



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de technologie

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

**Thème**

**Amélioration des performances du séchoir solaire  
dans les régions désertiques.**

**Devant le jury composé de :**

MENECEUR RIDA

Président

LAOUINI ABDEL JALIL

Examineur

MENECEUR NOUR DINNE

Examineur

ZINE ALI

Encadreur

**Présenté par :**

- LAIB ZAKARIA

- SEGHEIRI MOHAMED ISLAM

- ATTALAH AISSA

- KERROUCHE ISMAIL

- MEDJEDI BELLAL

**2022-2023**

# Remercîment

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon encadreur dans le mémoire, Monsieur ZINE ALI . Je le remercie de m'avoir guidé, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et à toutes les personnes qui, à travers leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques, ont contribué à orienter ma réflexion et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions tout au long de mes recherches.

Je remercie mes chers parents qui ont toujours été présents à mes côtés. Je remercie mes sœurs et mon frère pour leur soutien.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces contributeurs, j'exprime ma gratitude, mon respect et ma reconnaissance.

# Dédicace

*Je dédie cet ouvrage*

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé  
durant ces années d'études.*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde  
reconnaissance.*

*A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui  
ont partagé avec moi tous les moments  
d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils  
m'ont chaleureusement supporté et encouragé  
tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me  
donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé,  
et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous ceux que j'aime*

## Résumé

La thèse aborde les principes généraux du processus de séchage et son importance dans la préservation de la qualité des matériaux et des produits au fil du temps. L'accent est mis sur l'importance de l'utilisation des serres comme outil de séchage et pour fournir des conditions appropriées au processus de séchage. La thèse se concentre sur la conception et l'installation d'un séchoir solaire dans la région d'EL-OUED . Des panneaux sandwich et du polycarbonate ont été utilisés pour former la structure du séchoir et fournir l'isolation thermique nécessaire. Les angles optimaux d'installation du séchoir et leur impact sur les performances du processus de séchage ont été discutés. Des tests et des mesures ont été effectués pour évaluer les performances du séchoir, où des températures élevées ont été enregistrées à différents points du séchoir et de l'environnement extérieur. Les résultats ont montré que le séchoir fonctionne efficacement et peut sécher les échantillons rapidement et efficacement.

**Mots clés :** séchage, séchage solaire , énergie solaire , serres .

## ملخص

تضمن المذكورة عموميات حول عملية التجفيف وأهميتها في الحفاظ على جودة المواد والمنتجات على مر الوقت. تم تسليط الضوء على أهمية استخدام البيوت الدفيئة كأداة للتجفيف وتوفير ظروف مناسبة لعملية التجفيف التركيز في المذكورة على تصميم وتركيب المجفف الشمسي في منطقة الوادي. تم استخدام صفائح الساندويتش والبولي كربون في تشكيل هيكل المجفف وتوفير العزل الحراري اللازم. تمت مناقشة الزوايا المثلى لتركيب المجفف وأثرها على أداء عملية التجفيف. تم تسجيل درجات الحرارة العالية في مختلف نقاط المجفف والبيئة الخارجية. أظهرت النتائج أن المجفف يعمل بكفاءة عالية ويمكنه تجفيف العينات بشكل سريع وفعال

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف , التجفيف الشمسي , الطاقة الشمسية , البيوت الدفيئة

## Abstract

The thesis addresses the general principles of the drying process and its importance in preserving the quality of materials and products over time. Emphasis is placed on the use of solar dryers as a drying tool and to provide suitable conditions for the drying process. The thesis focuses on the design and installation of a solar dryer in the EL-OUED region. Sandwich panels and polycarbonate were used to form the structure of the dryer and provide the necessary thermal insulation. The optimal installation angles of the dryer and their impact on the drying process performance were discussed. Tests and measurements were conducted to evaluate the performance of the dryer, where high temperatures were recorded at different points within the dryer and the external environment. The results showed that the dryer operates effectively and can quickly and efficiently dry the samples.

**Keywords :** drying, solar drying, solar energy, greenhouses

## Liste de figure

Figure I. 1 séchage solaire naturel de certains légumes et fruits .....	5
Figure I. 2 Anciennes méthodes de séchage au soleil .....	5
Figure I. 3 Séchage solaire.....	6
Figure I. 4 Présentation schématique d'un produit humide .....	7
Figure I. 5 Vitesse de séchage $-dM/dt=f(M)$ .....	12
Figure I. 6 Vitesse de séchage $-dM/dt=f(t)$ .....	12
Figure I. 7 courbes de séchage.....	12
Figure I. 8 Schéma représente types des séchoirs solaire .....	13
<b>Figure I. 9 : (a) Séchoirs solaires directs simples, (b) principe d'un séchoir solaire direct[19].....</b>	<b>14</b>
.Figure I. 10 (a) Séchoirs solaires indirect ;(b) principe d'un séchoir solaire indirect [20].	15
Figure I. 11 : (a) Séchoir solaire mixte;(b) principe d'un séchoir solaire mixte [22].....	16
Figure I. 12 : Séchoir solaire hybride [22].....	17
Figure II. 1serres de sechage .....	20
Figure II. 2 séchage naturel des boues sous serres .....	21
Figure II. 3 Principe de fonctionnement d'une serre de séchage [28].....	22
Figure II. 4 sècheuse améliorée de serre (a) vue extérieure, (b et c) vue intérieure [29].....	23
Figure II. 5 Configuration expérimentale pour le séchage en plein soleil et le séchage en serre en mode passif [15]. .....	23
Figure II. 6 Dispositif expérimental de séchage sous serre en mode actif [31].....	26
Figure II. 7 <b>Montage expérimental de séchage sous serre sous convection forcée pour le séchage du jaggery [34].</b> .....	<b>26</b>
<b>Figure III. 1 La conception du séchoir solaire .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure III. 2 La structure métallique du séchoir solaire .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure III. 3 Les panneaux sandwich ont été installés dans le séchoir solaire .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure III. 4 Le polycarbonate utilisé dans l'industrie des séchoirs solaires.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure III. 5 Le silicone utilisé pour combler les espaces vides .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III. 6 Les angles en fer utilisés dans la fabrication du séchoir solaire .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III. 7 La peinture noire utilisée pour peindre le séchoir solaire .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure III. 8 les portes du séchoir solaire.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure III. 9 Le ventilateur utilisé dans le séchoir solaire.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure III. 10 L'installation de la structure du séchoir solaire .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III. 11 Les étapes d'installation des panneaux sandwich dans la structure.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III. 12 Peindre les feuilles sandwich en couleur noire.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III. 13 L'installation du polycarbonate dans le séchoir solaire.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III. 14 La fixation des angles en fer dans le séchoir solaire.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III. 15 L'installation des portes dans le séchoir solaire.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure III. 16 La ventilation du séchoir solaire .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III. 17 la forme final du séchoir solaire .....</b>	<b>43</b>

<b>Figure IV. 1</b>	<b>Figure IV. 1 Disposition du persil sur les étagères.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV. 2</b>	<b>Placement d'échantillons à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir pour mesurer le poids de l'échantillon.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV. 3</b>	<b>Introduire les étagères dans le séchoir solaire.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure IV. 4</b>	<b>Appareil de mesure de la température .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure IV. 5</b>	<b>appareil de mesure du rayonnement solaire.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV. 6</b>	<b>La balance .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV. 7</b>	<b>Un graphique représente les niveaux de rayonnement solaire en fonction du temps.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV. 8</b>	<b>Des courbes graphiques représentent la température en fonction du temps .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV. 9</b>	<b>Figure IV. 10 Des courbes graphiques représentent la température en fonction du temps .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure IV. 11</b>	<b>Tracé graphique représentant la teneur en humidité du persil en fonction du temps .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure IV. 12</b>	<b>Le persil après avoir terminé le processus de séchage .....</b>	<b>55</b>

## **Liste de tableau**

<b>Tableau I. 1</b>	<b>Quelques exemples des méthodes de séchage.....</b>	<b>7</b>
---------------------	-------------------------------------------------------	----------

# Sommaire

<b>Introduction général</b> .....	<b>1</b>
Chapitre I : généralité sur séchage solaire .....	5
I.1 Introduction .....	4
I.2 Définition.....	4
I.3 Historique .....	5
I.4 but de séchage .....	6
I.5 Principe de séchage.....	6
I.6 Mode de séchage .....	7
I.6.1 séchage mécanique .....	7
I.6.2 séchage chimique .....	8
I.6.3 séchage thermique.....	8
I.7 Différents modes de séchage .....	8
I.7.1 Séchage par conduction.....	8
I.7.2 Séchage par convection (ou par entrainement).....	8
I.7.3 Séchage par rayonnement.....	9
I.7.4 Séchage par micro-ondes .....	9
I.7.5 Lyophilisation .....	9
I.7.6 Séchage solaire.....	9
I.8 Terminologie du séchage .....	9
I.8.1 Humidité .....	9
I.8.2 Taux d'humidité.....	10
I.8.3 Humidité absolue d'un solide .....	10
I.8.4 Humidité relative.....	10
I.8.5 Effet des paramètres sur le séchage.....	10
<b>I.8.6 Température .....</b>	<b>11</b>
I.8.7 Débit massique .....	11
I.8.8 Humidité relative de l'air .....	11
I.8.9 Teneur en humidité du produit de séchage.....	11
I.8.10 Vitesse de séchage .....	11
I.9 Classification des types de séchoirs solaires.....	13
I.9.1 Les séchoirs solaires directs .....	13
I.9.2 Les séchoirs solaires indirects .....	15
I.9.3 Les séchoirs mixtes .....	16

