéma descriptif des chicanes.	13
Figure I.15 : Schéma descriptif des chicanes.	14
Figure II.16 : Montage expérimental (avec et sans ailerons) [22].	14
Figure II.17 : Absorbeur chicanes de forme semi-cylindrique [22].	15
Figure II.18 : Efficacité thermique en fonction du débit massique d'air [22].	15
Figure II.19 : Capteur solaire avec système à ailettes sur la plaque arrière en bois [23].	16
Figure II.20 : (a) schéma d'assemblage et (b) vue de face de système [24].	16
Figure I.21 : Domaine de calcul : (I) zone d'entrée d'air, (II) zone d'échange de chaleur et....	17
Figure I.22 : variation des caractères thermo aérodynamique avec nombre de Reynolds [25].	18
Figure I.23 : Schéma expérimental du capteur solaire [26].	18
Figure I.26 : Forme et emplacement des chicanes étudiées.	20
Figure I.25: Isolation thermique des longueurs d'entrée	21
Figure I.24: Isolation thermique capteur plan à air[27].	22
Figure II.1 : Représentation de l'activité de l'eau.	30
Figure II.2 : Représentation schématique d'un solide humide.	30
Figure II.3 : Vitesse de séchage en fonction du temps et de la masse.	32
Figure II.4 : Courbe représenté les périodes du séchage en fonction du temps.	33
Figure II.5 : Différents systèmes du séchage solaire.	34
Figure II.6 : Le séchoir solaire direct.	35
Figure II.7 : Séchage naturel Ou au soleil.	36
Figure II.8 : Séchoir solaire indirect.	37
Figure III.1 : Le schéma de montage de prototype de séchoir solaire avec les différents collecteurs pour les trois chicanes (a- simple b- triangulaire c- serpentine).	41
Figure III.2 : Schéma de chicane de collecteur serpentine de séchoir solaire.	43

Figure III.3 : Schéma de chicane de collecteur triangulaire de séchoir solaire.....	43
Figure III.4 : Photos graphie de vitre de collecteur.	44
Figure III.5 : Schéma de ventilateur d'écoulement d'air à travers le collecteur.	44
Figure III.6 : Schéma de la carte d'Ardouino installé dans notre prototype.	45
Figure III.7 : Photos lors de l'assemblage du prototype.....	45
Figure III.8 : Photos de positionnement de chicanes et des thermocouples.....	46
Figure III.9 : Photo du Montage de vitre de collecteur de séchoir.	46
Figure III.10 : Photo du thermocouple mesurant la température ambiante.	47
Figure III.11 : Photo de l'Anémomètre de mesure de la vitesse Kestrel 1000.....	47
Figure III.12 : Photo de pyromètre 4890.20 FREDERIKSEN.....	48
Figure III.13 : Photo de la balance utilisée pour la mesure de la masse du produit séché.	48
Figure III.14 : L'évolution de la température du collecteur en fonction du temps pour différents types de chicane (simple, triangulaire, serpentine) lors du premier jour de mesure (25/05/2023).	49
Figure III.15 : Evolution de la température de collecteur en fonction du temps pour différents chicane (simple ; triangulaire : serpentine) pour le premier jour de Mesure.....	49
Figure III.16 : L'évolution de la température dans la chambre de séchage pour différents collecteurs avec les chicanes simple, triangulaire et serpentine lors du deuxième jour de mesure (26/05/2023).50	
Figure III.17 : L'évolution de la température dans les chambres de séchage pour différents collecteurs avec les chicanes simple, triangulaire et serpentine lors du troisième jour de mesure (27/05/2023).51	
Figure III.18 : L'évolution de la température du collecteur en fonction du temps pour les différentes chicanes (simple, triangulaire et serpentine) lors du troisième jour de mesure (27/05/2023)..52	
Figure III.19 : Evolution de la température de la chambre de séchage du collecteur avec une chicane serpentine en fonction du temps pour les trois jours de mesure.....	53
Figure III.20 : Variation de la masse de la plante de menthe séchée en fonction du temps dans les différents séchoirs (avec chicane simple, chicane triangulaire et chicane serpentine) lors du deuxième jour de mesure (25/05/2023).	54
Figure III.20 : Variation de la température ambiante en fonction du temps au cours de la.	54
Figure III.22 : variation de la radiation solaire en fonction du temps pour les trois jours de mesure effectués.....	55

LISTE DE TABLEAUX

Tableau III.1 : Caractéristiques des différents composants utilisé dans le prototype de séchoir solaire.....	42
Tableau II.1 : Quelques exemples des méthodes de séchage [31].....	24

Nomenclature

A	La surface de séchage (m^2)
L	Longitude
Λ	Altitude
Φ	l'altitude
Ω	l'azimuth
H	Hauteur du soleil
ω	Angle horaire
S_0	Constante solaire
λ_c	conductivité thermique $W/(m.K)H$ humidité absolue
H_r	L'humidité relative
Ψ	degré de saturation
X	Teneur en eau a base sèche $kg_{eau} / Kg_{(MS)}$
X_r	Teneur en eau du produit à base humide)
A_w	L'activité de l'eau dans le produit
P_{vp}:	Pression de vapeur d'eau a la surface du produit,(Pa)
V_s	Vitesse de séchage
M_v	La masse d'eau évaporée
M_s	La masse de produit sec
dX	L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération.(kg)
Q	La quantité de chaleur transférée par unité de temps (W)
A	coefficient d'échange par convection ($W / m^2 \cdot K$).
T	Température (k,c)
E	émissivité du produit à traiter et émissivité de l'émetteur I_d .
If	Rayonnement direct [w/m^2]
IG	Rayonnement diffuse [w/m^2]
IR	Rayonnement Globale [w/m^2]
RS	Rayonnement réfléchi [w/m^2]
RS	rayon du soleil (km)
DST	distance terre-soleil (km)
V	Vitesse (m/s)
t	le temps (s)
P	Poids volumique g/m^3
E	Epaisseur (mm)
$-dx/dt$	Vitesse de séchage du produit : (Kg/Kgs).

Résumé

Ce mémoire s'intéresse à l'étude expérimentale d'un prototype de séchoir solaire à capteur plan avec écoulement d'air en convection forcée, équipé d'un collecteur contenant différentes formes de chicanes (simple, triangulaire et serpentine régulière). L'objectif est de sécher la plante de menthe .

