

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE 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

Thème

**Contribution à l'amélioration
d'un séchoir conçu localement (prototype)**

Encadré par :

Mr : Laouini Abdeljalil

Présenté par :

- Lammari Adel
- Boudissa Hamza
- Lammari Hamza

Année Universitaire: 2019/2020

Remerciements

Mes remerciements vont premièrement au Dieu Le tout Puissant pour la volonté, la santé, et la patience, Qu'il nous a donnée tout au long de nos années d'étude.

*Nous tenons exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur **Mr : Laouini Abdeljalil** pour ses judicieux conseils, sa patience, sa persévérance toute la période de notre projet.*

Nos remerciements les plus vifs vont aussi à nos enseignants du département de génie mécanique, faculté de la technologie, université Hama Lakhder d'El Oued.

Nous remercions tous nos collègues et mes amis pour leurs assistance et soutiens, et tout ceux qui ont contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*A nos mères et nos pères qui nous ont soutenus
et encourager durant ces années d'étude Qu'ils
trouvent ici le témoignage de nos profondes
reconnaissances*

*A nos frères et ceux qui ont partagé avec nous tout
les moments d'émotion lors de la réalisation de ce
travail, ils nous ont chaleureusement supportés et
encouragés tout au long de notre parcours*

*A notre famille, nos proches et à ceux qui nous
donnent de l'amour et de la vivacité*

*A tous nos amis qui nous ont toujours encouragés
et à qui nous souhaitons plus de succès*

Merci

Liste des Figures

Figure	Titre	p
Fig I.1	Schéma de principe d'un séchoir	02
Fig I.2	Courbe de séchage $n_s = f(t)$	06
Fig I.3	Courbe de séchage $(dn_s/dt) = g(t)$	06
Fig I.4	Courbe de séchage	06
Fig I.5	Différents systèmes du séchage solaire	14
Fig I.6	Le séchoir solaire direct	16
Fig I.7	schéma descriptive d'un séchoir indirect	17
Fig I.8	Séchoir solaire indirect	18
Fig I.9	Schéma descriptive d'un séchoir mixte	19
Fig II.1	Séchoir de type armoire	24
Fig II.2	Séchoir solaire (toutes les dimensions en cm)	25
Fig II.3	Séchoir d'armoire à énergie solaire à circulation naturelle avec cheminée	26
Fig II.4	Séchoir à énergie solaire sur toit en verre à circulation naturelle	27
Fig II.5	La configuration expérimentale d'un séchoir à armoire d'énergie solaire à circulation Naturelle modifiée	27
Fig II.6	Chauffe-eau solaire,	28
Fig II.7	a) séchoir à lit fixe avec capteur solaire, chambre plénière, chambre de séchage et cheminée du sécheur et (b) vue générale du séchoir	29
Fig II.8	Vue isométrique d'une serre avec un séchoir à cultures montrant divers composants et paramètres d'optimisation	30
Fig II.9	Vue isométrique de l'armoire solaire avec porte ouverte	30
Fig II.10	Une illustration du séchoir radio-convectif	31
Fig II.11	Une illustration du séchoir chaudière	31
Fig I.12	(A) vue transversale du sécheur solaire à convection naturelle de type indirect, des positions de thermocouple, (b) diagramme de flux	32
Fig II.13	Détails sectoriels schématiques d'un séchoir solaire à convection naturelle	33
Fig II.14	Photographie de l'ensemble de collecteur du système de chauffage de l'air (A) avec le sous-système de stockage d'énergie et de chauffage de l'air et l'espace de chauffage (B)	35
Fig II.15	Schéma de fonctionnement du séchoir à effet tunnel. Vue fragmentée	35
Fig II.16	Schéma de principe d'une armoire de séchage d'un système de séchage de poudre à crème pâtissière	37
Fig II.17	Collecteur d'air solaire avec séchoir à armoire	37
Fig II.18	Système de séchage	37
Fig.II.19	(a) photographie du séchoir solaire de ferme portable PAU	38
Fig II.20	(a) Vue de face du séchoir à effet tunnel. (b) Vue de l'usine du séchoir à effet tunnel. (c) Séchoir à convection forcée à effet de serre du tunnel	38
Fig II.21	Le système de séchage complet	38
Fig II.22	. Le diagramme schématique d'un déshumidificateur déshydratant / collecteur intégré monté sur le bac de récolte	39
Fig II.23	Une illustration d'un séchoir à grain solaire incorporant un ventilateur DC alimenté par photovoltaïque	39
Fig II.24	Sécheur solaire à tunnel	39
Fig II.25	Jaggery séchant dans une serre sous (a) mode de convection naturelle, (b) mode de convection forcée Réimprimé à partir du Journal of Food Engineering	41
Fig II.26	Une illustration d'un séchoir à cultures en serre Juin2005.	42

Liste des Figures

Fig II.27	La vue schématique du sécheur solaire intégré à dessiccateur, 2006	42
Fig II.28	Une illustration d'une photographie d'un séchoir solaire domestique avec porte ouverte, 2006.	43
Fig II.29	Principe de fonctionnement du séchage par jiggery en serre en mode convection naturelle, 2006	44
Fig II.30	Le schéma de principe du sécheur tunnel solaire. , 2006	45
Fig II.31	Un diagramme schématique d'un séchoir solaire en coupe, 2006	45
Fig II.32	Vue en coupe du séchoir solaire, 2006	45
Fig II.33	Une illustration de la vue en coupe du sécheur solaire à travers le brûleur, le collecteur, la chambre de séchage et la cheminée solaire, 2007.	46
Fig II.34	Une illustration d'un sécheur de biomasse solaire, 2006	46
Fig. II.35	Le schéma de principe du sécheur solaire en mode mixte. (Les dimensions sont en cm.), 2009	48
Fig. II.36	Élévation de la serre expérimentale (pas à l'échelle ; toutes les dimensions en m), 2009.	50
Fig.II.37	(a) d'un diagramme schématique d'un séchoir à tente solaire à convection naturelle et (b) d'un diagramme montrant la disposition des plateaux de séchage en deux couches .2010.	50
Fig.II.38	Une illustration du séchoir tunnel solaire à convection naturelle, 2010	51
Fig. II.39	Nouveau système de séchage de type mixte actif semi-continu (six aérothermes solaires, canal de chauffage, conduits d'air, ventilateur et sécheur, 2007	51
Fig. II.40	Séchoir solaire, Sarasvatî.	53
Fig. II.41	expérimentale de laboratoire, 2007	53
Fig. II.42	Sécheur solaire à tunnel	54
Fig. II.43	Vue picturale du dispositif expérimental, 2007	54
Fig. II.44	Vue picturale du séchoir solaire à effet de serre	55
Fig. II.45	Séchoir à effet de serre intégré photovoltaïque-thermique (PV / T) hybride.	56
Fig. II.46	Photographie du séchoir solaire, 2008	59
Fig. II.47	Photographie d'un séchoir solaire de laboratoire, 2008	57
Fig. II.48	Système de séchage solaire, 2008	57
Fig. II.49	Une illustration du système de séchage solaire intégré au toit, 2008.	58
Fig. II.50	Système de séchage solaire pour le séchage du coprah, 2008	58
Fig. II.51	Configuration expérimentale du sécheur solaire en mode mixte, 2009	60
Fig. III.1	Variation de la teneur en eau en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	63
Fig. III.2	Variation des températures (ambiante, entre, milieu et sortie de la chambre) en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	64
Fi. III.3	Variation de la radiation solaire et température de récepteur en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	65
Fig. III.4	Variation de l'humidité de produit en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	66

- **ATESTA** : Atelier Énergie Solaire et Technique Appliquée
- **CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

- **GERES** : Groupe Énergie Renouvelables, Environnement Et Solidarités

- **M_i** : Teneur en eau initiale dans le produit
- **M_f** : Teneur en eau finale dans le produit
- **m_s** : Masse sèche du produit.
- **M_w** : Wet masse = masse humide du produit
- **ONERSOL** : Office de l'Énergie Solaire.
- **td** : Drying time =durée du séchage t1
Temps avant séchage (état 1)

Table de matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Table des matières	
Introduction générale	02
Chapitre I : Le séchoir solaire	
1. Le séchage	
1.1. Définition	04
1.2. Historique du séchage	04
1.3. L'importance du séchage	04
1.4. Le principe du séchage	05
2. Terminologie du séchage.	
2.1. Humidité	06
2.2. Taux d'humidité	06
2.3. États de siccité	06
2.4 .Taux d'humidité à l'équilibre	06
2.5 .Corps hygroscopique	06
2.6. Les différentes modes de laissions de l'eau	07
2.7. Énergie de liaison-chaleur de vaporisation	07
2.8. Transferts de chaleur	08
2.9. Transferts de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humidité	08
3. Les périodes de courbe de séchage	08
3.1 Phase à vitesse de séchage constante	10
3.2 Phase à vitesse de séchage décroissante	11
4. Le concept de la courbe caractéristiques se séchage	11
5. Le mécanisme de séchage	
5.3. Séchage par rayonnement	14
5.2. Séchage par conduction	15
5.1. Séchage par conviction	16
6. Les séchoirs solaires.	
6.1. Classification des systèmes de séchage solaire	17
7. Les différents types de séchoirs.	
7.1. Les séchoirs actifs	18
7.2. Les séchoirs passifs (séchoirs serres)	18
7.3. Les séchoirs directs	18
7.3.1. Principes de fonctionnement d'un séchoir direct	19
7.4. Séchoirs solaires indirects	20
7.4.1. Principe de fonctionnement d'un séchoir indirect	21
7.5. Les séchoirs mixtes	22
7.6. Les séchoirs hybrides	22
Chapitre II : les séchoirs solaires améliorés	
1. Systèmes de séchage solaire passif.	