I.9.4	Les séchoirs hybrides.....	16
I.10	Conclusion.....	18
Chapitre II : Généralité sur les serres .....		19
II.1	Introduction .....	20
II.2	Définition.....	20
II.3	Principe du séchage solaire sous serre : [26][27] .....	21
II.4	Classification des séchoirs à effet de serre.....	22
II.4.1	Séchoir de serre en mode passif.....	23
II.4.2	Séchoir de serre en mode Active .....	25
II.5	Conclusion.....	28
Chapitre III : Conception et réalisation d'un séchoir solaire.....		29
III.1	Introduction .....	30
III.2	La conception du séchoir solaire .....	30
III.3	Les matériaux utilisée .....	31
III.3.1	La structure en fer .....	31
III.3.2	Les panneaux sandwich .....	32
III.3.3	polycarbonate .....	33
III.3.4	silicone .....	34
III.3.5	Les angles en fer.....	35
III.3.6	La peinture noire .....	36
III.3.7	Les portes.....	36
III.3.8	Ventilateur .....	37
III.4	Les étapes d'installation d'un séchoir solaire .....	38
III.5	Conclusion.....	44
Chapitre IV : résultat et discussion .....		45
IV.1	Introduction .....	46
IV.2	La préparation du produit.....	46
IV.3	Les instruments de mesure .....	48
IV.3.1	Appareil de mesure de la température .....	48
IV.3.2	L'appareil de mesure du rayonnement solaire.....	49
IV.3.3	La balance .....	50
IV.4	Résultat .....	51
IV.4.1	La variation du rayonnement solaire au fil du temps .....	51
IV.4.2	La variation de la température avec le temps .....	52
IV.4.3	Étude cinétique du séchage .....	54

IV.5	Certaines images du produit (le persil) après séchage.....	55
IV.6	Conclusion.....	56
	Conclusion général.....	55

# **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

L'augmentation de la population mondiale est liée à une demande croissante en énergie et en alimentation. Il est bien connu que la consommation d'énergie traditionnelle telle que le pétrole et le gaz entraîne une augmentation de la pollution et des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ce qui provoque de grandes catastrophes environnementales telles que les inondations, entre autres. L'Algérie n'est pas épargnée par ces catastrophes.

L'Algérie consomme une quantité importante de carburant chaque année, atteignant 17,7 millions de tonnes en 2022, ainsi que 49 térawatts d'énergie, et cette proportion est susceptible d'augmenter. L'Algérie, en particulier les régions désertiques comme EL OUED , bénéficie d'un fort rayonnement solaire d'environ 6100 watts par heure par mètre carré chaque année. EL OUED est également connue comme une ressource essentielle en produits agricoles pour les Algériens, en particulier les pommes de terre et les tomates. Cependant, ces deux avantages posent un défi aux agriculteurs lorsque l'offre dépasse la demande, ce qui nous pousse en tant que chercheurs à rechercher des solutions efficaces pour préserver l'excédent de produits agricoles, en utilisant autant que possible des sources d'énergie alternatives et en veillant à leur faible coût et à leur durabilité.

Dans cette recherche, l'équipe de recherche vise à améliorer les performances des séchoirs solaires à effet de serre pour augmenter leur efficacité. Un séchoir solaire à effet de serre a été conçu en tenant compte des conditions météorologiques et géographiques locales d'EL OUED . Les étapes suivantes sont suivies dans le processus de conception :

Le premier chapitre discute des généralités du processus de séchage solaire et de son importance dans la conservation et la préservation de la qualité des produits agricoles.

Le deuxième chapitre examine les informations générales sur les serres et leur utilisation dans le processus de séchage, ainsi que leurs différentes classifications.

Le troisième chapitre concerne la conception et l'installation du séchoir solaire à effet de serre adapté à la région d'EL OUED , en tenant compte des conditions météorologiques et géographiques locales pour assurer ses performances optimales dans cette région.

Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats et les mesures obtenus à partir de la recherche. Les performances globales du séchoir solaire à effet de serre sont discutées et les résultats sont analysés pour évaluer son efficacité dans le processus de séchage.

*Chapitre I*  
*Généralités sur le séchage*  
*solaire*

## **I.1 Introduction**

On considère en général que l'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus prépondérante. Le soleil perd environ  $4,5 \times 10^9$  par second tonnes de sa substance convertie en rayonnement solaire. Cependant, la Terre n'accepte que de très petites quantités de ces rayonnements, ce qui correspond à  $18 \times 10^{13}$  kW

Le séchage par rayonnement solaire est l'une des méthodes les plus courantes ancien solaire. Depuis les temps anciens, le séchage a été principalement utilisé pour conserver les aliments, mais il peut également être appliqué à d'autres matériaux utiles, tels que les tissus et les matériaux de construction.

Actuellement, différentes méthodes de séchage sont utilisées, telles que le séchage par micro-ondes et la lyophilisation, qui sont toutes des consommatrices importantes d'énergie (représentant environ 10 à 15 % de la consommation mondiale d'énergie industrielle), contrairement au séchage solaire. De plus, ce processus est difficile, surtout dans les zones rurales où l'approvisionnement L'énergie (électricité, gaz...) est souvent difficile. L'exploitation de l'énergie solaire gratuite peut constituer une solution avantageuse pour réduire les coûts du processus de séchage, notamment dans les pays en développement.

Dans cette section, nous présenterons les paramètres de base du contrôle Phénomène de séchage, diverses théories et méthodes de séchage, caractéristiques Air humide et solides humides Enfin une introduction aux différents types de séchoirs utilisés.

## **I.2 Définition :**

Le séchage d'un produit consiste à extraire la majeure partie de l'eau qu'il contient jusqu'à Amenez-le dans un état où il est jugé suffisamment sec pour bien se conserver. ce Ainsi, la dessiccation peut réduire voire éliminer les pertes de récolte dues à la dégradation, et donc, Atteindre l'autosuffisance en produits de saison comme les tomates au fil du temps. Les objectifs à travers ce séchage sont :

- ❖ Stocker pour vendre des produits en cas de pénurie et passer le mot consommation de produits.
- ❖ Rénovation des produits invendus.
- ❖ Expédition et commercialisation plus faciles.

Cependant, cette manipulation s'accompagne toujours de goût, d'apparence et Perte de qualité nutritionnelle ou d'hygiène du produit.



Figure I. 1 séchage solaire naturel de certains légumes et fruits

### 1.3 Historique

Le séchage est une technique très ancienne qui a été utilisée pour diverses fins, notamment pour la conservation de produits agricoles et alimentaires tels que les céréales, les graines, les fourrages, la viande et le poisson séchés, le jambon, les figues, les noix, le tabac, etc. Il est également utilisé pour préparer des matériaux tels que les briques en terre cuite, la céramique, la poterie, le bois, etc. Avant la cuisson, cette méthode est utilisée pour préparer des matériaux tels que les briques en terre cuite, la céramique, la poterie, le bois, etc. Elle est également appliquée aux textiles (par exemple, pour le lavage, la teinture, etc.) et aux peaux.

Pour les applications traditionnelles, le séchage "naturel" à l'air ambiant est encore largement utilisé. Le séchage "artificiel" avec l'apport d'énergie est une technique complémentaire qui permet une meilleure régularité face aux conditions climatiques difficiles ou pour la production de nouveaux produits tels que le lait en poudre, le café "instantané", les pâtes sèches à longue durée de conservation, etc [1].



Figure I. 2 Anciennes méthodes de séchage au soleil

### I.4 But de séchage

L'objectif du processus de séchage est de diminuer la teneur en eau des produits jusqu'à une valeur qui empêche la prolifération de micro-organismes, ce qui permet leur stockage dans des conditions normales.

Les avancées de la science et de la technologie ont conduit à la mise en place de diverses méthodes et types de séchoirs [2, 3]. Dans le cas de la production de thé, café, fruits, haricots, riz, épices, caoutchouc, cacao et bois, l'utilisation de séchoirs solaires à air est considérée comme la méthode idéale pour le séchage des cultures (voir Figure I.2).