Dans cette étude expérimentale, nous avons évalué les performances thermiques et le rendement de séchage optimal de la plante de menthe dans notre région d'El-Oued. Nous avons examiné plusieurs facteurs, tels que la température du collecteur, la température de la chambre de séchage, le rayonnement solaire et la masse de la plante de menthe séchée, afin d'étudier leur impact sur le processus de séchage. Après une période de mesure de trois jours en mai, de 8h00 à 16h00, les résultats obtenus ont montré que les performances thermiques d'un séchoir solaire sont étroitement liées aux conditions climatiques. **Mots clés** : séchoir d'air, chicane, performance, efficacité, séchage thermique.

ملخص

تركز هذه المذكرة على الدراسة التجريبية لمجفف شمسي نموذجي به مجمّع مسطح مع تدفق هواء بالحمل الحراري القسري، ومجهز بمجمع يحتوي على أشكال مختلفة من الحواجز (بسيطة، مثلثة، ملتوية بانتظام). الهدف هو تجفيف نبات النعناع المستخدم في المناطق الجافة من الواد بالجزائر.

في هذه الدراسة التجريبية، قمنا بتقييم الأداء الحراري وإنتاجية التجفيف الأمثل لنبات النعناع في منطقتنا بالوادي قمنا بفحص عدة عوامل، مثل درجة حرارة المجمع، ودرجة حرارة غرفة التجفيف، والإشعاع الشمسي، وكتلة نبات النعناع المجفف، للتحقق من تأثيرها على عملية التجفيف.

مساءً، أظهرت النتائج التي 4 صباحاً حتى الساعة 8 بعد فترة قياس مدتها ثلاثة أيام خلال شهر ماي، من الساعة

تم الحصول عليها أن الأداء الحراري لمجفف شمسي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالظروف المناخية.

الكلمات المفتاحية: مجفف هواء، حاجز، أداء، كفاءة، تجفيف حراري.

Introduction générale

Un séchoir solaire est un dispositif qui utilise l'énergie du soleil pour sécher des aliments, des produits agricoles, des herbes, des fruits, des légumes, des épices et même du bois. Il offre une méthode naturelle et durable pour sécher les produits en éliminant l'humidité sans recourir à des sources d'énergie traditionnelles telles que l'électricité ou le gaz.

Le fonctionnement d'un séchoir solaire repose sur le principe de captation de l'énergie solaire et de conversion en chaleur. Généralement, un séchoir solaire est composé d'un boîtier ou d'une structure transparente qui permet au soleil de pénétrer et de chauffer l'intérieur. À l'intérieur du séchoir, les produits à sécher sont disposés sur des plateaux perforés ou des grilles, permettant à l'air chaud de circuler autour d'eux.

Lorsque le soleil brille, l'énergie solaire est absorbée par les matériaux à l'intérieur du séchoir, ce qui entraîne une augmentation de la température à l'intérieur de l'appareil. L'air chaud, généré par cette chaleur, se déplace à travers les aliments ou les produits, évaporant l'humidité présente. L'humidité est ensuite évacuée par des ouvertures d'aération ou des systèmes de ventilation, garantissant un séchage efficace.

Les séchoirs solaires offrent plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de séchage. Tout d'abord, ils sont écologiques car ils utilisent une source d'énergie renouvelable et ne produisent pas de gaz à effet de serre nocifs. De plus, ils réduisent les coûts énergétiques en éliminant le besoin d'électricité ou de combustibles fossiles. Les séchoirs solaires peuvent également améliorer la qualité des produits séchés en préservant leurs nutriments, leur couleur et leur saveur naturelle.

Dans de nombreuses régions du monde, les séchoirs solaires sont utilisés pour la conservation des aliments, en particulier dans les zones rurales où l'accès à l'électricité est limité. Ils offrent une solution simple et abordable pour préserver les récoltes excédentaires, réduire le gaspillage alimentaire et assurer une source de nourriture durable tout au long de l'année.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les meilleures performances thermiques d'un séchoir solaire avec trois collecteurs différents. Nous avons construit un prototype de séchoir solaire avec trois collecteurs à chicane différents : simple sans chicane, triangulaire et serpentine, dans le but de sélectionner le meilleur parmi les trois modèles.

Le présent travail est composé de trois chapitres et est structuré comme suit:

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique approfondie, mettant en avant plusieurs études antérieures qui partagent un objectif commun avec notre recherche.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons de manière générale les techniques de séchage thermique, en présentant les différents types de séchoirs solaires ainsi que leurs applications.

Le troisième chapitre décrit les étapes de notre approche expérimentale en détaillant les outils de mesure utilisés ainsi que les matériaux nécessaires pour mener à bien les opérations de séchage. À la fin de ce chapitre, nous présentons et interprétons les résultats expérimentaux obtenus, qui ont été traduits sous forme de courbes.

Enfin, notre travail se conclura par une synthèse générale qui résumera les principaux points et résultats de notre étude.

Chapitre I :

Etude Bibliographique

I.1. Introduction

Le séchage est l'un des processus fondamentaux qui permette d'augmenter efficacement le temps de stockage des aliments. Il consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à des valeurs résiduelles inhibant le développement du tout micro-organisme permettant ainsi leur stockage dans des conditions ambiantes. Le séchage est l'un des domaines de recherche les plus solides de l'ingénierie alimentaire. Dans le présent chapitre nous avons traité de nombreux travaux expérimentaux et numériques sur les techniques de séchage solaire qui ont été publiés dans le 21^{ème} siècle.

I.2. Revue bibliographique des séchoirs solaires

En 1999 Ekechukwu [10] présenté une revue complète sur les principes fondamentaux et les théories du séchage des différents produits agroalimentaires depuis les premiers modèles de sorption et d'équilibre de l'humidité jusqu'aux modèles de la couche mince. Les séchoirs solaires sont des dispositifs qui captent le rayonnement solaire pour sécher les aliments disposés à l'intérieur. Les études de ces séchoirs ont montré qu'ils étaient performants, pratiques, peu coûteux et faciles à manipuler. Les séchoirs solaires peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement à savoir direct, indirect et mixte. Dans le séchoir solaire direct, le produit est exposé directement au rayonnement solaire. Le séchoir est souvent construit en bois avec un vitrage servant à créer l'effet de serre à l'intérieur.

Les séchoirs solaires indirects comportent généralement un capteur solaire qui sert à chauffer l'air ambiant et la chambre de séchage qui sert à disposer du produit à sécher. Pour l'entraînement de l'air, le séchoir utilise un souffleur (convection forcée) ou une cheminée située à l'extrémité supérieure de la chambre de séchage (convection naturelle). Dans ce type de séchoir, le produit qui est à l'abri du soleil et même de la lumière préserve une meilleure qualité nutritionnelle [11].