2. Séchoirs solaires améliorés	24
2. Systèmes de séchage solaire actif	35
3. Tendances récentes du système de séchage solaire	
3.1. Système de séchage solaire passif	41
3.2. Système de séchage solaire actif	50
Chapitre III : Résultats et Discussion	
Introduction	
1. Variation de la teneur en eau en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	63
2. Variation des températures (ambiante, entre, milieu et sortie de la chambre) en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	64
3. Variation de la radiation solaire et température de récepteur en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	65
4. Variation de l'humidité de produit en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe	66
Conclusion	66
Conclusion générale	68
Résumé	
Bibliographie	

Introduction

Générale

L'énergie solaire est une source énergétique alternative particulièrement dans les pays en voie de développement, souvent employée pour produire l'électricité ou la chaleur. L'Algérie dispose d'un ensoleillement important particulièrement en été. Cette énergie est exploitée à l'aide du capteur solaire plan dans beaucoup d'applications qui nécessitent des températures basses et modérées, tel que le chauffage et le séchage des récoltes.

Le développement scientifique et technologique a permis de diversifier et de mettre en œuvre plusieurs types de séchoir solaire à savoir : type direct, type indirect et type mixte. En effet, notre intérêt est porté à l'étude de l'amélioration des performances d'un séchoir indirect pour le séchage des produits agroalimentaires, et plus particulièrement au niveau du capteur solaire. L'objectif de notre travail de projet de fin d'étude est donc consiste à la contribution à l'amélioration d'un séchoir conçu localement.

En effet, ce présent mémoire, vise à proposer à la contribution d'améliorer un séchoir conçu localement « prototype ». L'idée consiste à mettre un épaulement à différente hauteur au niveau de la veine d'air placé au milieu des la conduite. Deux emplacements, « sur l'isolant » où « sur l'absorbeur », de cet épaulement ont été également analysé afin d'examiner leurs influences sur les paramètres étudiés.

Une étude comparative est donc déclenchée entre un modèle du capteur solaire simple avec d'autres modèles comportant des épaulements à différents emplacements et hauteurs. Les résultats dynamiques et thermiques ont été analysés et présentés sur toute la géométrie considérée et sur des sections bien choisies et pour différents débit volumique.

C'est dans ce contexte qu'on a mené notre étude, qui s'étale sur les chapitres faisant suite à cette introduction :

Le **premier chapitre**, comprend une généralité sur le séchoir solaire conçu localement (prototype) ainsi qu'une présentation générale sur le séchage solaire avec ces différents types.

Le **second chapitre**, présente une étude sur l'art du séchoir solaire conçu localement où nous avons parlé des séchoirs avant et après l'amélioration.

Le **troisième chapitre**, est consacré aux résultats de l'amélioration du séchoir solaire conçu localement. (Présente différentes matériaux et méthodes qui se manifestent dans ce type de séchoir solaire).

Finalement, on a achevé ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I:

Le Séchoir solaire

1. Le Séchage:

1.1.Définition :

Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation tout ou partie d'un solvant (l'eau) contenu à l'intérieur d'un produit humide (solide ou liquide).

Le produit final obtenu étant toujours un solide. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant. [1]

En pratique, de nombreux produits alimentaires et biologiques subissent des opérations de séchage lors de leur transformation et/ou de leur conservation.

Le séchage est un procédé qui sépare un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Cette opération est endothermique et nécessite donc l'apport d'énergie. [2]

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide.

Le séchage est aussi défini comme une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes. [3]

1.2. Historique du séchage :

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, 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'était qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas.

1.3 L'importance du séchage :

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures, bactéries) responsables du pourrissement.

C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet d'améliorer la conservation des produits, de faciliter leur transport, de réduire les risques de pertes de

produits après récolte et surtout d'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année. [4]

1.4 Le principe de séchage :

Le séchage implique deux types de transferts : le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert. [5]

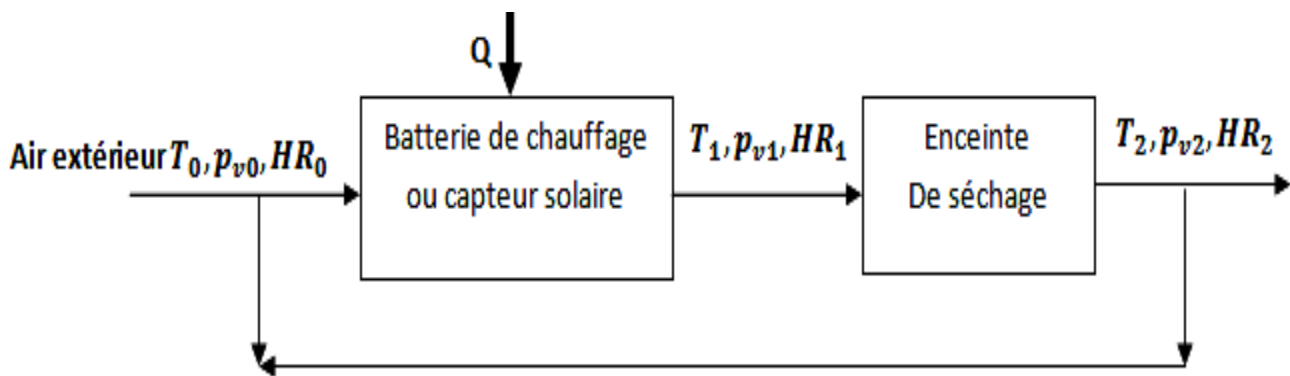


Fig.01 : Schéma de principe d'un séchoir [6]

2. Terminologie de séchage :

2.1. Humidité :

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

2.2. 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.

2.3. États de siccité :

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

2.4. 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.

2.5. Corps hygroscopique :

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [7], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit (P_{vp}) est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière. Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau (a_w) est basse.

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide a_w par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (1)$$

Pour qu'il y ait séchage, quels que soient le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative (Φ) de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau ($\Phi < a_w$) de façon à ce que $P_{vp} > P_v$ (pression de vapeur de l'air dans l'enceinte). [8]

2.6. Les différents modes de liaison de l'eau :

La liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin. Dans ces deux cas, le corps est dit **hydraté**.

Enlever cette eau d'hydratation revient à détruire le corps.

L'opération de séchage consiste à enlever toute l'eau du corps (l'humidité) autre que son eau d'hydratation. [8]

2.7. Énergie de liaison-chaleur de vaporisation :

La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre ne dépend que de la température régnant à la surface du produit soumis au séchage. Cette chaleur n'est autre que la chaleur de vaporisation de l'eau, donnée par la formule :

$$L_v = 597 - 0,56 \theta \quad (2)$$

Où : L_v est exprimée en Kcal/Kg et θ en degrés Celsius.

Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, en - dessous d'un certain seuil d'hydratation (correspondant à la limite entre eau "libre" et eau osmotique), les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie de liaison, qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique absorbée, combinée chimiquement. pour évaporer cette eau, lors du séchage, il faut fournir un supplément d'énergie thermique. Dans ces conditions, la chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit peut s'écrire :

$$L = L_a + L_v \quad (3)$$

Pour le séchage la chaleur de liaison de l'eau (L_a) est négligée car la dessiccation s'arrête à un certain seuil dit d'équilibre, et la chaleur de vaporisation est celle de l'eau dite "libre".

2.8. Transferts de chaleur :

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction - rayonnement : Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [7]

2.9. Transfert de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humide :

Dans le paragraphe qui suit, il ne sera fait mention que de l'eau, qui est un des liquides le plus couramment évaporés. Les mécanismes qui vont être décrits s'appliquent cependant aux autres solvants (séchage des peintures, par exemple).

3. Les périodes de courbe de séchage :

La courbe de séchage par entraînement d'un produit granulaire peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température sont contrôlés et maintenus constants. Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu.

En portant le taux d'humidité du produit n_s (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps t , on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure 2. [7].

On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation.

En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $n_s = f(t)$ – donc la vitesse de séchage ($- \frac{dn_s}{dt}$) en fonction du temps, on peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure est donnée sur la figure 3 [1].

Krischer a proposé un autre mode de représentation : la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du taux d'humidité n_s conduit à la courbe représentée sur la figure 4 [7].

Ces 02 types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs Phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables.

Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- la phase à vitesse de séchage constante (BC).
 - la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).
- "C" est le point critique du séchage.