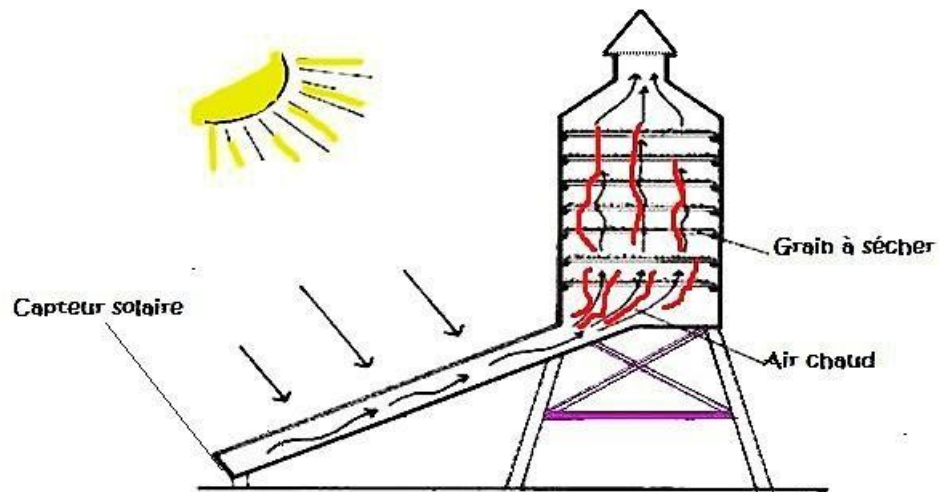


Figure I. 3 Séchage solaire

### I.5 Principe de séchage

Pour sécher le produit, il suffit de le ventiler avec de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité a lieu entre cet air et le produit humide. L'air chaud transfère une partie de sa chaleur au produit, et le produit génère à sa surface une pression d'eau supérieure à celle de l'air utilisé pour le séchage. Ce différentiel de pression provoque le transfert de matière de la surface solide vers l'air sec. Par conséquent, il existe deux facteurs importants pour contrôler le processus de séchage : 1. Le transfert de chaleur fournit la chaleur latente de vaporisation nécessaire 2. Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide l'extrait du produit. Le produit humide peut être représenté schématiquement comme le montre la Figure I.3. Un solide a un film d'eau qui adhère à sa surface extérieure par des forces de surface [4].

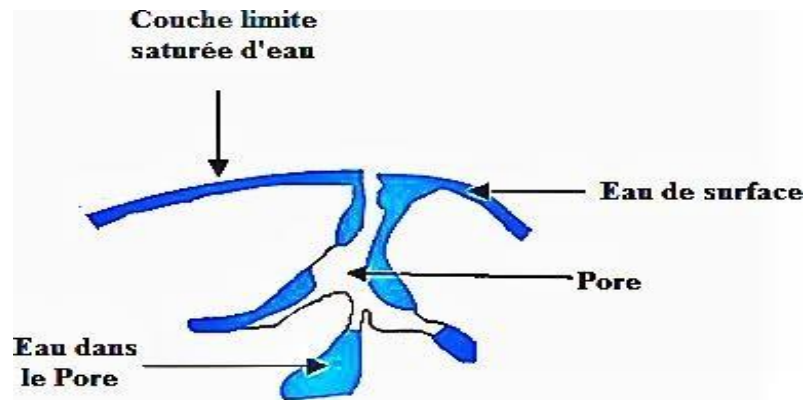


Figure I. 4 Présentation schématique d'un produit humide

### I.6 Mode de séchage :

Le mode de séchage repose sur deux types de transfert :

- Transférer l'énergie thermique de l'environnement au liquide à évaporer.
- Transfert de masse de l'intérieur du solide vers la surface puis vers la phase gazeuse. La vitesse de séchage est directement liée à la vitesse de ces deux phénomènes.

#### I.6.1 Séchage mécanique

C'est l'élimination de liquides par une force purement mécanique (pression, centrifugation, ...). Certains procédés de pré-concentration et de pré-séchage peuvent être réalisés sans transfert de chaleur mais par simple transfert de quantité de mouvement.

Tableau I. 1 Quelques exemples des méthodes de séchage

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 l'osmose inverse (concentration de jus) à cette liste, bien que cette technologie constitue un cas limite, il s'agit plus d'une opération de transfert de masse que d'un processus de transfert de quantité de mouvement, et l'eau subit déjà un changement d'état au fur et à mesure. à la membrane. L'élimination de l'eau par des moyens mécaniques

présente trois caractéristiques principales, qui contrastent fortement avec les techniques utilisant le transfert de chaleur [2].

### **I.6.2 Séchage chimique**

C'est un procédé basé sur l'extraction de l'eau à l'aide de produits de déshydratation (osmolarité) (chlorure de calcium, etc.) [2].

### **I.6.3 Séchage thermique**

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse, nécessitant une certaine quantité d'énergie apportée par transfert de chaleur pour pré-"activer" l'eau. Ces deux transferts se produisent dans la phase interne et la phase externe :

- ❖ Transfert de chaleur externe, de la source de chaleur à la surface du produit.
- ❖ Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- ❖ Transfert de masse interne, du noyau à la surface du produit.
- ❖ Transfert de masse externe de la surface du produit vers l'environnement extérieur[3].

## **I.7 Différents modes de séchage**

Les opérations de séchage peuvent être réalisées de plusieurs manières. critères de classement Le plus couramment utilisé est basé sur le modèle de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [7] :

### **I.7.1 Séchage par conduction**

Le produit à sécher est en contact direct avec une paroi solide chaude, où L'échange de chaleur se produit par contact entre la surface chaude de la paroi et le produit. ce La méthode de séchage est largement utilisée dans l'industrie de la papeterie textile. [7] .

### **I.7.2 Séchage par convection (ou par entrainement)**

Un souffle d'air chaud est soufflé sur le produit à sécher. il surgit spontanément entre La différence de température et de pression d'humidité entre ce produit et l'air est la suivante :

- Transfert de chaleur de l'air au produit en raison de la différence de température.
- En raison de la différence de concentration d'eau dans l'air, l'eau se déplace dans la direction opposée. Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels et est très Pour l'industrie alimentaire. [8]

### **I.7.3 Séchage par rayonnement**

Un rayonnement infrarouge est appliqué au produit. il permet un chauffage rapide Produit en couche mince (500µm). Le rayonnement est produit par électronique (micro-ondes) ou en augmentant la température de l'émetteur Infrarouge. Ce modèle est largement utilisé dans l'industrie du revêtement et du film la photographie. [7]

### **I.7.4 Séchage par micro-ondes**

Les ondes pénètrent dans le matériau et subissent une atténuation de puissance associée transfert. Avec le micro-ondes, vous pouvez sécher à une épaisseur plus épaisse qu'avec le micro-ondes Infrarouge[7]

### **I.7.5 Lyophilisation**

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation Les cristaux de glace, c'est-à-dire le passage direct de l'état solide (glace) à l'état gazeux. ce Ces derniers sont ensuite évacués de la chambre de séchage au moyen d'une pompe à vide mécanique ou éjecteur de vapeur. [7]

### **I.7.6 Séchage solaire**

Il suffit de chauffer le produit par rayonnement solaire direct (séchage directement) ou via des capteurs solaires utilisés pour capter et/ou concentrer Le rayonnement solaire augmente la température de l'air (séchage indirect). de ce modèle Le séchage est principalement utilisé dans l'industrie alimentaire.

Les différentes méthodes de séchage ci-dessus, en plus du séchage au soleil, Sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle dans le monde entier). De plus, ces procédés sont difficiles à mettre en œuvre, surtout dans certaines régions Des zones rurales où l'accès à l'énergie (électricité, gaz, etc.) est souvent difficile. donc L'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile pour réduire les coûts de traitement Surtout dans les pays en voie de développement. [9]

## **I.8 Terminologie du séchage:**

### **I.8.1 Humidité:**

Ce terme désigne un liquide contenu dans un solide , un liquide ou une pâte et doit Enlevé pendant le séchage [10].

**I.8.2 Taux d'humidité :**

Il s'agit de la masse de liquide par unité de masse de matière à sécher . Bien que terminé Souvent appelée matière humide , la teneur en humidité est mieux exprimée de la manière suivante par rapport aux matériaux anhydres.