Les séchoirs mixtes sont la combinaison des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, une combinaison de deux sources de chaleur est nécessaire pour le processus de séchage. La chaleur du rayonnement solaire direct et la chaleur provenant du capteur solaire.

Une revue sur les capteurs solaires à air et les séchoirs solaires à basse température a été présentée par Ekechukwu et Norton [12]. En année 2009 une autre revue sur les systèmes de séchage solaire a été réalisée par Sharma et al. [13]. Une année plus tard, Fudholi et al. [14] ont examiné différents types de séchoirs solaires en fonction du produit à sécher. En tenant compte des aspects techniques et économiques des produits agricoles et marins, ils ont classé les séchoirs solaires selon quatre modes : direct, indirect, mixte et hybride. En année 2012, El-SEBAII [15] a présenté une description détaillée des travaux fondamentaux effectués sur les séchoirs solaires ainsi que leurs capteurs solaires pour les modes indirects et mixtes.

Selon le mode de déplacement d'air, on peut distinguer deux types de séchoirs solaires : actifs et passifs [13]. Les séchoirs solaires actifs (ou à convection forcée) utilisent des ventilateurs pour forcer la circulation de l'air chauffé dans l'unité de séchage. Les séchoirs passifs (ou à convection naturelle) utilisent une cheminée aménagée au sommet de la chambre de séchage pour le tirage et la circulation de l'air dans le séchoir.

Les séchoirs à convection naturelle sont souvent inefficaces puisque la circulation de l'air est généralement mauvaise [16]. Cela peut engendrer des températures excessivement élevées dans la chambre de séchage conduisant à une culture cuite plutôt sèche. Certaines études ont révélé que les cheminées solaires conçues de manière appropriée peuvent améliorer le débit d'air à travers le séchoir solaire [17].

Les travaux récents portent principalement sur les différentes innovations techniques permettant d'améliorer le rendement des séchoirs solaires telles que :

- l'amélioration des performances thermiques des capteurs solaires,
- l'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 de séchage.

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.

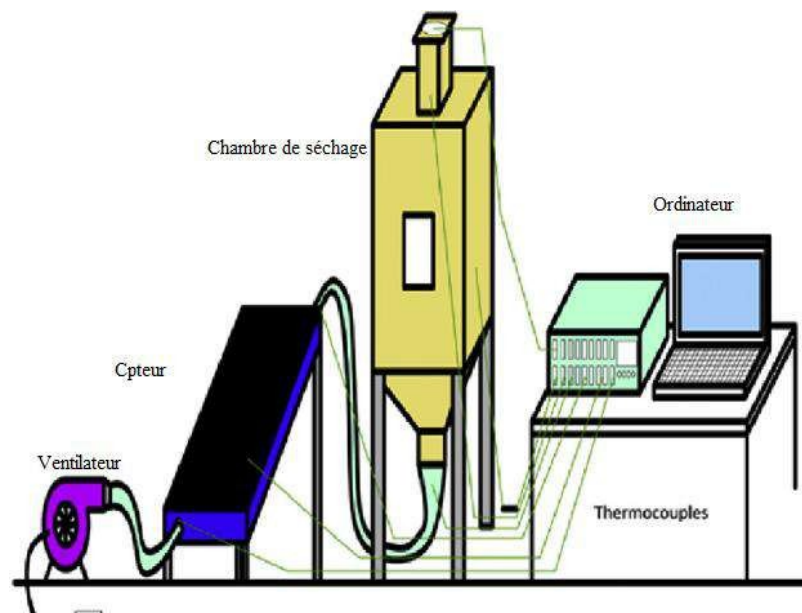


Figure I. 1 : Vue schématique du séchoir avec capteur solaire à air [23].

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 sucrée et les produits feuillus.

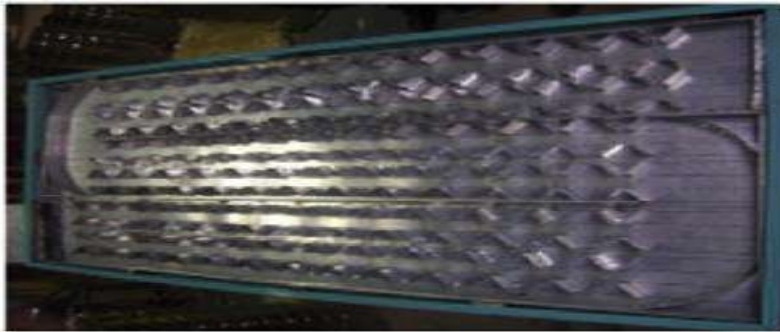


Figure I. 2 : *Capteur solaire à air avec ailettes.*

Une autre étude expérimentale du séchage de chili dans un séchoir solaire indirect à convection forcée a été effectuée par MOHANRAJ et al. [29]. Le séchoir contient une chambre de séchage reliée à un capteur solaire (voir la Fig. I. 3). Le capteur solaire utilise du sable mélangé avec des déchets d'aluminium pour le stockage thermique pendant les heures ensoleillées du jour. Les séchoirs peuvent contenir jusqu'à 50 kg de piment. Le capteur solaire est incliné d'environ 25° par rapport à l'horizontale. L'intégration du stockage thermique prolonge le temps de séchage de 4h par jour environ et maintient une température d'air presque constante. Le piment passe d'une teneur initiale en humidité de 72,8 à environ 9,2 et 9,7 % dans les plateaux inférieur et supérieur, respectivement. L'efficacité thermique du séchoir solaire a été estimée à environ 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.

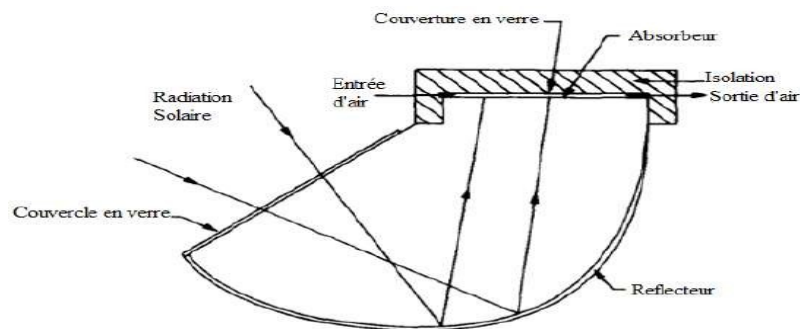


Figure I. 4 : *Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé.*

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 1. 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.