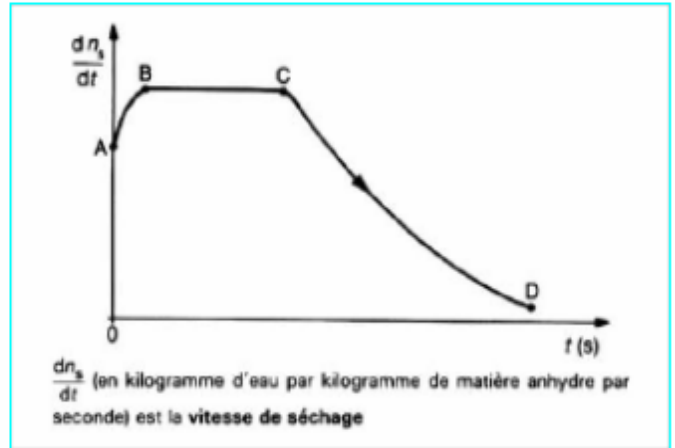
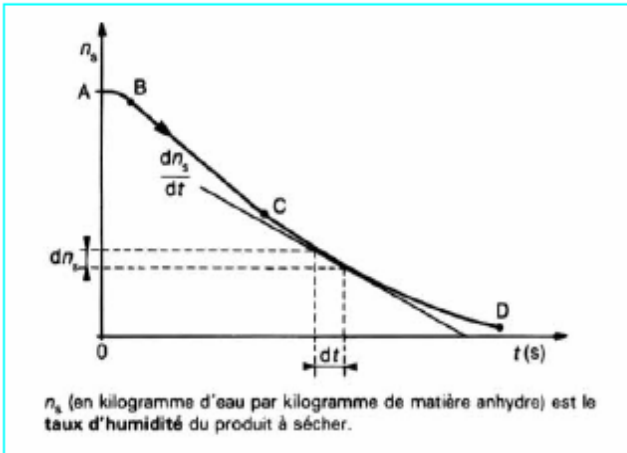


Fig 2 : Courbe de séchage $n_s = f(t)$ [1]
[1]

Fig 3 : Courbe de séchage $(dn_s/dt) = g(t)$

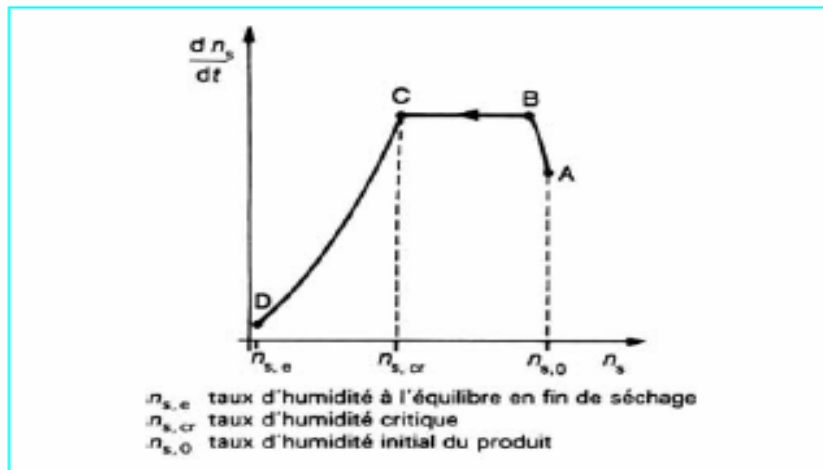


Fig 4 : Courbe de séchage [1]

3.1. Phase à vitesse de séchage constante [8] :

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite de gaz où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, du sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide.

Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. La température du solide reste constante et égale à la température dite humide du fluide de séchage. La nature du solide n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage (en kg d'eau / s) qui, pendant cette phase, est égale à :

$$\frac{dw}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_g A (P_s - P_w) \quad (7)$$

Avec :

- **M (kg)** : masse du produit à sécher.
- **A (m²)** : surface à travers laquelle s'opère le transfert d'humidité.
- **P_s (Pa)** : pression de vapeur d'eau à la température T à la surface du solide pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturante à la température du solide ou température humide.
- **P_w (Pa)** : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air.
- **KG (s/m)** : coefficient global de transfert de matière.

La phase à vitesse de séchage constante n'est pas toujours identifiable, même pour des produits dont l'humidité initiale est très importante (produits végétaux, produits carnés). L'explication réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits.

De plus, les équations précédemment indiquées tiennent compte d'une surface d'échange A constante. Cela n'est pas toujours réalisé.

De nombreux produits ont tendance à se rétracter au cours du séchage (gels, produits biologiques, papier).

3.2. Phase à vitesse de séchage décroissante

Cette phase succède à la phase à vitesse constante quand cette dernière existe. Le taux d'humidité à partir duquel la vitesse de séchage se met à décroître est le taux d'humidité critique n_s , ce qui n'est pas toujours identifiable et, quand il peut être observé, dépend des conditions de séchage.

On admet que, pendant cette période du séchage, le transfert de l'eau au sein du produit n'est plus assez rapide pour saturer la pellicule de gaz entourant celui-ci. Il se crée dans les produits poreux un front de vaporisation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin de plus en plus important à parcourir, sa pression à la surface du produit diminue. La différence entre cette pression et la pression de vapeur d'eau dans le milieu ambiant, c'est-à-dire le potentiel d'échange, va donc décroître avec, comme conséquence, la diminution de la vitesse de séchage.

Dans les produits non poreux, la diffusion de l'eau au sein du produit est aussi à l'origine de la diminution de la vitesse de séchage.

De même, la diminution de la diffusivité de l'eau au fur et à mesure que le produit sèche, ainsi que le croûtage éventuel du produit, peuvent aussi expliquer la diminution de la vitesse de séchage. Parallèlement, durant cette phase, les conditions régnant à l'extérieur du produit perdent leur influence. [9]

4. Le concept de la courbe caractéristique de séchage :

Le concept de la courbe caractéristique de séchage, noté C.C.S., est mis au point par Van Meel, en 1957.

L'objectif consiste à modéliser la vitesse de séchage: il s'agit en quelque sorte d'examiner si, en dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (c'est-à-dire dans les pores du milieu), il est possible d'obtenir au niveau macroscopique une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux et un même modèle de comportement du produit étudié, quelles que soient les conditions de l'expérience. [10]

La démarche consiste à normaliser les teneurs en eau moyennes et les vitesses de séchage pour obtenir une courbe unique pour un produit donné, de dimensions déterminées et indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse, température, et hygrométrie de l'air de séchage). [11]

Cette notion de courbe caractéristique de séchage a été reprise notamment par **J.**

Chapitre I : Le séchoir solaire.

Van Brakel, en 1980.

L'application du concept de la courbe caractéristique de séchage impose d'utiliser certaines corrélations de la forme :

La teneur en eau normée ou réduite X^* exprimée par :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$$

Avec :

X : la teneur en eau moyenne du produit (kg eau/kg ms).

X_{eq} : la teneur en eau d'équilibre thermodynamique déterminée par les isothermes de sorption

X_{cr} : la teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).

La teneur en eau à l'équilibre correspond à la valeur limite obtenue au bout d'un temps infini pour un produit soumis à des conditions données de température et d'hygrométrie.

$$\left(\frac{dX}{dt} \right)_0 = r(X^*)$$

La vitesse de séchage initiale est calculée théoriquement à partir de l'équation :

$$\left(\frac{dX}{dt} \right)_0 = \frac{h_0 S_0 \Delta T}{m_s L_v(T_h)}$$

avec :

h_0 : le coefficient de transfert de chaleur air-produit,

S_0 : la surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant initiale,

$\Delta T = (T_s - T_h)$: l'écart psychrométrique défini par les conditions de l'air de séchage,

m_s : la masse anhydre de l'échantillon de produit,

dt

$L_v(T_h)$: la chaleur latente de vaporisation du produit à la température humide de l'air de séchage.

Dans un domaine raisonnable de conditions expérimentales (température, vitesse, humidité

du fluide séchant, nature et épaisseur du produit à sécher), l'expression mathématique arbitrairement imposé à la fonction est :

$$f(X^*) = X^{*n}$$

$$\text{où } f(X^*) = aX^{*n} + bX^{*n+1} + \dots + cX^*$$

Elle est sensiblement unique et doit vérifier les propriétés suivantes [12] :

$$\begin{cases} X^* = 0 \Rightarrow f(X^*) = 0 \\ 0 < X^* < 1 \Rightarrow 0 < f(X^*) < 1 \\ X^* \geq 1 \Rightarrow f(X^*) = 1 \end{cases}$$

Ainsi, la détermination de la courbe caractéristique de séchage revient à tracer la fonction $f(X^*)$ Pour les différentes cinétiques expérimentales de séchage. Ce trace exige la connaissance des paramètres tels que :

$$X_{\text{eq}}'', X_{\text{cr}}'' \text{ et } \left(-\frac{dX}{dt} \right)_0''.$$

Notons que cette méthode est une approche semi-empirique fondée sur une analyse simplifiée du procédé. Elle n'interprète pas les différents mécanismes par des équations phénoménologiques, mais s'appuie sur les résultats expérimentaux en les présentant sous une forme facilement exploitable.

Fornell et al., 1980 ont proposé une autre corrélation, basée également sur le concept de la C.C.S. La démarche consiste à nommer la vitesse de séchage (dX/dt) en la divisant par le terme : $(T_s - T_h) \cdot (V_a)^{0.5}$ ou T_s et T_h sont respectivement les températures sèches et humides de l'air de séchage et V_a sa vitesse. La C.C.S est alors obtenue en traçant la courbe :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{(T_s - T_h) \cdot (V_a)^{0.5}} = f(X^*)$$

19

Le terme $(T_s - T_h) \cdot (V_a)^{0.5}$ représente l'influence des propriétés de l'air sur l'allure du séchage.