**I.8.3 Humidité absolue d'un solide :**

Humidité ou teneur en humidité autorisée ou teneur en humidité ( $Kgav/Kgas$ ) on a base sèche , où Plus simplement , l'humidité s'exprime par le liquide contenu dans le produit et son humidité relative masse sèche

$$X = \frac{Mh}{Ms} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (I.1)$$

**X** : Humidité absolue d'un solide [kg eau / kg ( $M_s$ )].

**M<sub>h</sub>**: Masse humide de produit [kg].

**M<sub>s</sub>**: Masse sèche de produit [kg].

**I.8.4 Humidité relative :**

L'humidité relative ou l'humidité est un rapport des pressions partielles Vapeur dans un mélange, à pression de saturation dans le même mélange, à Même température [11] :

$$X = \frac{Mh}{Ms} = \frac{Mh - Ms}{Ms} = H \frac{Pv}{Ps(T)} 100 \quad (I.2)$$

**I.8.5 Effet des paramètres sur le séchage :**

Le paramètre le plus important déterminant la qualité du produit séché, Comme indiqué ci-dessous [12] :

**I.8.6 Température :**

La température de séchage détermine principalement la qualité du produit séché. Des températures de séchage élevées nuisent à la capacité de germination des graines et peut endommager le produit, des températures de séchage plus basses peuvent Temps de séchage long, pouvant entraîner une contamination microbienne

**I.8.7 Débit massique :**

Le débit massique joue également un rôle important dans le processus de séchage. Le débit massique optimal est conçu en fonction des exigences de température et de la vitesse maximale de l'air, qui peut être conservé dans une pièce sèche [13]

**I.8.8 Humidité relative de l'air :**

L'humidité relative ou humidité est le rapport de la pression partielle d'une vapeur dans un mélange à sa pression de saturation dans le même mélange à la même température [14] :

$$Hr = \frac{P_v}{P_s(T)} 100 \quad H0\% < Hr < 100\% \quad (I.3)$$

**I.8.9 Teneur en humidité du produit de séchage:**

La teneur en humidité du produit à sécher est un facteur important. Déterminer la qualité du produit, déterminant ainsi la valeur marchande. Le temps de séchage s'est avéré plus élevé pour la teneur en eau que pour la teneur en humidité beaucoup plus faible [14]

**I.8.10 Vitesse de séchage :**

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée des solides séchés par unité de temps et la masse des solides séchés, ou simplement la différence de teneur " $\Delta m$ " divisée par l'intervalle de temps " $\Delta t$ ", qui est le paramètre qui caractérise réellement le taux de transfert.

La vitesse de séchage dépend d'un certain nombre de paramètres, dont les plus importants sont:

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air. [15]

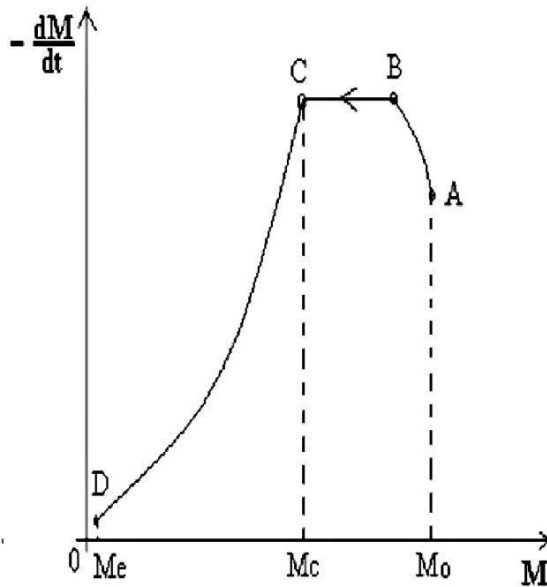


Figure I. 5 Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(M)$

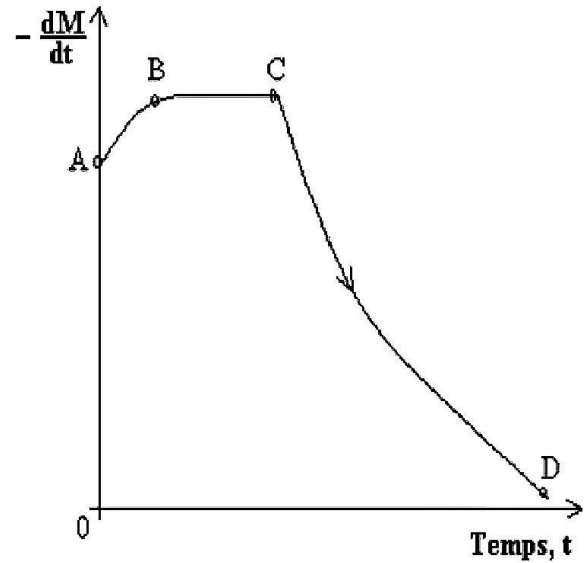


Figure I. 6 Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(t)$

Pour chaque produit, courbe représentative Décrit Les caractéristiques de séchage de ce produit dans des conditions spécifiées de température, de vitesse et de pression. La figure (I-8) montre une courbe de séchage typique. La variation de cette courbe se produit principalement dans la relation entre la vitesse relative et la vitesse du porteur et la température [16].

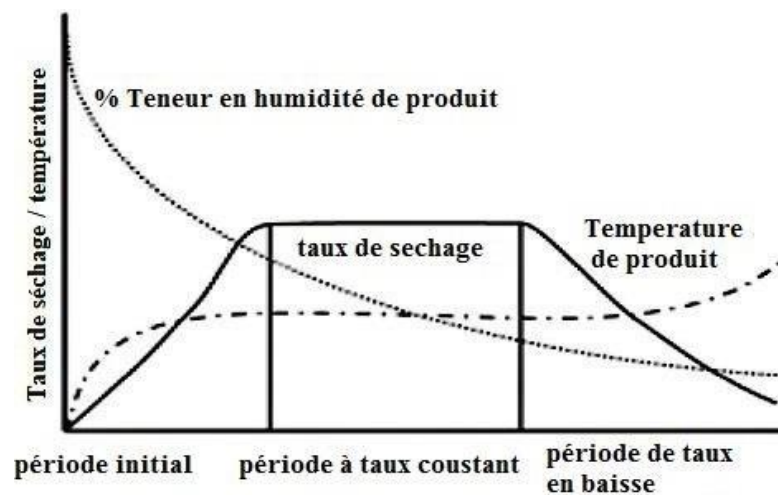


Figure I. 7 courbes de séchage

- **Phase 1** : période tarifaire initiale ou période tarifaire majorée.
- **Phase 2** : Période de taux d'intérêt constant.
- **Phase 3** : période de baisse des taux d'intérêt

### I.9 Classification des types de séchoirs solaires

Les différents types de séchoirs sont déterminés par la forme d'énergie qu'ils consomment. Les séchoirs électriques, à gaz et hybrides sont les types les plus courants. Il existe également plusieurs gammes de séchoirs solaires, qui sont classés selon leur méthode de fonctionnement. Les séchoirs solaires directs utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'air directement, tandis que les séchoirs solaires indirects utilisent l'énergie solaire pour chauffer un fluide caloporteur, qui est ensuite utilisé pour chauffer l'air. Les séchoirs solaires mixtes utilisent à la fois des méthodes directes et indirectes pour chauffer l'air [17]

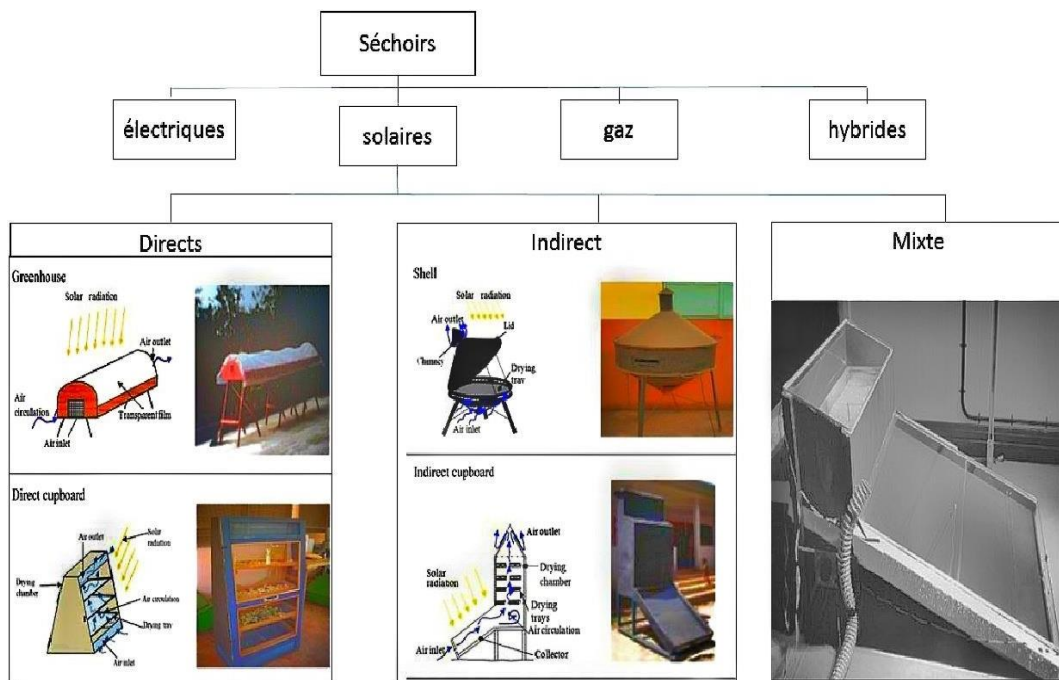


Figure I. 8 Schéma représente types des séchoirs solaire.

#### I.9.1 Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont conçus pour que les rayons du soleil frappent directement le produit à sécher. Ils sont généralement constitués d'une seule pièce qui fait office de chambre de séchage et de capteur solaire. La forme du séchoir peut varier en fonction du type de produit et de la quantité à sécher, mais la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée à un angle précis et orientée vers le sud (voir Figure I.5). La chaleur nécessaire pour sécher le produit est produite par l'absorption des rayonnements solaires qui pénètrent à travers la surface transparente de la chambre de

séchage. Ce type de séchoir est simple à construire et est souvent utilisé pour des petites quantités de produits.