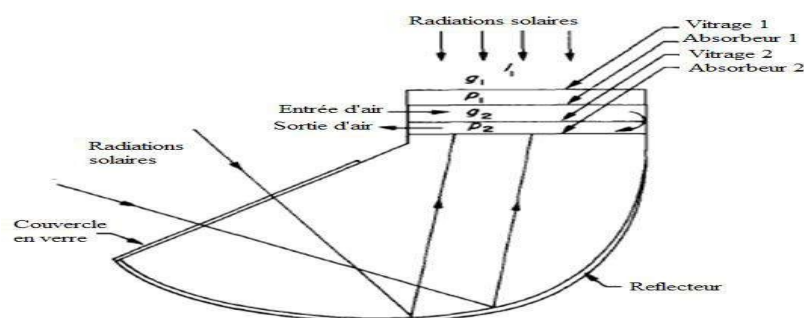


Figure I.5 : *Vue Schématique d'une section d'un capteur avec absorbeur inversé doublepasses.*

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.

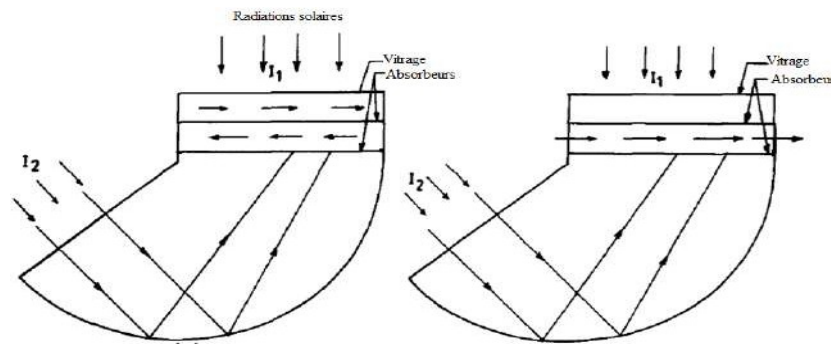


Figure I. 6 : *Vue Schématique d'un capteur solaire à absorbeur inversé type plaque absorbantes.*

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.

Pour améliorer les performances d'un séchoir solaire, Jain [35] a proposé de modifier le séchoir proposé par GOYAL et TIWARI [32][24], en ajoutant un lit en gravier (0.15 m d'épaisseur) comme unité de stockage et une cheminée solaire avec stockage (granite) pour produire un écoulement d'air accéléré naturellement (Fig. I. 8). Ce séchoir pourrait sécher 95 kg d'oignons à partir d'une teneur en humidité de 6,14 à 0,27 kg d'eau/ kg de matière sèche dans une période de séchage de 24 h. Dans ce type de séchoir solaire, aucune alimentation externe n'était nécessaire pour faire fonctionner le séchoir. Pour la modélisation, une approche globale du système a été utilisée. Elle basée sur la connaissance des coefficients de transfert de chaleur et de masse entre les différents composants du système. L'auteur a constaté que le stockage thermique est très pertinent pour réduire les fluctuations

de la température et diminuer le temps de séchage en augmentant le temps de fonctionnement.

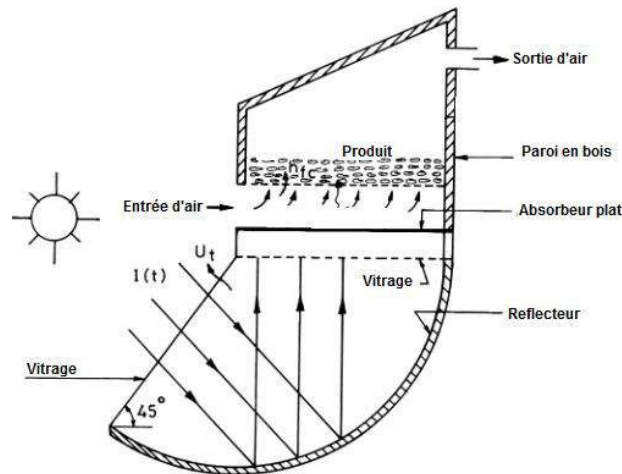


Figure I. 7 : Séchoir solaire à absorbeur inversé.

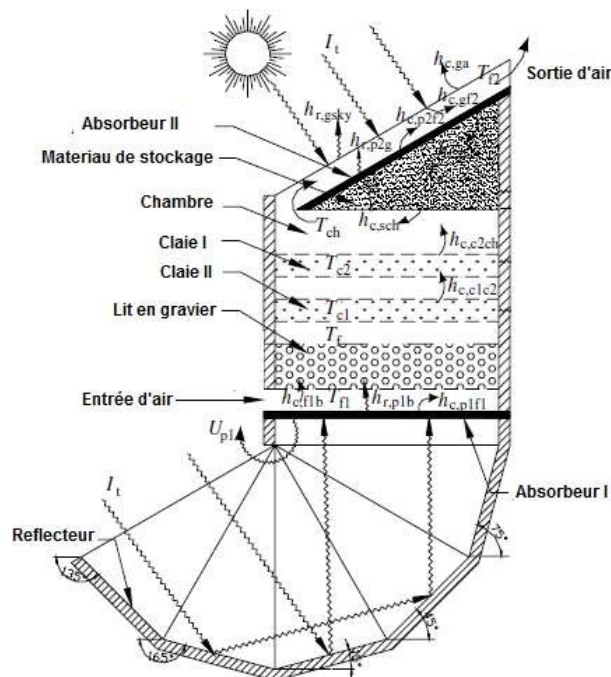


Figure I. 8 : Séchoir solaire à absorbeur inversé avec stockage thermique et cheminéesolaire.

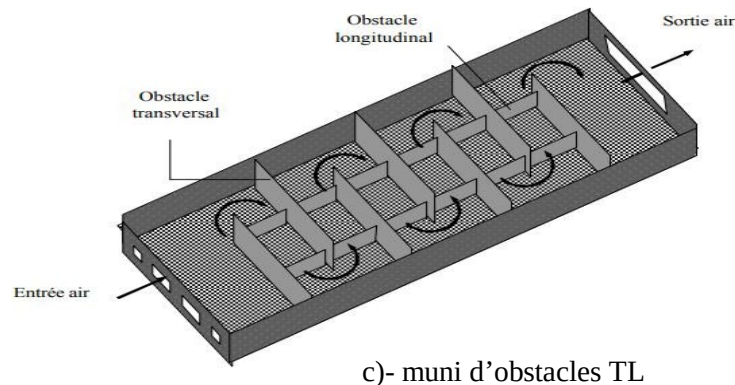
Ahmed Zaïd et al présentent une comparaison entre les résultats obtenus dans les cas du capteur solaire muni d'obstacles et du capteur sans obstacles (SC). Les différentes formes étudiées, à la fois simples et intéressantes, concernent, comme le montre la figure I.9, les chicane Delta Cintrées Longitudinalement (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].