5. Le mécanisme de séchage :

5.1. Séchage par convection [7] :

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques.

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha A (T_a - T_s) \quad (1)$$

- Q (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps.
- A (m^2) : surface d'échange.
- $(T_a - T_s)$ (K) : l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher.
- α ($W / m^2 \cdot K$) coefficient d'échange par convection.

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci- après :

- La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit alors un diamètre moyen des particules.

D'après la formule (1), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante. Donc la diminution de la taille des particules constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage.

De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

- L'écart $(T_a - T_s)$ n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue.

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

- Le coefficient d'échange α peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des nombres adimensionnels tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que de celles du produit à sécher.

Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm, le coefficient d'échange par convection α peut être calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$\text{Nu} = \alpha \, dp / \lambda_a \quad (4.a)$$

λ_a : la conductivité thermique de l'air,
Grâce à la relation.

$$\text{Nu} = C \, \text{Re}^m \, \text{Pr}^n \quad (4.b)$$

Re : le nombre de Reynolds.

Pr : le nombre de Prandtl, égal à 0,7 dans le cas de l'air.

C : une constante ajustée expérimentalement,

m : proche de 0,8 et n de 0,5.

Re : étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître Nu donc le coefficient α ; cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur.

5.2. Séchage par conduction [7] :

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif.

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante.

Le flux thermique (en W/m^2) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl}$$

Avec :

- λ (**W / m·K**) : conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert.
- dT_s/dl : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

5.3. Séchage par rayonnement :

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil.

La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stephan Boltzmann :

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \Phi$$
$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

T_1 (K) : température de la source émettrice.

T_2 (K) : température du produit.

A_1 (m²) : surface du corps recevant le rayonnement,

A_2 (m²) : surface de l'émetteur d'infrarouge.

Φ : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a $\Phi = 1$).

ε_1 : émissivité du produit à traiter.

ε_2 : émissivité de l'émetteur.

σ : constante de Stephan Boltzmann ($\sigma = 5,673 \times 10^{-8} \text{ w / m}^2 \cdot \text{K}^4$).

6. Les séchoirs solaires :

C'est un dispositif qui permet le séchage de produits à conserver. Il existe plusieurs types de séchoirs :

6.1. Classification des systèmes de séchages solaires :

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement en plusieurs catégories présentées dans la figure (4)

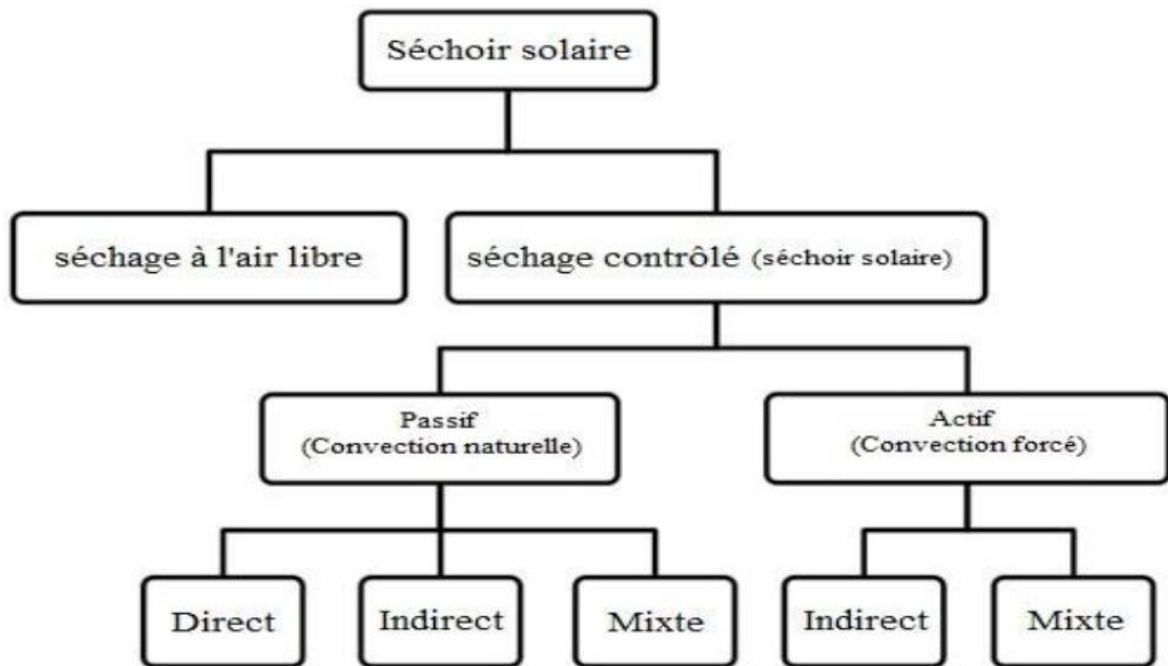


Fig 5 : Différents systèmes du séchage solaire

7. Les différents types de Séchoirs :

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [13] :

- ❖ séchoirs passifs et séchoirs actifs.
- ❖ Séchoirs directs et séchoirs indirects.
- ❖ Séchoirs hybrides.
- ❖ Séchoirs mixtes.

7.1. Les séchoirs actifs [8] :

Qui comportent des isolateurs (capteurs) placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer l'air avant son envoi dans cette dernière. Ils sont nombreux (1/3 fonctionne en convection naturelle, 2/3 fonctionnent en convection forcée).

Ils peuvent être dotés d'un chauffage d'appoint ou d'un recyclage afin d'améliorer ses performances, comme c'est le cas dans les pays industrialisés.

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est **isenthalpique**.

7.2. Les séchoirs passifs (séchoirs serres) :

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**.

7.3. Les séchoirs solaires directs :

Par définition, les rayons du soleil frappent directement dans ces séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

7.3.1 Principe de fonctionnement d'un séchoir direct :

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de 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).

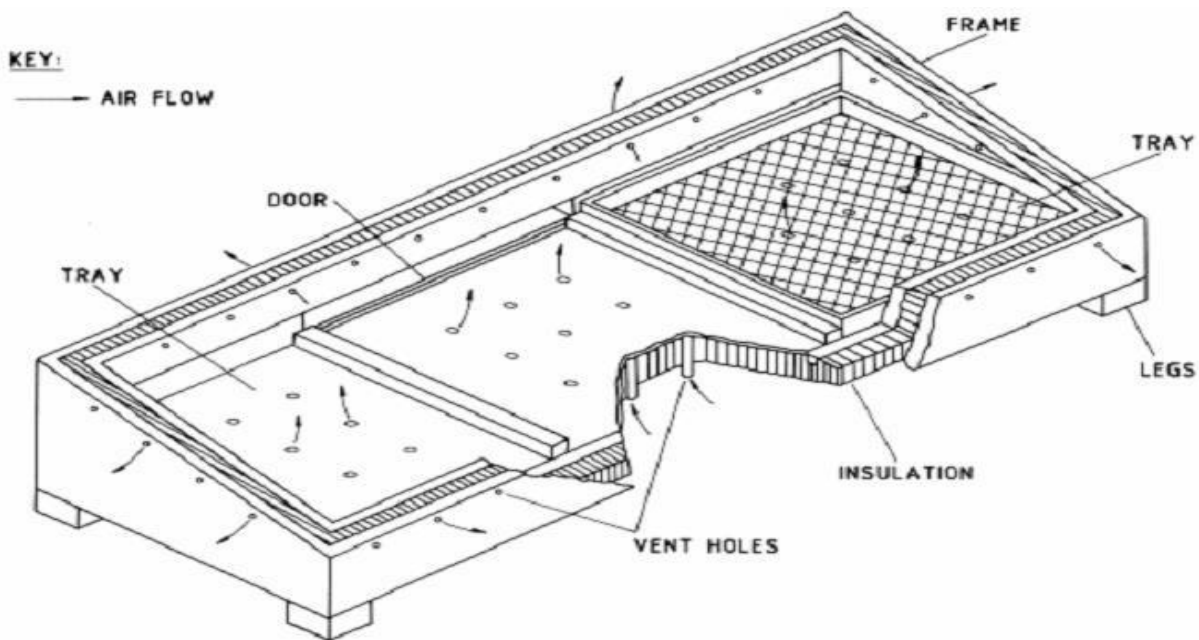


Fig 6 : Le séchoir solaire direct

7.4. 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.