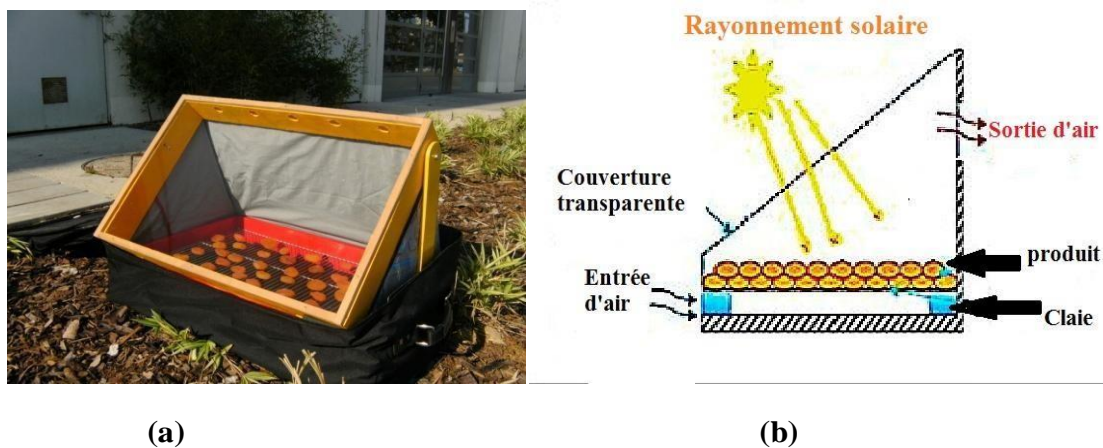


Figure I. 9 : (a) Séchoirs solaires directs simples, (b) principe d'un séchoir solaire direct[19]

### I.9.1.1 Les avantages et les inconvénients

#### a- Les avantages:

-Comparé au séchage traditionnel, les produits bénéficient d'une meilleure protection contre les poussières, les insectes et la pluie.

- Aucune expertise professionnelle n'est requise.

- Il existe de nombreuses opportunités de conception étendues.

#### b- Les inconvénients

-La qualité des produits peut se détériorer en raison de l'exposition directe au soleil, entraînant la destruction des vitamines A et C, le flétrissement et la décoloration [18].

-Les matériaux en polyéthylène sont sujets à la fragilité, nécessitant ainsi un remplacement régulier.

- La température élevée dans le séchoir, combinée à l'exposition au soleil, entraîne la destruction des nutriments [19].

### I.9.2 Les séchoirs solaires indirects

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas directement exposés au rayonnement solaire. Au contraire, ils sont protégés de la lumière, ce qui permet une meilleure préservation de leurs qualités nutritionnelles. Les séchoirs indirects se composent généralement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage. Le capteur solaire, fixé sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil, est conçu pour maximiser la capture de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée supérieure et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est chauffé dans le capteur solaire, puis dirigé vers la chambre de séchage. Pendant ce trajet, un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent.

Les séchoirs solaires indirects présentent l'avantage de préserver davantage les caractéristiques de l'aliment, telles que sa couleur, ses propriétés organoleptiques et sa valeur nutritive [17]. C'est pourquoi ils sont particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.



**Figure I. 10 (a) Séchoirs solaires ; (b) principe d'un séchoir solaire indirect [20]**

#### Les Avantages

- En évitant une exposition directe au soleil, le produit préserve sa couleur et sa valeur nutritionnelle, notamment en ce qui concerne les vitamines A et C.
- Il est possible de construire localement ce type de séchoirs à un coût réduit [20].

Ces séchoirs fonctionnent sans avoir besoin d'énergie électrique ou de combustibles fossiles [21].

### Les Inconvénients

- La vitesse de séchage peut varier considérablement en fonction des conditions climatiques et de la conception du séchoir.
- Les matières en polyéthylène utilisées peuvent être fragiles et nécessiter un remplacement régulier.
- La maintenance de ces séchoirs nécessitent du personnel qualifié.
- La production et l'investissement pour ces séchoirs sont associés à des coûts élevés.

### I.9.3 Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs sont une fusion des séchoirs directs et indirects, utilisant à la fois le rayonnement solaire direct sur les produits et l'air préchauffé par des capteurs pour fournir la chaleur nécessaire au processus de séchage. [22]

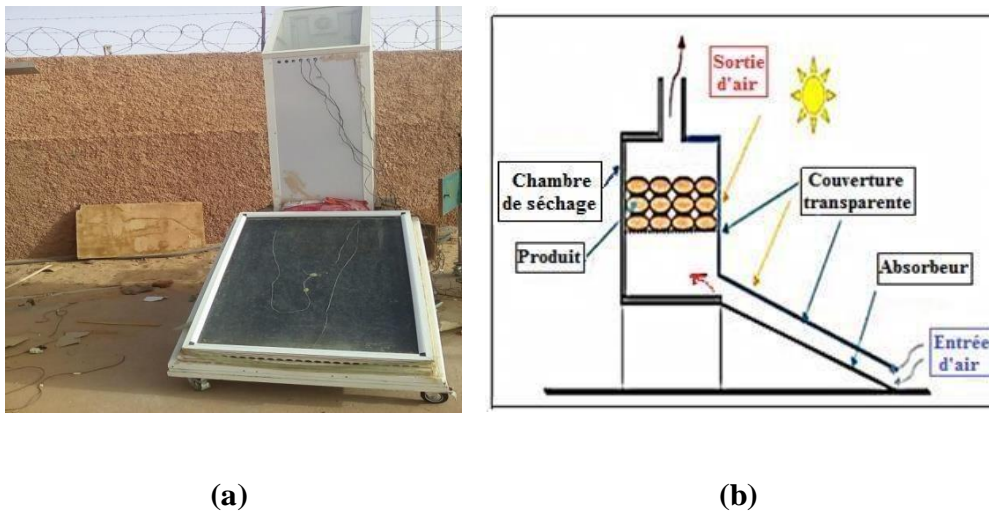


Figure I. 11 : (a) Séchoir solaire mixte; (b) principe d'un séchoir solaire mixte [22]

### I.9.4 Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent une source d'énergie supplémentaire telle que le fuel, l'électricité, le bois, etc., pour garantir un chauffage de l'air à un niveau élevé ou assurer la ventilation nécessaire. L'énergie supplémentaire peut être intégrée à deux emplacements différents du

séchoir : le maintien d'une température constante à l'aide d'un brûleur à gaz, d'une résistance électrique ou d'un feu de bois. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire et est utilisée principalement pour préchauffer l'air [22].

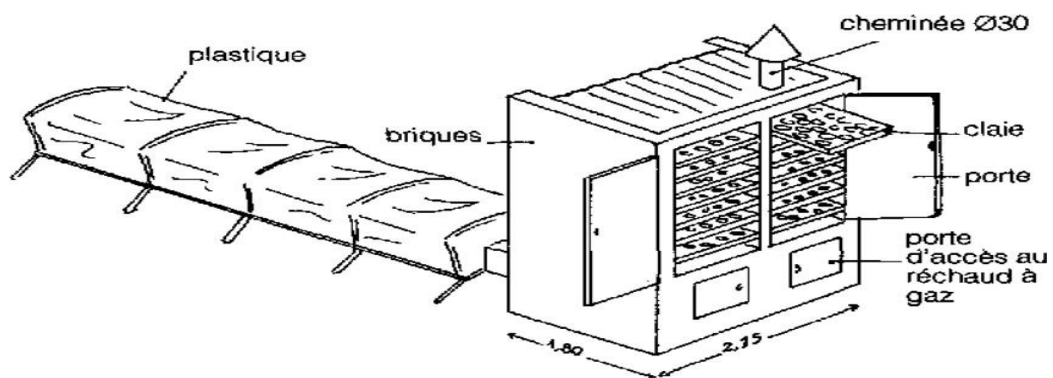


Figure I. 12 : Séchoir solaire hybride [22].

#### I.9.4.1 Les avantages et les inconvénients

##### a-Avantages

- Indépendance vis-à-vis des conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage
- Une augmentation significative de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car ce dispositif peut fonctionner la nuit ou pendant la saison des pluies si nécessaire.

##### b-Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.

- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

### **I.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts fondamentaux du séchage solaire et de ses outils complémentaires. Le séchage solaire se présente comme un domaine de recherche vaste et prometteur, aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental. Comparativement à d'autres méthodes de conservation telles que l'appertisation, la congélation ou le traitement aseptique, le séchage solaire présente généralement moins d'inconvénients. Il s'avère être une méthode de conservation largement utilisée pour les fruits, les légumes et les épices en raison de son efficacité. En éliminant l'humidité, le séchage solaire préserve la qualité des aliments, réduisant ainsi la prolifération de micro-organismes responsables de la détérioration. Les aliments séchés conservent ainsi leurs propriétés nutritives et leur saveur plus longtemps. Le séchage solaire continue d'être une méthode privilégiée de conservation et offre encore un potentiel de recherche prometteur pour de nouvelles avancées tant sur le plan théorique qu'expérimental.