Moummi 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)

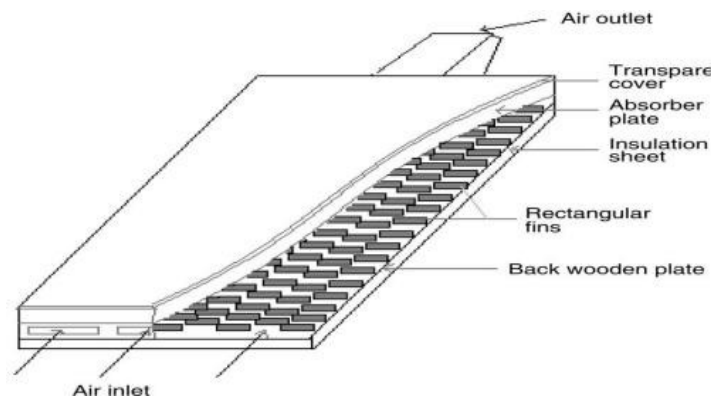


Figure I.10 : Capteur avec des chicanes rectangulaire sur la plaque inférieure en bois [4].

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].

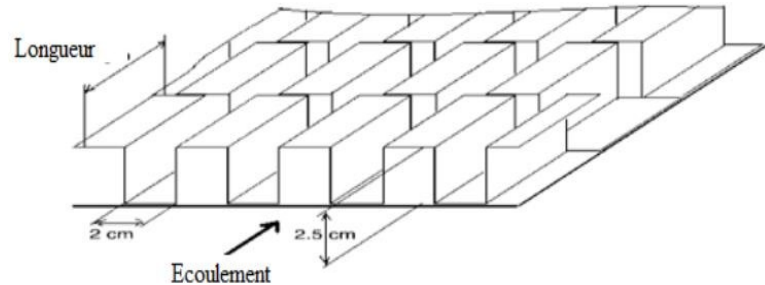


Figure I.11 : *Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur [5].*

En parallèle, des expériences ont été réalisées pour comparer l'efficacité d'un capteur à doubles couvertures avec celui à triples couvertures. Les résultats ont montré que l'ajout de plaques augmente le transfert thermique entre l'absorbeur et l'air, réduisant ainsi les pertes vers l'extérieur et augmentant le rendement. De plus, il a été démontré que les couvertures triples offrent de meilleures performances que les doubles en minimisant les pertes vers l'extérieur [5]. Récemment, K. AOUES et al. ont proposé une approche théorique visant à améliorer le coefficient de transfert convectif entre le fluide caloporteur et la plaque absorbante du rayonnement solaire. Ils ont proposé de placer des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant [7]. Voir la Figure (I.12) pour les configurations cylindriques étudiées dans cet article [7] :

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

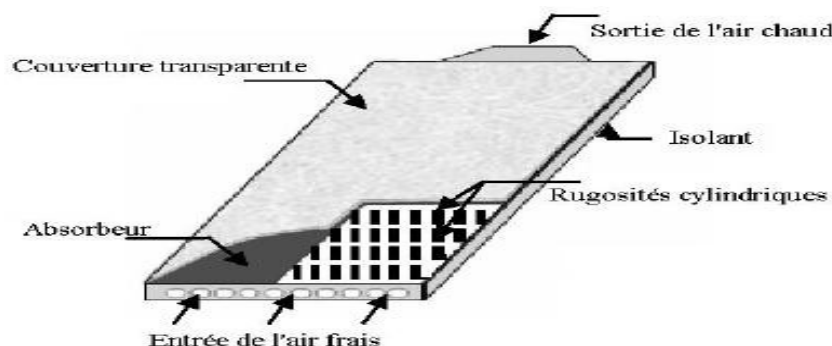


Figure I.12 : *Capteur plan à air muni de rugosités [7].*

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

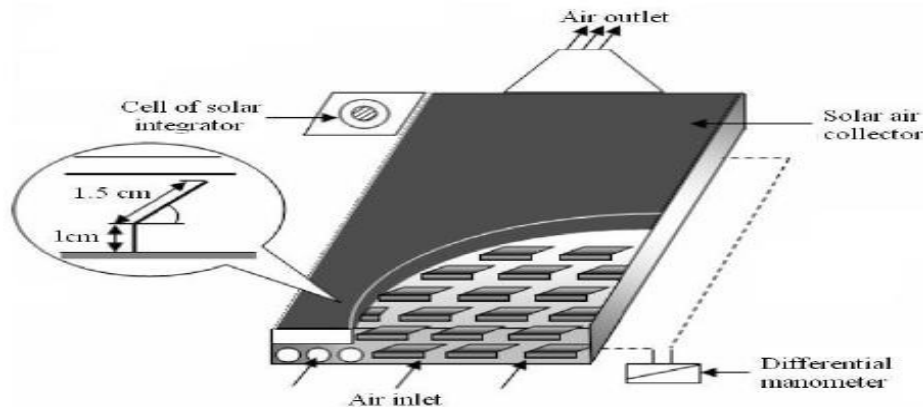


Figure I.13 : *Dispositif expérimental.*

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 configuration A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes (figure I-13).

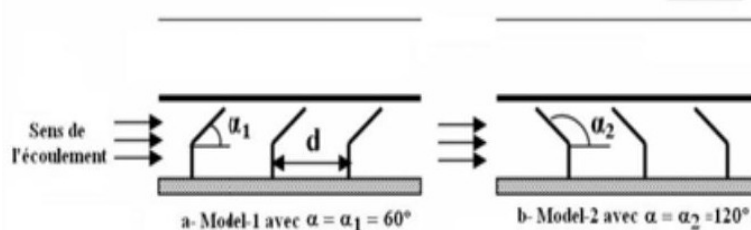


Figure I.14 : *Schéma descriptif des chicanes.*

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 longitudinaux 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 $m = 0,015 \text{ kg / s}$. Cette différence atteint une valeur de 15,93 % pour une intensité solaire de 285 W / m^2 .