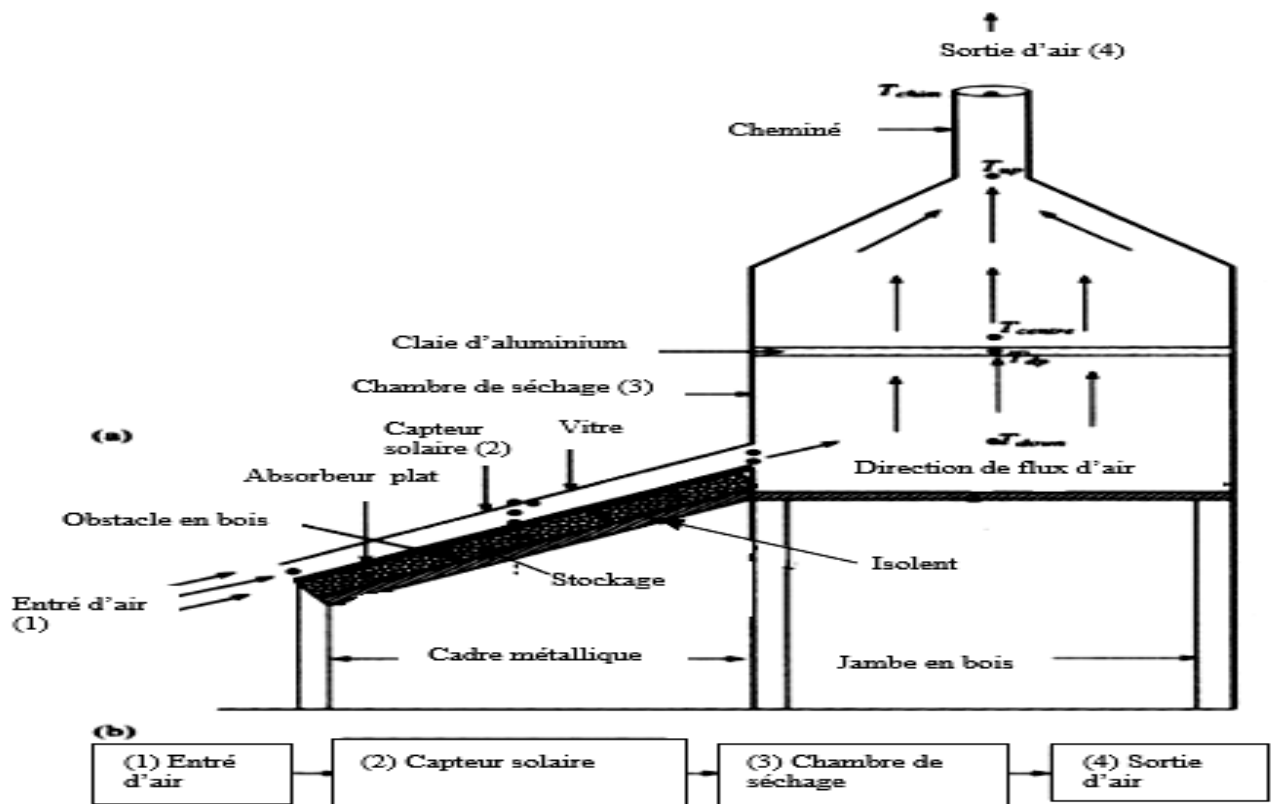


Fig 7 : schéma descriptive d'un séchoir indirect [14]

7.4.1 Principe de fonctionnement d'un séchoir indirect :

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 7). 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

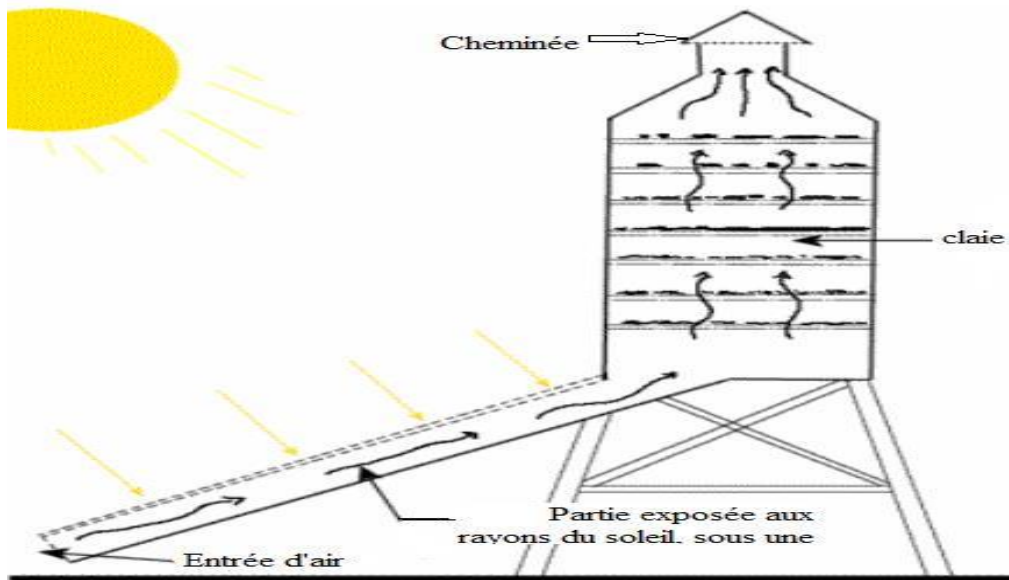


Fig8 : Séchoir solaire indirect

7.5. 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.

7.6. 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.

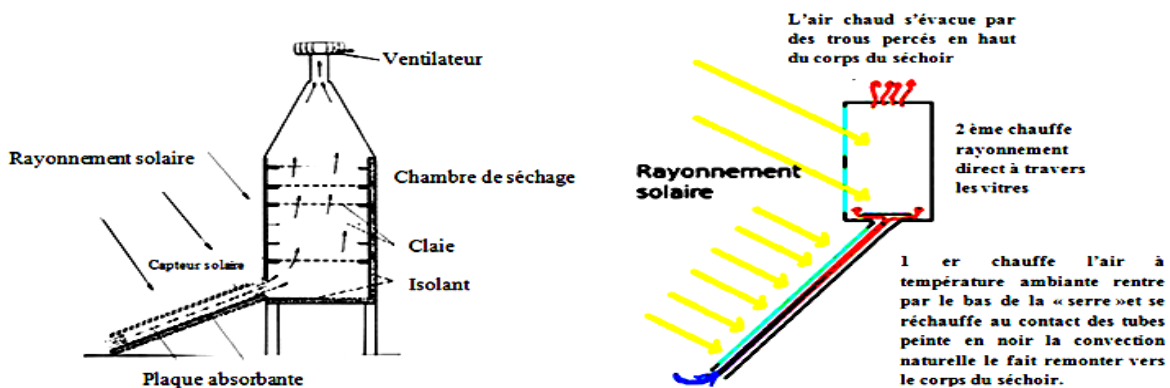


Fig9 : Schéma descriptive d'un séchoir mixte. [15]

Chapitre II:

Séchoirs solaires améliorés

1. Séchoirs solaires améliorés :

Cette partie du document est réservée aux améliorations des séchoirs solaires.

1. Système de séchage solaire passif :

Divers types de collecteurs à plaques plates ont été revue [16]. Ce collecteur est compliqué et plus efficace qu'un collecteur à plaques nues / couvertes. Les collecteurs à parois latérales qui s'intègrent dans la paroi du bac de séchage ont fait l'objet d'une attention et d'un développement considérables [17] et [18]. Cependant, ces collecteurs muraux sont chers et ont une durée de vie limitée à deux ou trois saisons. Des configurations intéressantes de capteurs solaires à film plastique de différentes formes [19]. D'autres types de capteurs solaires ont été utilisés, y compris des collecteurs à focalisation [20] et [21].

Une étude théorique et expérimentale du séchoir à armoire solaire a réalisé. Les résultats expérimentaux ont montré qu'en été (1-2 juin), des fruits à forte teneur en humidité comme la mangue avec 95% d'humidité initiale et 1 cm d'épaisseur sèchent jusqu'à 13% d'humidité finale en 12 heures d'ensoleillement. On s'est également rendu compte que les séchoirs de type cabine sont très utiles pour les applications domestiques pour le séchage des fruits et légumes dans les pays en développement [22]. La qualité du produit est maintenue dans le séchoir de type armoire (Figure 1).