*Chapitre II*  
*Généralités sur les serres*

## II.1 Introduction :

Le séchoir à effet de serre est peu coûteux et facile à fabriquer. Il peut être utilisé partout pour la culture, le chauffage, la solarisation des sols, la volaille et l'aquaculture. Les chercheurs ont découvert qu'il fonctionne également pour le séchage à basse température, rendant la serre économiquement viable sans frais d'exploitation. [23]

Des chercheurs ont travaillé sur l'optimisation du séchoir à effet de serre en réduisant ses pertes. La perte solaire à travers le mur nord a été identifiée comme la plus importante. Différents concepts ont été proposés, comme l'utilisation d'un stockage thermique dans le mur nord. Un test a été réalisé pour sécher des oignons dans le séchoir proposé. Les oignons ont mis seulement vingt-quatre heures à sécher dans le séchoir proposé. [24;25].

Les serres sont l'un des moyens importants de l'agriculture visant à fournir un environnement protégé qui améliore la croissance des plantes et augmente leur productivité. Les types de serres varient en fonction de plusieurs facteurs tels que le chauffage, la ventilation et le contrôle climatique.

Dans ce chapitre, nous aborderons les classifications des serres en mettant l'accent sur les serres passives et les serres actives.



Figure II. 1 serres de séchages

## II.2 Définition :

Les structures connues sous le nom de serres de séchage ont été créées spécifiquement pour accélérer le processus de séchage des produits agricoles. Contrairement aux enclos conventionnels de croissance des plantes, ces enclos sont conçus pour créer un environnement idéal pour le séchage des produits en contrôlant précisément des variables telles que la température, l'humidité et le flux d'air. [28]

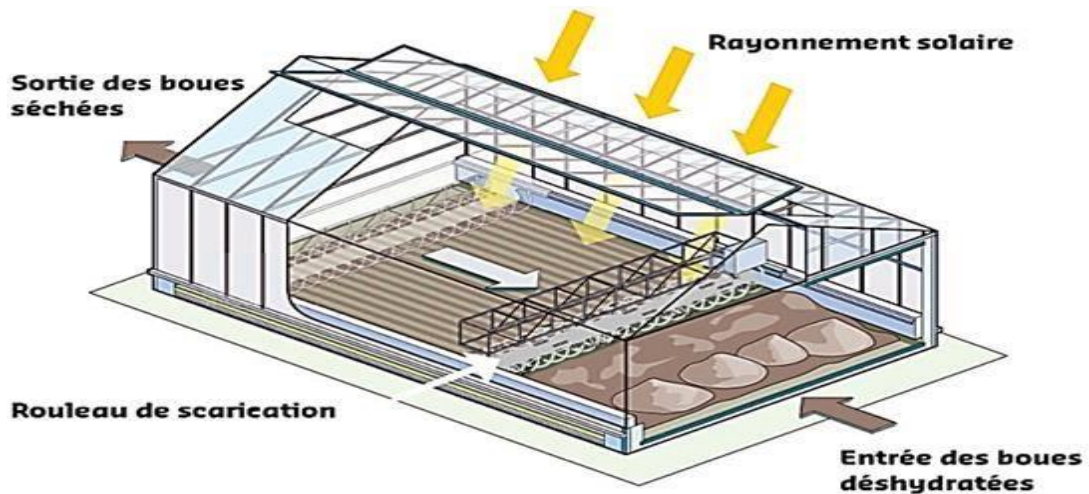


Figure II. 2 séchage naturel des boues sous serres

### II.3 Principe du séchage solaire sous serre : [26][27]

L'énergie provenant de l'éclairage solaire est émise dans deux plages, l'une dans le spectre visible et l'autre dans le spectre infrarouge. Le principe de l'effet de serre repose sur le fait que les parois et le toit de la serre sont constitués de matériaux ayant des propriétés différentes dans ces deux domaines spectraux : ils sont transparents aux rayons solaires, permettant à la chaleur du soleil (correspondant aux courtes longueurs d'onde) de passer à travers, mais ils ne laissent pas passer les rayons infrarouges (correspondant aux longues longueurs d'onde).

Le processus de séchage solaire sous serre d'un produit exploite ce concept pour accélérer l'élimination de l'eau contenue dans le produit à déshydrater. Grâce à l'exposition à la fois à la lumière solaire et à l'éclairage infrarouge émis par le matériau transparent de la serre, la surface du produit se réchauffe, ce qui augmente la pression de la vapeur d'eau à sa surface et favorise ainsi l'évaporation. Un flux d'air frais est introduit dans la serre pour évacuer la vapeur d'eau résultant du processus de séchage. Ce flux peut être généré par convection forcée ou par convection naturelle. Dans notre cas, il s'agit de la convection naturelle.

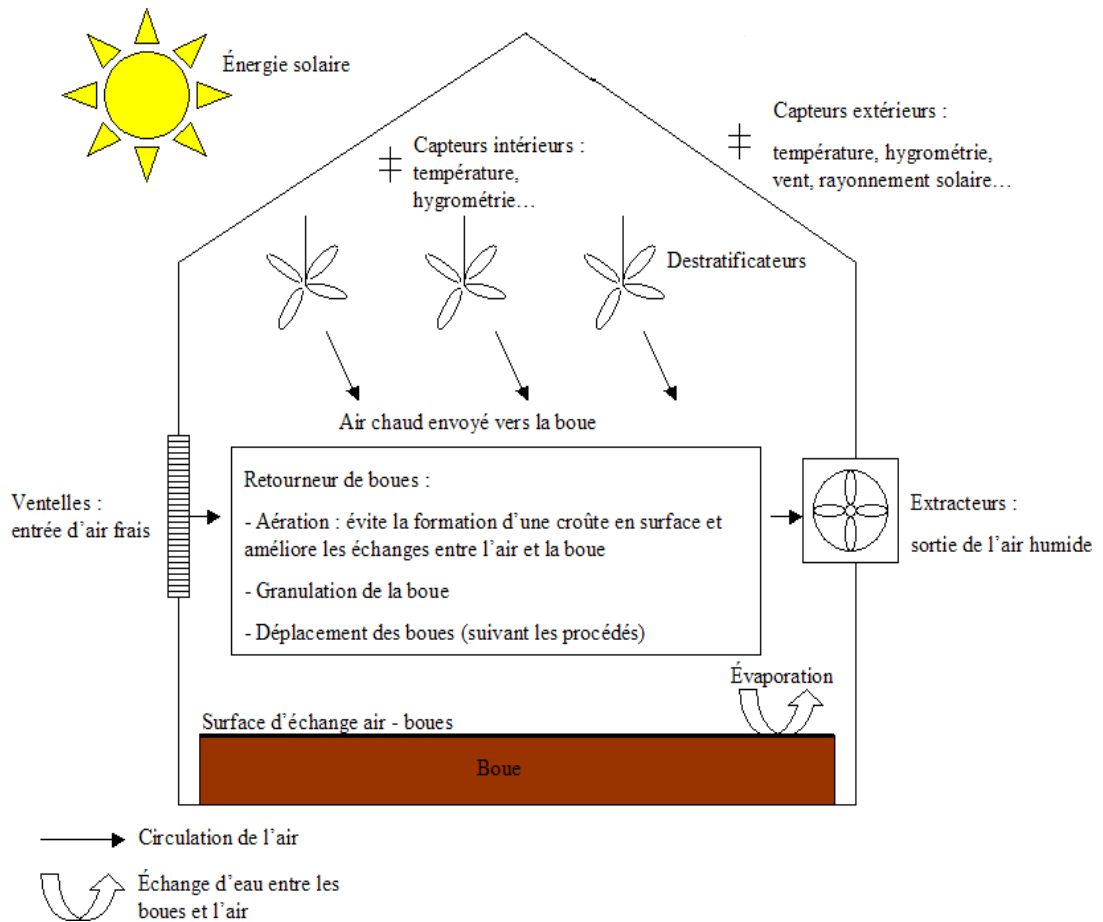


Figure II. 3 Principe de fonctionnement d'une serre de séchage [28]

#### II.4 Classification des séchoirs à effet de serre :

Le séchage solaire a connu récemment une évolution notable, caractérisée par l'amélioration des technologies et des méthodes utilisées. Cela inclut des progrès dans l'efficacité énergétique, l'utilisation de capteurs solaires plus performants et l'optimisation des processus de séchage, offrant des avantages économiques et environnementaux.