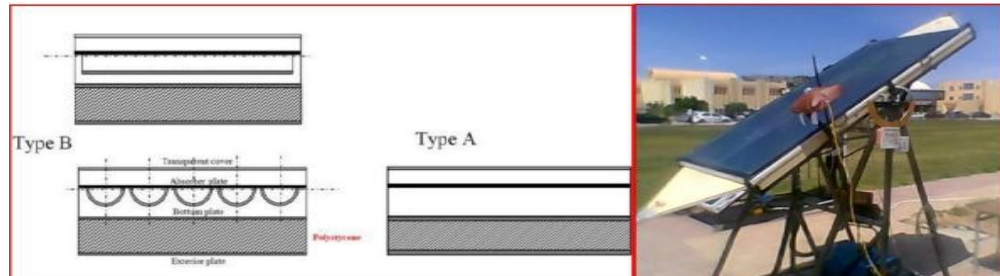


Figure I.15 : Schéma descriptif des chicanes.

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 trouvés 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.

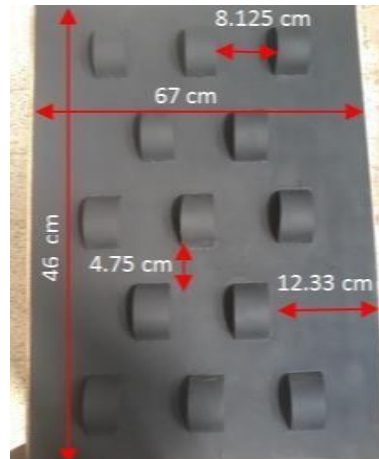


Figure II.17 : Absorbeur chicanes de forme semi-cylindrique [21].

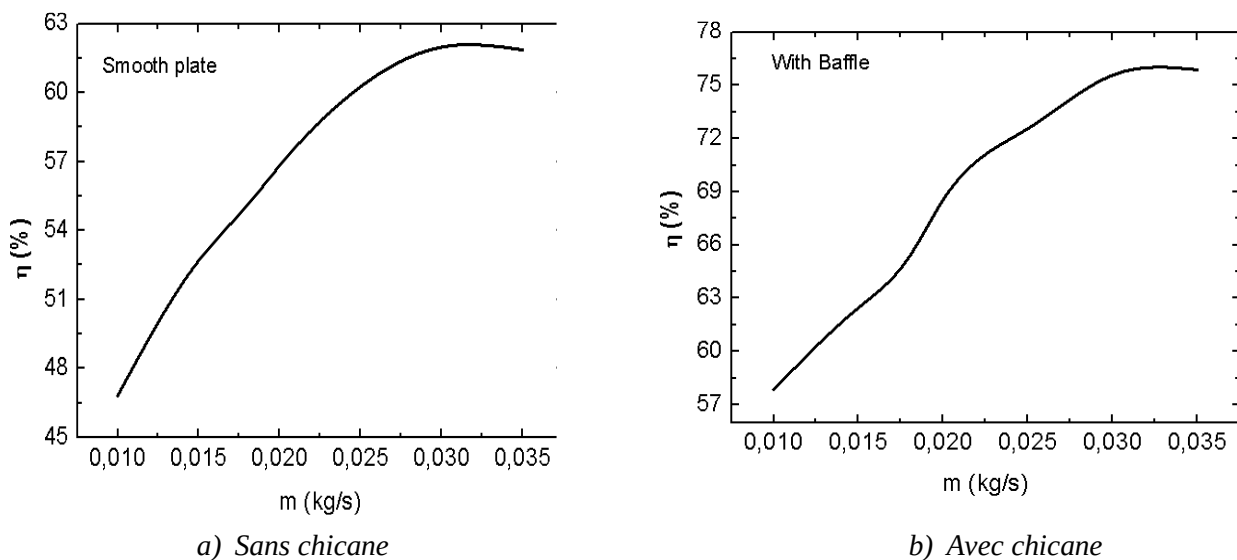


Figure II.18 : Efficacité thermique en fonction du débit massique d'air [21].

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.

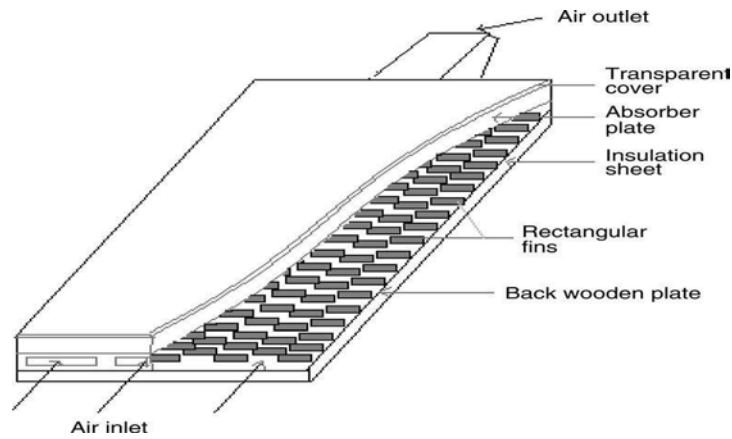


Figure II.19 : Capteur solaire avec système à ailettes sur la plaque arrière en bois [22].

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.

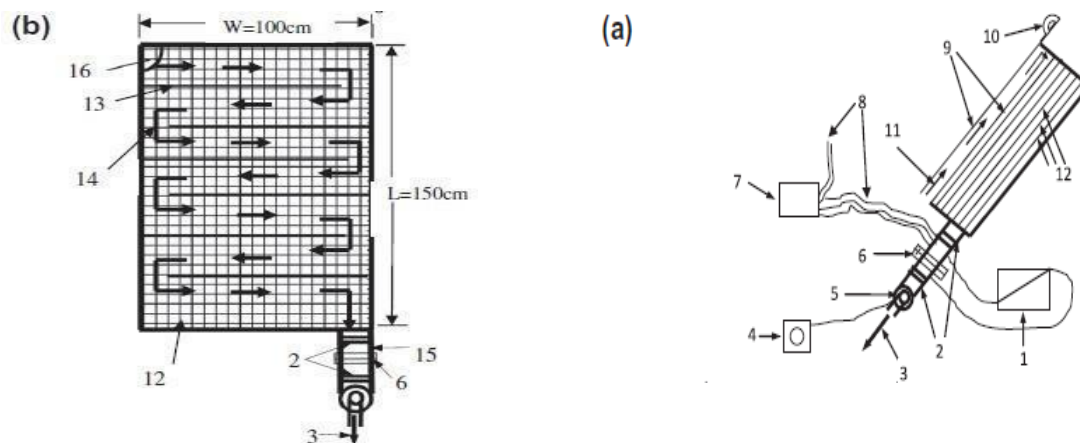


Figure II.20 : (a) schéma d'assemblage et (b) vue de face de système [26].