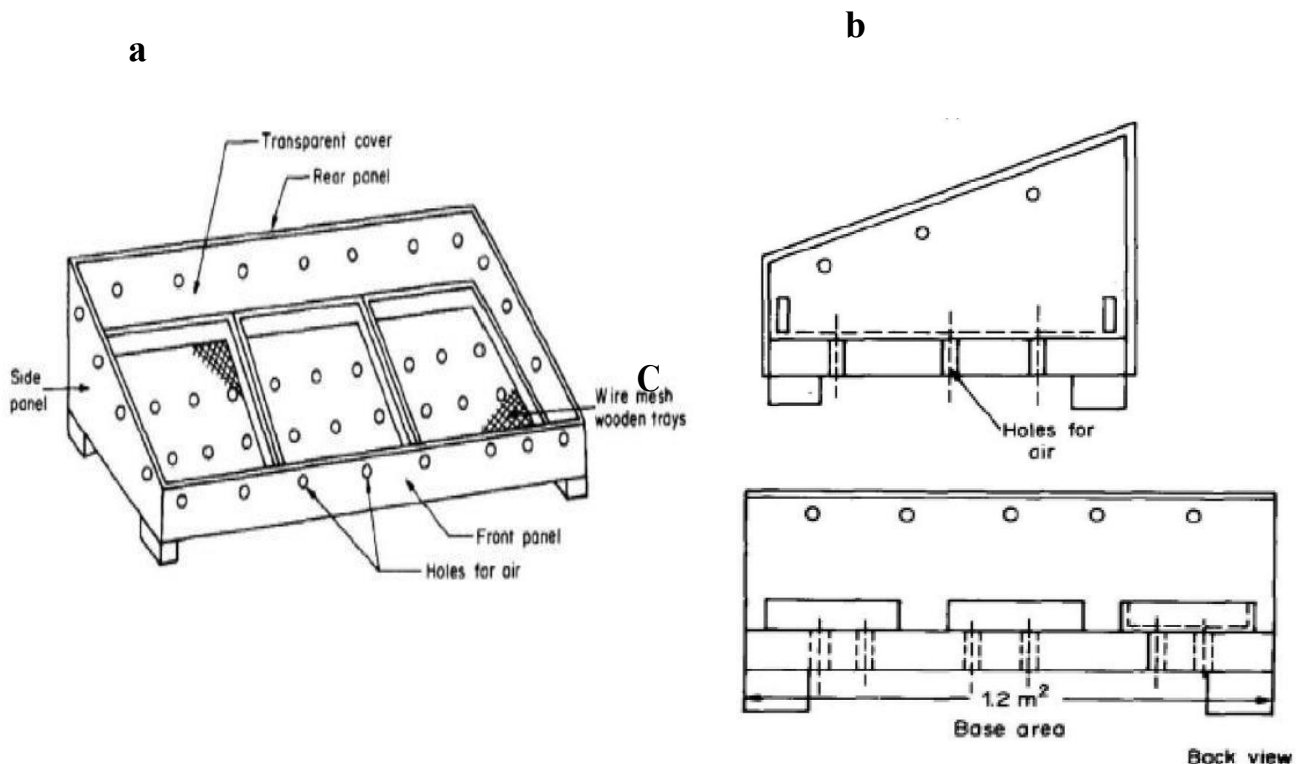


Figure 1. Séchoir de type armoire, *Energy Conversion and Management*, 25(3), Sodha et al

Un système de séchage modulaire a été conçu composé de : collecteur d'air plat à trois passes, une armoire de séchage et une chambre de déshumidification [23]. L'air circule sous l'absorbant inférieur lors du premier passage, puis dans le sens opposé, et enfin à travers les espaces d'air entre le vitrage et la plaque absorbante supérieure puis dans une chambre de mélange et une chambre de séchage. L'espace d'air supérieur est divisé en deux compartiments avec des chicane installées pour distribuer l'air sur la surface du collecteur. L'armoire de séchage solaire à deux collecteurs muraux situés sur la ligne est-ouest pour fournir un gain de chaleur supplémentaire et les plateaux sont espacés également sur les entretoises. La chambre de déshumidification est une boîte rectangulaire équipée de trois plateaux perforés contenant le déshydratant et le gel de silice, utilisée pour soutenir le processus de séchage solaire pendant les périodes de faible isolation. Les résultats du séchage des rizières et des tranches d'igname montrent que le système les a séché à une densité de couche de $7,4 \text{ kg m}^{-1}$ de 25,93% (poids humide) à 5,31% (poids humide) en 10 h et des tranches d'igname à une densité de couche de 5 kg / m^2 de 64,90% (wb) à 10,66% (wb) en 31h.

L'expérience de contrôle dans les conditions ambiantes nécessite 2 et 4 jours, respectivement, pour atteindre le même niveau d'humidité. Ce sécheur fonctionne en mode indirect (figure 2).

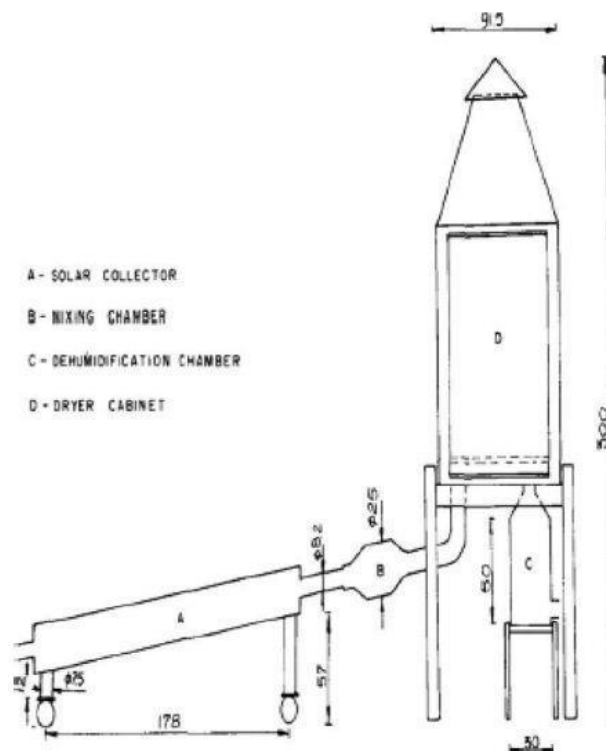


Figure 2. Séchoir solaire (toutes les dimensions en cm).

Le collecteur de chauffage de l'air a été relié à un bac de séchage isolé équipé d'une cheminée,

l'ensemble complet est fabriqué à partir de panneaux durs. Ce séchoir a une capacité de séchage de 90 kg de maïs humide d'une teneur en humidité d'environ 20% sur une base humide à 12% en 3 jours par une journée ensoleillée. Un séchoir à armoire à énergie solaire à circulation naturelle avec cheminée au Nicaragua (Figure 3).

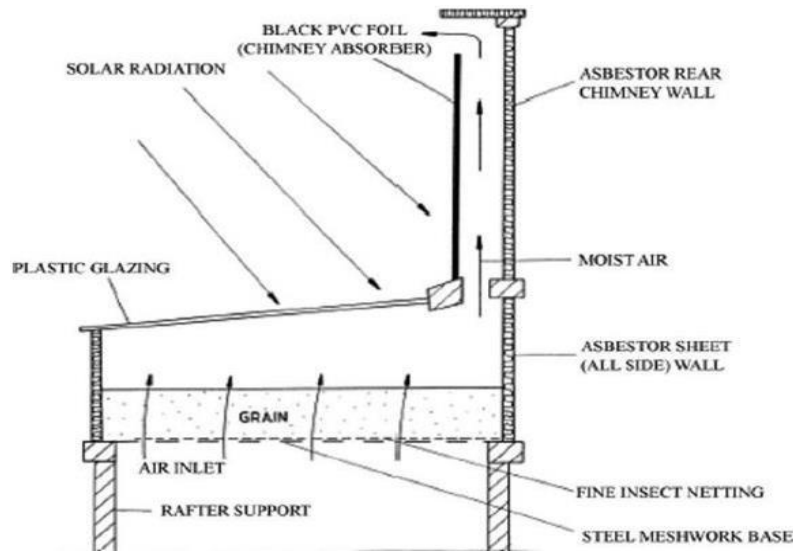


Figure 3. Séchoir d'armoire à énergie solaire à circulation naturelle avec cheminée, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), Sharma et al

Le séchoir solaire a un plancher en treillis pour permettre l'entrée d'air et une cheminée à l'extrémité nord de l'armoire. La cheminée avait été construite à l'aide de trois poteaux verticaux en bois avec une feuille d'amiante montée à l'arrière et un absorbeur en feuille de PVC noir sur la face avant orientée au sud. Il en résulte une meilleure efficacité de séchage par rapport à un séchoir à armoire passif traditionnel sans cheminée. Sa vitesse de séchage est quatre fois supérieure à celle du séchage au soleil. La forme initiale des séchoirs solaires à effet de serre à circulation naturelle pratiques signalés par le Brace Research Institute était un séchoir solaire à toit en verre [27] [28] [29]. Ce séchoir (figure 4) a deux rangées parallèles de plates-formes de séchage de surface de treillis métallique en fer galvanisé posé sur des poutres en bois. Un toit en verre incliné fixe au-dessus de la plate-forme permet le rayonnement solaire sur le produit. Le sécheur aligné horizontalement possède des parois internes recouvertes de noir pour une meilleure absorption du rayonnement solaire.

Ce séchoir (figure 4) a deux rangées parallèles de plates-formes de séchage (le long du côté long) de surface de treillis métallique en fer galvanisé posé sur des poutres en bois. Un toit en verre incliné fixe au-dessus de la plate-forme permet le rayonnement solaire sur le produit.

Le sécheur aligné horizontalement possède des parois internes recouvertes de noir pour une meilleure

absorption du rayonnement solaire.

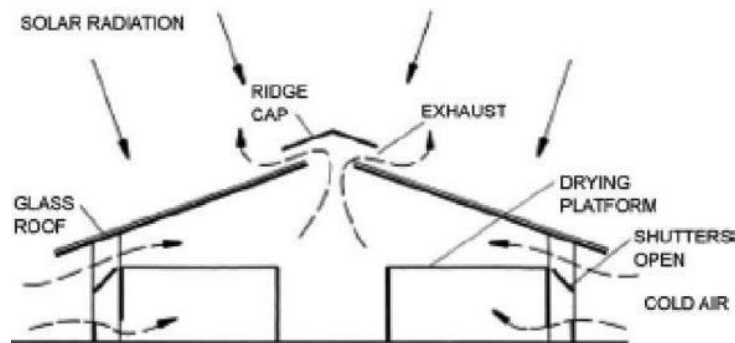


Figure 4. Séchoir à énergie solaire sur toit en verre à circulation naturelle.