## II.4.1 Séchoir de serre en mode passif :

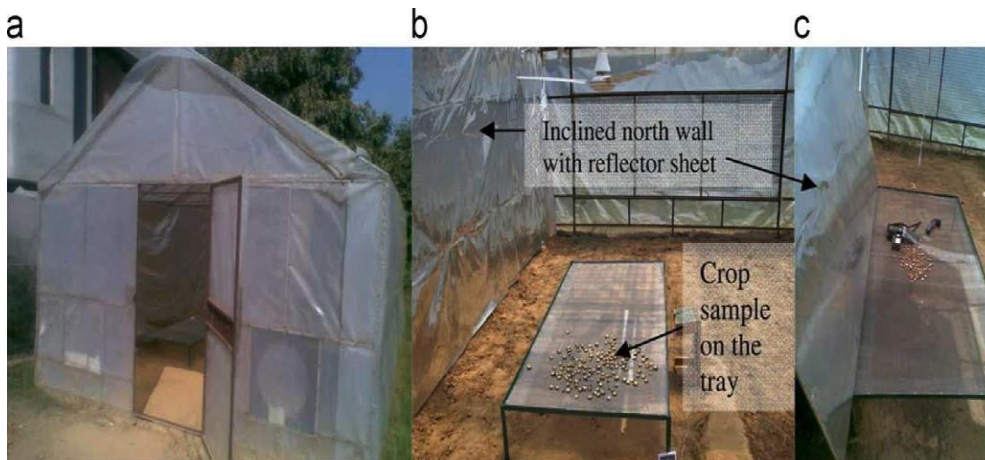


Figure II. 4 sécheuse améliorée de serre (a) vue extérieure, (b et c) vue intérieure [29].

**Jain et Tiwari** ont conçu un séchoir à serre utilisant la convection naturelle pour sécher le chou et les pois, en comparaison avec le séchage en plein soleil, (figure 3) [30]. Le coefficient de transfert de masse convectif ( $h_c$ ) a été calculé pour les deux méthodes de séchage. Les résultats ont démontré que le séchage passif à l'intérieur du séchoir à serre présentait un  $h_c$  plus faible que le séchage en plein soleil. De plus, le  $h_c$  a été évalué pour le séchage de la jaggery dans un séchoir à serre de type toit en arc [31]. Au début du processus de séchage, la valeur de  $h_c$  était plus élevée et diminuait avec le temps. Farhat et al. ont proposé un séchoir à serre en polyéthylène utilisant la convection naturelle pour sécher le poivre [32], aboutissant à une réduction de plus de 83% de la masse du poivre à la fin du processus de séchage.



Figure II. 5 Configuration expérimentale pour le séchage en plein soleil et le séchage en serre en mode passif [15].

deux fois plus efficace que le séchage naturel, dans des conditions sans charge et de charge. [33]

L'étude menée par **Kumar et Tiwari** visait à évaluer l'effet de la forme et de la taille de la jaggery sur le coefficient de transfert de masse convectif dans un séchoir à serre. Ils ont réalisé une expérience avec différentes dimensions et masses de jaggery. Les résultats ont montré que le coefficient de transfert de masse convectif était plus élevé en mode de convection naturelle pour les jaggery de dimensions spécifiques par rapport au mode de convection forcée du séchoir. [34]

**Kumar et Tiwari** ont développé un modèle thermique pour un séchoir à serre en forme de toit en arc destiné au séchage de la jaggery, tandis que Sacilik et al. ont proposé un modèle mathématique pour un séchoir solaire à serre tunnel pour le séchage des tomates [35]. Les deux modèles ont été validés par des résultats expérimentaux. Le modèle de Kumar et Tiwari a permis de prédire la température de la jaggery et de l'air de la serre, ainsi que la perte de masse de la jaggery pendant le séchage. Le modèle de Sacilik et al. a démontré que le séchoir solaire à serre tunnel permettait un séchage plus rapide et de meilleure qualité des tomates par rapport au séchage naturel. [36]

Une étude analyse l'utilisation d'une serre en mode passif pour le séchage du poisson, en effectuant des analyses énergétiques et exégétiques [37]. Les prévisions de température de surface du poisson, de température ambiante de la serre et d'humidité évaporée sont en accord avec les valeurs expérimentales.

Une autre étude se concentre sur le séchage des grains d'*Amaranthus cruentus* dans un séchoir solaire en forme de tente en mode passif [38]. Le séchage dure 7 heures, avec une teneur en humidité finale de 7% (base sèche). Les grains séchés sous la tente présentent une meilleure qualité que ceux séchés en plein soleil, avec des variations de température de 31,2 à 54,7 °C et d'humidité relative de 22% à 34%.

**Prakash et Kumar** ont développé un modèle ANFIS pour un séchoir à serre actif utilisé pour le séchage de la jaggery [39]. Le modèle a été utilisé pour prédire la température de la jaggery, la température ambiante de la serre et la masse de la jaggery pendant le séchage. Les prédictions du modèle ont été validées par des résultats expérimentaux, montrant une corrélation satisfaisante entre les données prédites et les mesures réelles.

**II.4.2 Séchoir de serre en mode Active :**

Condori et Saravia ont comparé deux types de séchoirs de serre à convection forcée : une chambre simple et une chambre double [40] . Ils ont proposé deux nouveaux concepts : la courbe de séchage généralisée et la courbe de performance du séchoir. Les résultats des simulations ont montré que l'amélioration de l'utilisation des potentiels de séchage entraîne une augmentation de la productivité du séchoir. Les expérimentations sur le séchage des poivrons ont révélé que le séchoir à chambre double est 87% plus productif que le séchoir à chambre simple pour une même surface.

Un séchoir de serre à faible coût utilisant la convection forcée a été développé pour sécher des poivrons et de l'ail. Les résultats expérimentaux ont montré une bonne performance de séchage avec un taux de séchage satisfaisant et une qualité finale acceptable pour les produits séchés [41] .

Condori et Saravia ont étudié un séchoir de serre en forme de tunnel et évalué ses performances de séchage. Ils ont observé une relation linéaire entre le rayonnement solaire incident et la température de sortie. Le séchoir a été testé avec du chou et des pois dans trois modes de séchage différents. Les résultats ont montré que le séchoir en mode de convection forcée avait un coefficient de transfert de masse convectif plus élevé que le mode de convection naturelle [42] .

Tiwari et al. ont évalué les coefficients de transfert de masse convectifs pour le séchage du jaggery dans un séchoir de serre en forme de tunnel. Les résultats ont montré une vitesse de séchage plus rapide et un coefficient de transfert de masse convectif plus élevé en mode de convection forcée par rapport au mode de convection naturelle. [31]



**Figure II. 6 Dispositif expérimental de séchage sous serre en mode actif [31].**

La modélisation thermique d'un séchoir de serre en forme de tunnel à convection forcée a prédit avec précision la température et la masse du jaggery pendant le séchage. Une étude a également révélé que les petits morceaux de jaggery avaient un meilleur coefficient de transfert de masse convectif en mode de convection forcée. [43]



**Figure II. 7 Montage expérimental de séchage sous serre sous convection forcée pour le séchage du jaggery [34].**

Un séchoir solaire à tunnel avec convection mixte a été conçu par Hossain et Bala pour le séchage de piments. L'ajout d'un module photovoltaïque a amélioré le processus de séchage [34]. L'effet de différentes masses d'oignons sur le coefficient de transfert de masse convectif lors du séchage naturel et en serre a été étudié. Les résultats ont montré un

taux de séchage plus élevé en serre et une augmentation du coefficient de transfert de masse avec une plus grande masse d'oignon [34].

Le séchage du poivre rouge dans des conditions de séchage naturel et en serre en conditions de laboratoire constantes a été réalisé [45].

Une expérience a été réalisée avec une soufflerie et une lampe de 1000 W pour évaluer l'effet de différents paramètres de séchage. Nayak et Tiwari ont effectué une analyse énergétique et exégétiques d'un séchoir de serre intégré photovoltaïque/thermique pour améliorer ses performances [45]. Elle a été validée par les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions de ciel dégagé. Un grand séchoir de serre hybride PV/T de taille moyenne, en mode actif, a été utilisé pour sécher du raisin dans la zone climatique de New Delhi [47]. Le séchoir de serre utilisait un ventilateur alimenté par un panneau photovoltaïque pour évacuer l'air humide. La qualité et la couleur du produit séché à l'intérieur du séchoir étaient supérieures au séchage naturel, malgré un coefficient de transfert de masse convectif plus bas.

Un séchoir de serre en mode actif a permis de sécher rapidement les longanes épluchés et les bananes. Les longanes ont mis seulement 3 jours à sécher dans le séchoir de serre, tandis que les bananes ont été séchées en 4 jours. Le séchage en serre a donné un produit de meilleure qualité et de couleur supérieure par rapport au séchage naturel [49].

Le séchage en mode actif dans une serre a été analysé sur le plan énergétique et exégétiques. Le séchage actif était plus rapide que le séchage passif grâce à l'élimination continue de l'air humide. Des raisins non traités chimiquement ont été séchés dans un séchoir de type tunnel cylindrique en mode actif, avec un temps de séchage de sept jours et une température variant de 10 à 28°C. La qualité du produit séché était supérieure au séchage naturel. [37]

Un séchoir de serre actif de grande taille en forme de parabole, avec une capacité de 1000 kg et un sol en béton noir, a été développé à Champasak (15,13°N, 105,79° E) en République démocratique populaire lao (RDP lao) [50]. Le séchoir est équipé de neuf ventilateurs d'extraction alimentés par des modules solaires. Les bananes ont été séchées en cinq jours dans le séchoir, contre sept jours en plein soleil. Les piments ont été séchés en trois jours dans le séchoir, contre cinq jours en plein soleil.