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 élevée 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

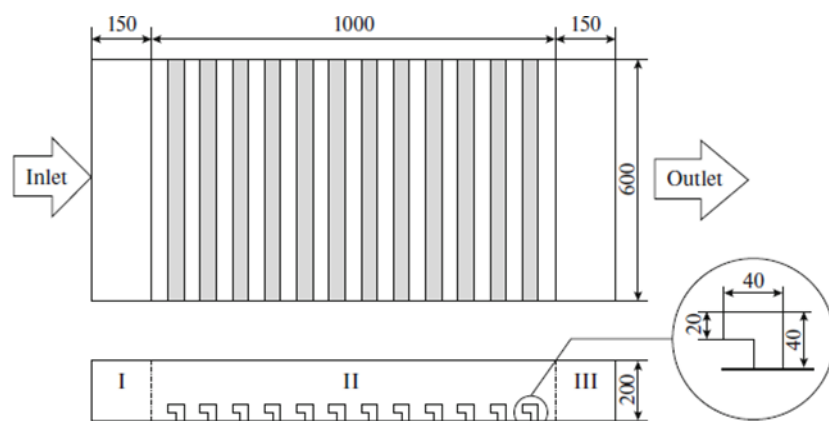


Figure I.21 : *Domaine de calcul : (I) zone d'entrée d'air, (II) zone d'échange de chaleur et (III) zone de sortie [28].*

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 finhauteurs 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.

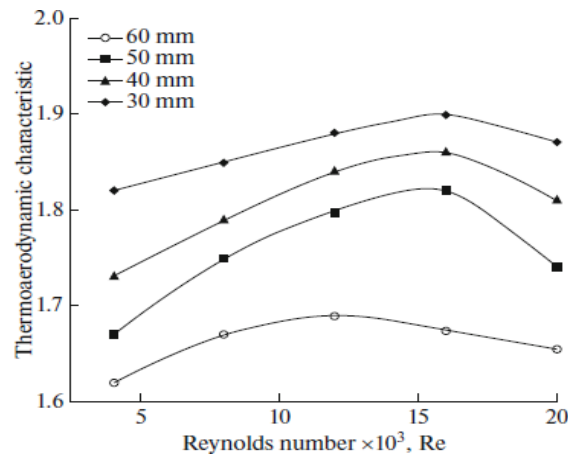


Figure I.22 : variation des caractères thermo aérodynamique avec nombre de Reynolds [28].

A. LABED et al, [30] ont présentés une étude pour améliorer la performance d'un capteur solaire a air, le système étudié est un capteur solaire a simple passage composer d'une vitre, une plaque absorbante mince en acier galvanise 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.

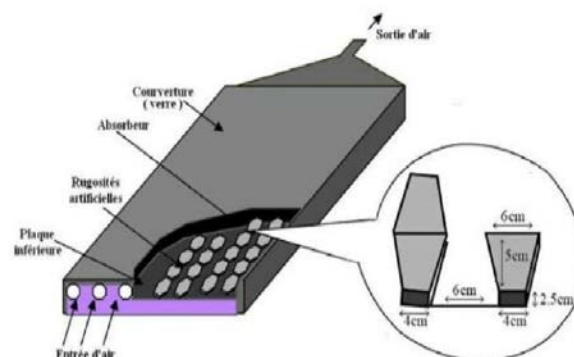


Figure I.23 : Schéma expérimental du capteur solaire [30].

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 chicane 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 .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 bâtie d'une épaisseur de 1mm comme indiqué par la (Figure I.24).

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 hydrodynamiquement 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 type 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. Les chicanes ayants un angle d'attaque



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



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

I.3 CONCLUSION

Cette revue bibliographique met en évidence que l'objectif principal de ces travaux était d'améliorer l'efficacité thermique des capteurs solaires et de trouver des solutions technologiques adaptées aux divers problèmes pouvant entraver leur bon fonctionnement.

Chapitre II :

Généralités sur les techniques de refroidissement de poulaillies

II.1 Introduction

Le séchage, et notamment le séchage au soleil, est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits agroalimentaires utilisée par l'homme. Il consiste à exposer le produit aux rayons du soleil et à l'air libre. Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques de séchage solaire et leurs applications.

II.2 Séchage

II.2.1 Définition

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 présente plusieurs intérêts, parmi lesquels on distingue [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 de micro-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 actifs

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 passifs

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 :

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

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] :

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

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].

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 présent 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 par la 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.

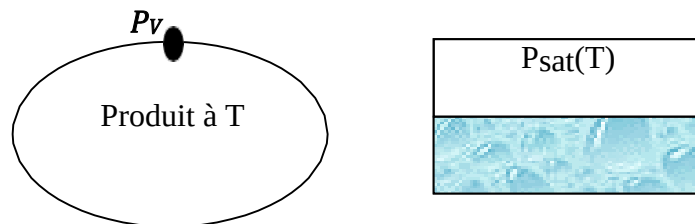


Figure II.1 : Représentation de l'activité de l'eau.

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

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 :

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

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].

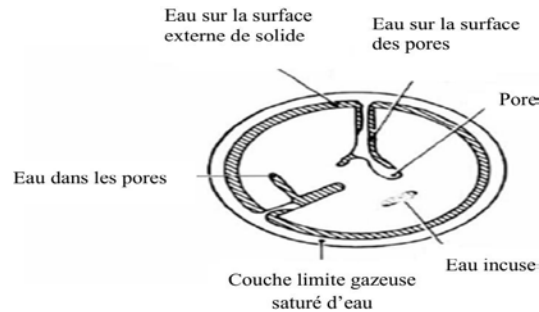


Figure II.2 : Représentation schématique d'un solide humide.