Une modification du séchoir à armoire de conception typique a été signalée [30]. Il était équipé d'un plénum en bois pour permettre à l'air de circuler et d'une longue cheminée en contreplaqué d'améliorer la circulation naturelle. Ce séchoir a accéléré la vitesse de séchage environ cinq fois par rapport au séchage au soleil.

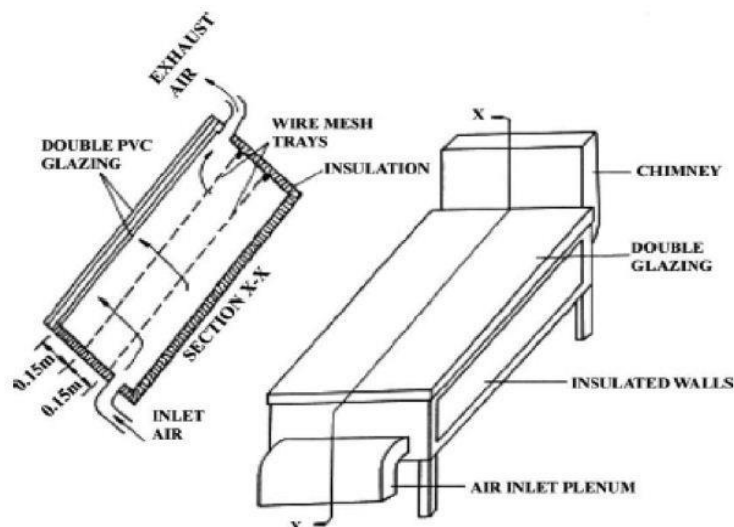


Figure 5. La configuration expérimentale d'un séchoir à armoire d'énergie solaire à circulation Naturelle modifiée.

Un prototype de séchoir solaire simple à faible coût a été conçu [31]. Il est couplé à une

cheminée collectrice verticale à plaque plate pour le séchage de 20 kg de riz paddy à haute humidité. Cette unité se compose d'un collecteur incliné ($20,6^\circ$), d'un séchoir discontinu et d'une cheminée de collecteur verticale réunis en série et positionnés au sud. L'absorbeur et le couvercle des deux collecteurs étaient de $2\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ en carton ondulé peint en noir mat G.I. feuille et poly méthacrylate de 3 mm, respectivement.

L'expérience a été menée en d'hiver. Un paddy de 20 kg récolté au champ a mis 9 h pour réduire la teneur en humidité de 31 à 13% (d.b.).

Il a économisé 7 h par rapport au séchage au soleil. Le séchoir pourrait également être utilisé avec succès pour le séchage d'autres produits de manière efficace et économique. Un séchoir solaire avec chauffe-eau conçu développé et testé (figure 6). [32].

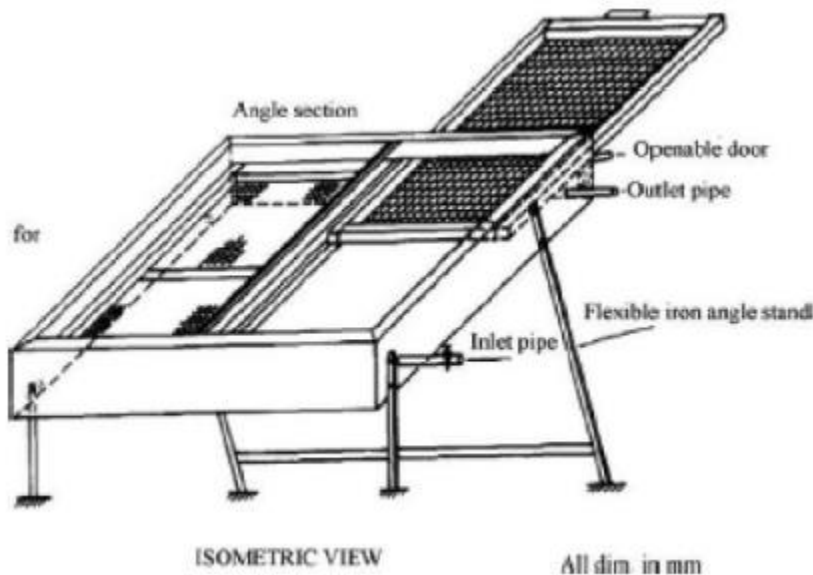


Figure 6. Chauffe-eau solaire, *Energy Conservation and Management*, Pande and Thanvi.

pour chauffer de l'eau exclusivement, aussi le séchage se poursuit même la nuit. Les observations ont révélé que 10 à 15 kg de fruits / légumes sont déshydratés en 3 à 5 jours.

Le chauffe-eau peut fournir 80 L d'eau chaude à environ 60 ° C les après-midi d'hiver. Il est calculé que l'unité peut économiser 418 kWh d'électricité en tant que chauffe-eau en plus de déshydrater 500 kg de fruits ou de légumes en un an. Un modèle peu coûteux a été conçu, séchoir solaire à basse température et facile à utiliser pour déshydrater les produits de la ferme (figure 7) [33]. Ce sécheur se composait d'un collecteur avec un système de stockage des roches, une chambre de séchage et une cheminée. Le lit de séchage est constitué d'une double couche de filet de volaille avec une structure ouverte. Il permet à l'air de séchage de passer à travers l'échantillon alimentaire, mais empêche les morceaux d'aliments de tomber dans le plénum. La chambre de séchage se compose de trois panneaux de bois amovibles en contreplaqué de 1,27 cm qui se chevauchent pour éviter les fuites d'air lorsqu'ils sont fermés ou insérés.

Le vitrage supérieur de la chambre de séchage solaire est pourvu d'un chauffage supplémentaire, ce capteur solaire peut transférer une puissance thermique de 118 W / m² à l'air de séchage. Les échanges thermiques au sein du sécheur ont été déterminés à partir d'un tableau psychométrique. L'air ambiant à 32 ° C et 80% d'humidité relative (HR) est chauffé à 45 ° C à 40% HR pour le séchage.

Les cultures sont séchées jusqu'à une teneur finale en humidité <14%, qui peut être conservée pendant une période de 1 an sans détérioration.

Un système conçu est utilisé pour sécher le manioc, le poivre, l'okro, les arachides et d'autres cultures vivrières.

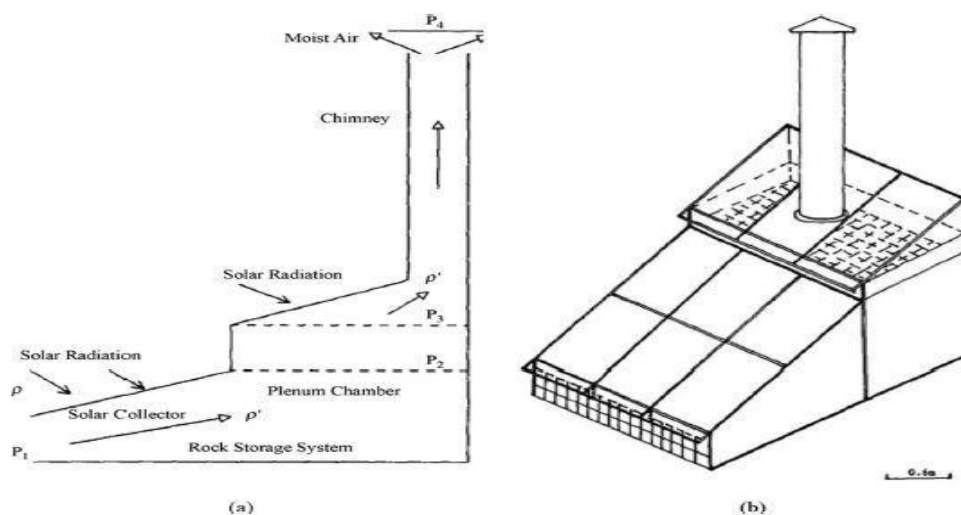


Figure 7. (a) séchoir à lit fixe avec capteur solaire, chambre plénière, chambre de séchage et cheminée du sécheur et (b) vue générale du séchoir.

Un séchoir solaire à circulation naturelle est développé, qui convient au séchage des produits agricoles (figure 8).

Les résultats ont montré les caractéristiques de séchage supérieures des séchoirs solaires à circulation

naturelle de type intégral par rapport au séchage traditionnel au soleil [34]. Un capteur solaire a été développé sous la forme d'un prototype de séchoir à armoire solaire à Oman (Figure 9) [35].

Des observations sont effectuées pour évaluer les performances du sécheur dans des conditions de charge et de déchargement. L'essai du séchoir a été effectué sans charge pendant 28 jours d'avril à mai 1996. Le séchoir atteint une température moyenne de 81 °C en 7 h de 8 h à 15 h.

En commençant par une température initiale moyenne de 34 °C à 8 h 00, la température de la chambre de séchage monte fortement à 68 °C à 9 h 00, puis à 82 °C à 10 h 00.