**II.5 Conclusion :**

Les séchoirs de serre en mode de convection naturelle et forcée sont utilisés dans le monde entier pour le séchage des cultures. La convection forcée convient aux cultures à forte teneur en humidité, tandis que la convection naturelle est adaptée aux cultures à faible teneur en humidité. Les cultures séchées dans les séchoirs de serre sont de meilleure qualité et ont une meilleure couleur que celles séchées en plein soleil. Les séchoirs de serre solaires intégrant des panneaux photovoltaïques sont particulièrement utiles dans les pays d'Asie du Sud-Est pour la production commerciale de cultures séchées.

*Chapitre III*

*Conception et réalisation  
d'un séchoir solaire*

*Chapitre IV*  
*Résultat et discussion*

## *Conclusion général*

### Conclusion générale :

L'amélioration des performances du séchoir solaire dans une région désertique comme la nôtre représente un défi majeur pour renforcer la durabilité agricole et la conservation de l'énergie. Après avoir mené cette recherche, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

1- La conception du nouveau séchoir a démontré une efficacité élevée grâce à l'utilisation de matériau isolant tel que des panneaux sandwich et des angles en fer, empêchant ainsi la fuite de chaleur vers l'extérieur.

2- Il a été constaté que rendre une plus grande surface du séchoir inclinée à un angle de 32 degrés augmentait son efficacité.

3- Le coût abordable du séchoir en fait une alternative viable aux séchoirs disponibles sur le marché qui fonctionnent à l'électricité.

4- La facilité de fabrication et l'utilisation de ce séchoir encourage la sensibilisation des agriculteurs.

5- La température maximale à l'intérieur du séchoir a atteint 80 degrés Celsius.

6- La température maximale enregistrée à la surface de la chambre (élément absorbant) était de 104,9 degrés Celsius.

7- La température maximale enregistrée dans le milieu extérieur pendant les mesures était de 32 degrés Celsius.

8- L'inexactitude des capteurs thermiques a donné des résultats fluctuants.

9- Le temps nécessaire pour sécher le persil était de 12h00 à 15h00.

Cette recherche a démontré que l'amélioration des performances du séchoir solaire dans une région désertique comme EL-OUED peut être une solution efficace pour renforcer la durabilité agricole et économiser l'énergie. Les résultats suggèrent d'appliquer la conception améliorée et d'améliorer la précision des capteurs thermiques pour obtenir des résultats stables et précis. De plus, cette recherche peut contribuer à accroître la sensibilisation aux avantages du séchoir solaire parmi les agriculteurs des régions désertiques.

## *Reference bibliographique*

## Référence bibliographique :

- [1] 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
- [2] H. Rakotondra miarana, D. Morau, L. Adelard and J.-C. Gatina, Modélisation du séchage solaire : application au séchage en couche mince des boues solides des stations d'épuration, 12ème journées internationales de thermique JITH, vol. pp.2005.
- [3] H. Amadou, Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines, Strasbourg 1, 2007.
- [4] Souheyla Khaldi; Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie; thèse de doctorat Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018.
- [5] Bahadj Ahmed, Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. Mémoire de master, Kasdi Merbah- Ouargla (2014).
- [6] H. Ben cheikch, M. Ould Sidi med 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).
- [7]. Mujumdar, A.S. and A.S. Menon, Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. Handbook of industrial drying, 1995. 1: p. 1-39.
- [8]. Mujumdar, A.S., Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec., 2000.
- [9]. Bennamoun, L., Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(7): p. 3371-3379.
- [10] : Aboltins, Aivars, et al. "Investigations of air solar collector efficiency." Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development. Vol. 1. 2009.
- [11] : Aravindh, M. A "Solar drying—a sustainable way of food processing." Energy sustainability through green energy. Springer. New Delhi. . (2015).
- [12] : Mounir. B. Etudes expérimentales du séchage solaire par convection naturelle (2019)
- [13] : Aymen. R. Étude d'un Séchoir solaire à convection forcée pour le séchage de la pomme de terre à Biskra (2018)

- [14] :Rahmanta MA, Felani MI. Application of Rotary Drum Dryer at Ombilin Coal Fired Power Plant. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 3, No. 3, August 2015
- [15] : N.Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [16] Bolaji BO. Development and performance evaluation of box-type absorber solar air collector for crop drying. *Journal of Food Technology* 2005.
- [17] Toshniwal, U. and S. Karale, A review paper on solar dryer. *International Journal of Engineering and Research and Applications*, 2013.3(2).
- [18] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. Kalenga Saka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", *Renewable Energy*, 27 (27 - 37 )(2001).13
- [19] Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A.Jamali, "Thin layer convectivesolar drying an mathematical modeling of prickly pear peel ", *Energy* 29 (211 - 244) -(2004).14
- [20] B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Daschowdury and S. Janjai "Solardrying of pineapple using solar tunnel drier", *Renewable Energy* 28(183-90) (2003).18
- [21] I. N. Simatc "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solardryers ", *Renewable Energy*, 28 (435 - 453) - (2003).19
- [22] 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
- [23] Tiwari GN. *Greenhouse technology for controlled environment*. New Delhi: Narosa Publishing house; 2003.
- [24] Gupta R, Tiwari GN, Kumar A, Gupta Y. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. *Energy and Buildings* 2012;47:27–34.
- [25] Jain D. Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of Food Engineering* 2005; 71:170–8.
- [26] « Etude théorique d'une serre a section triangulaire isolée à faible cout pour le séchage des produits agricole »Malik. EL'HOUYOUN.AHAMADI université d'Antananarivo (2010)
- [27] « Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaine »H.AMADOU école doctorale MSII université louis pasteur Strasbourg I,France (2007)
- [28] « le séchage solaire des boues, état actuel de l'art et retours d'expérience » Brisson, J.M.Perret et J.P.Canler document technique département écotechnologies Lyon France (2005)

- [29] Kumar A, Tiwari GN, Kumar S, Pandey M. Role of greenhouse technology in agricultural engineering. *International Journal of Agricultural Research* 2006;1 (4):364–72.
- [30] Jain D, Tiwari GN. Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management* 2004;45:765–83.
- [31] Tiwari GN, Kumar S, Prakash O. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering* 2004; 63:219–27.
- [32] Farhat A, Kooli S, Kerkeni C, Maalej M, Fadhel A, Belghith A. Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse. *International Journal of Thermal Sciences* 2004;43:53–8.
- [33] Koyuncu T. An Investigation on the performance Improvement of greenhouse type agricultural dryers. *Renewable Energy* 2006;31:1055–71.
- [34] Kumar A, Tiwari GN. Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery. *Journal of Food Engineering* 2006;73:121–34.
- [35] Kumar A, Tiwari GN. Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *Solar Energy* 2006; 80:1135–44.
- [36] Sacilik K, Keskin R, Elicin AK. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering* 2006;73:231–8.
- [37] Tiwari GN, Das T, Chen CR, Barnwal P. Energy and exergy analyses of greenhouse fish drying. *International Journal of Exergy* 2009;6(5).
- [38] Ronoh EK, Kanali CL, Mailutha JT, Shitanda D. Thin layer drying kinetics of Amaranth (*Amaranthus cruentus*) grains in natural convection solar tent dryer. *African Journal of Food agriculture nutrition and development* 2010;10(3).
- [39] Prakash O, Kumar A. ANFIS modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *International Journal of Sustainable Energy*, <http://dx.doi.org/10.1080/14786451.2012.724070>, in press.
- [40] Condori M, Saravia L. The performance of forced convection greenhouse driers. *Renewable Energy* 1998;13(4):453–69.
- [41] Condori M, Echazu R, Saravia L. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renewable Energy* 2001;22:447–60.
- [42] Condori M, Saravia L. Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse drier. *Renewable Energy* 2003;28:467–85.
- [43] Kumar A, Tiwari GN. Thermal modeling and parametric study of a forced convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *International Journal of Agricultural Research* 2006;1(3):265–79

- [44] Kumar A, Tiwari GN. Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering* 2007;79:1337–50.
- [45] Kooli S, Fadhel A, Farhat A, Belghith A. Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions mathematical modeling and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 2007;79:1094–103.
- [46] Nayak S, Tiwari GN. Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse. *Energy and Buildings* 2008;40:2015–21.
- [47] Barnwal P, Tiwari GN. Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/ T) greenhouse dryer: an experimental study. *Solar Energy* 2008;82:1131–44.
- [48] Janjai S, Lamlert N, Intawee P, Mahayothee B, Bala BK, Nagle M, et al. experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy* 2009;83:1550–65.
- [49] Rathore NS, Panwar NL. Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. *Applied Energy* 2010;87:2764–7.
- [50] Janjai S, Intawee P, Kaewkiewa J, Sritus C, Khamvongsa V. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy* 2011;36:1053–62.