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]

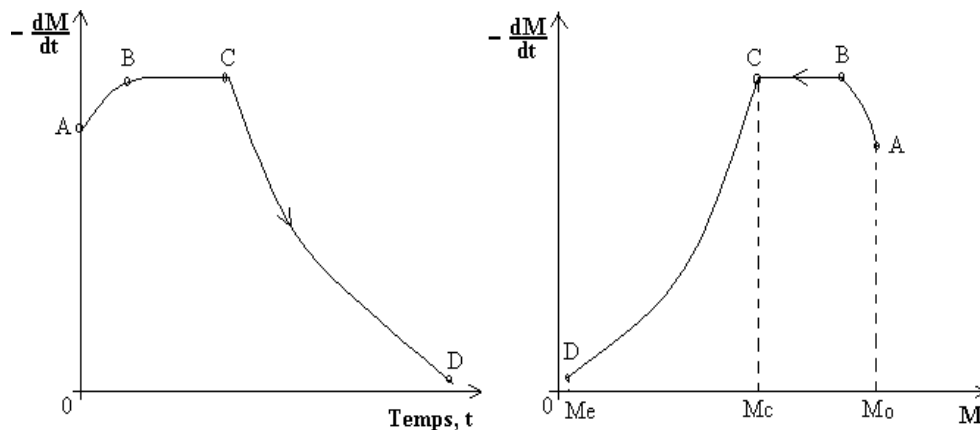


Figure II.3 : Vitesse de séchage en fonction du temps et de la masse.

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 de 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].

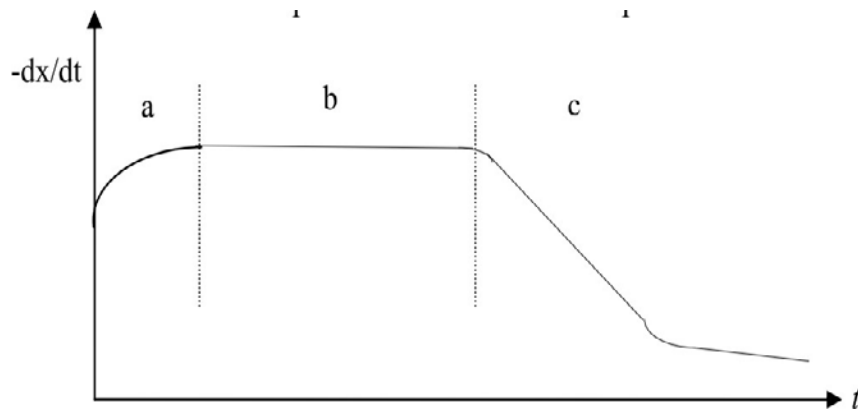


Figure II.4 : Courbe représentée les périodes du séchage en fonction du temps.

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).

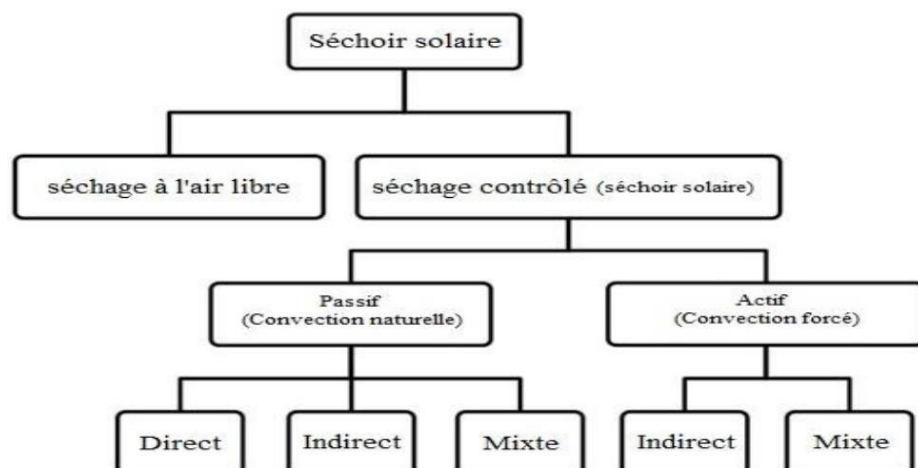


Figure II.5 : Différents systèmes du séchage solaire.

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).

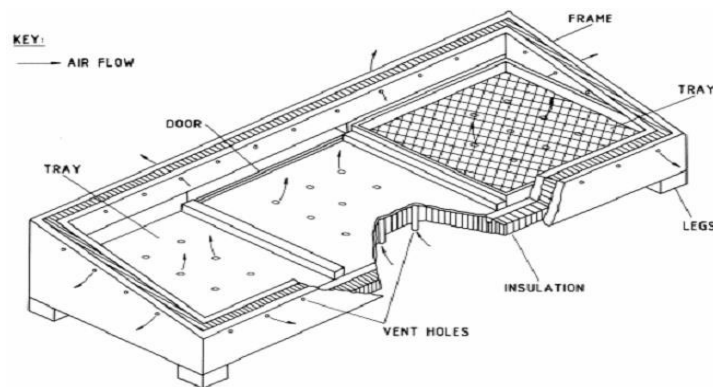


Figure II.6 : Le séchoir solaire direct.

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 directe 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 dès 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 sèches 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.7 : *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.

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.

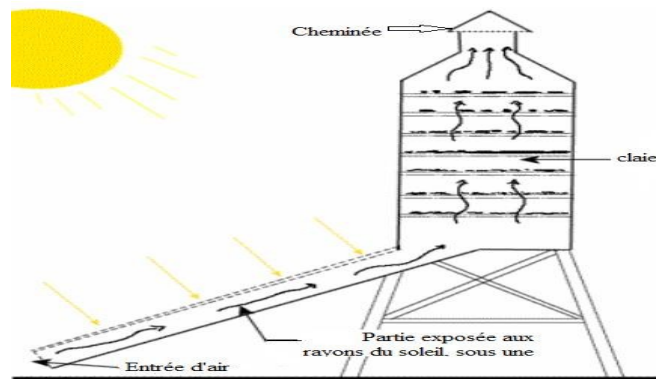


Figure II.8 : Séchoir solaire indirect.

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 des 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

claires 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 autres types de séchoirs solaires, car le 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 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. En promouvant l'utilisation de cette technique, il est possible de favoriser une approche durable de la préservation des aliments et de

contribuer ainsi à la sécurité alimentaire et à la réduction du gaspillage.

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

Références bibliographies

- [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-Zaid, A., et al., Amelioration 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. Moumami, M. Zellouf, A. Moumami, 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.Moumami, 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.Moumami, S. Youcef-Ali, A. Moumami, 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. Moumami, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moumami. "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>
- [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'ingenieur-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 produit 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 cheikch,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 Reseach, 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