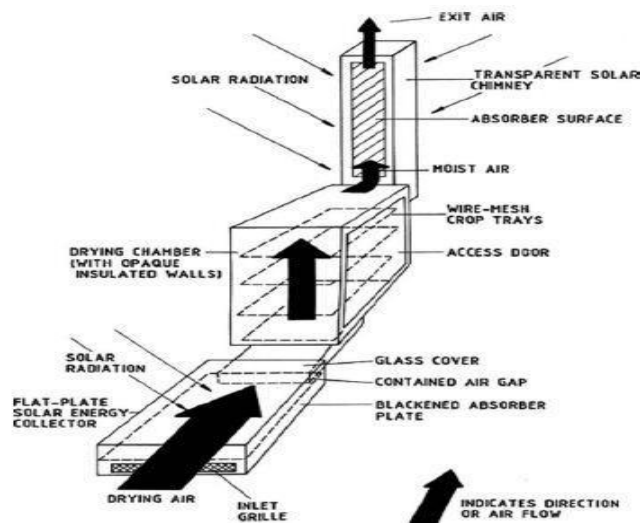


Figure 8. Vue isométrique d'une serre avec un séchoir à cultures montrant divers composants et paramètres d'optimisation, Ekechukwu et Norton (1997).

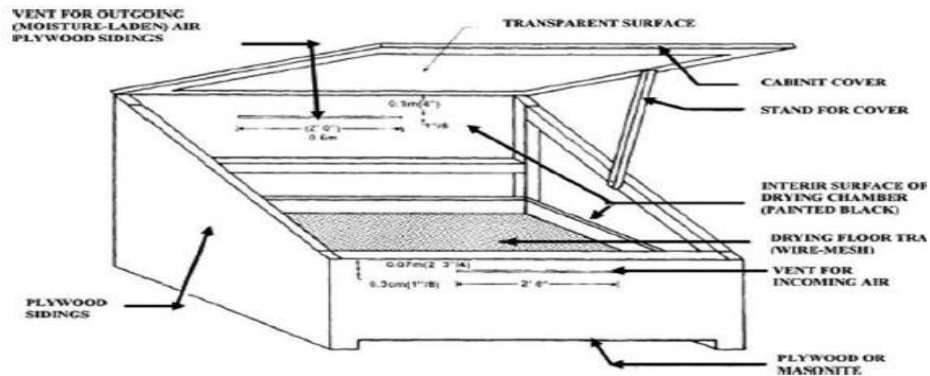


Figure 9. Vue isométrique de l'armoire solaire avec porte ouverte, Anpratwum and Dorvlo 1989.

animale à travers les deux séchoirs solaires a été étudié [36]. Il est fabriqué à partir de matériaux disponibles localement dans les conditions climatiques jordaniennes (Figures 10 et 11).

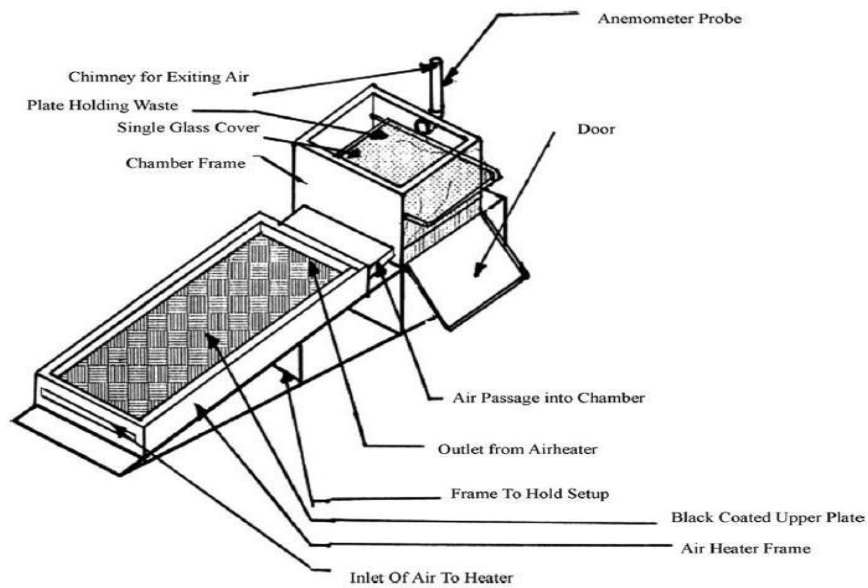


Figure 10. Une illustration du séchoir radio-convectif, Nijmeh et al. (1998).

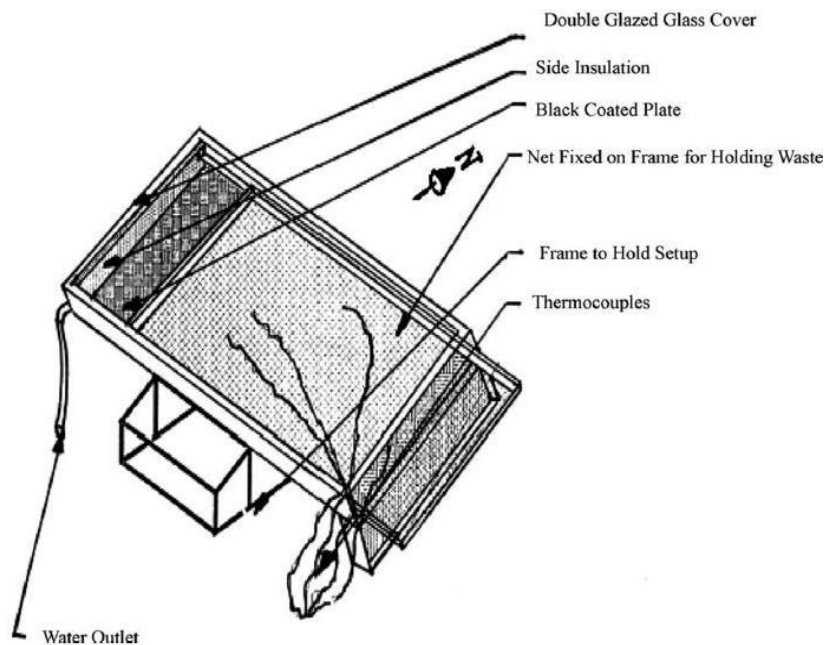


Figure 11. Une illustration du séchoir chaudière, Nijmeh et al. (1998).

Les auteurs ont rapporté que le séchoir à chaudière solaire est plus efficace par rapport au sécheur par

convection radiatif en qualité et en quantité.

Une étude expérimentale d'un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect a été conçue dans les conditions météorologiques dominantes de Tanta (Figure 12) [37].

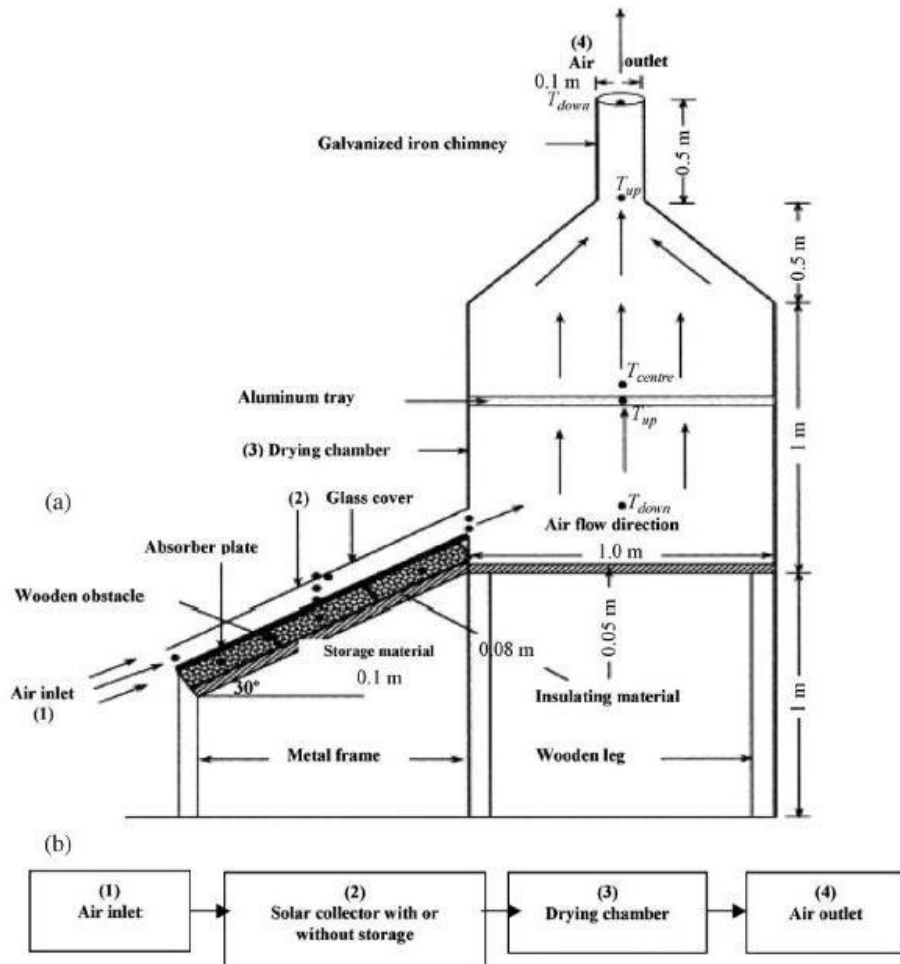


Figure 12. (A) vue transversale du séchoir solaire à convection naturelle de type indirect, des positions de thermocouple, (b) diagramme de flux.

Cette configuration consiste en un aérotherme solaire à plaques plates connecté à une armoire faisant office de chambre de séchage, pour pouvoir insérer divers matériaux de stockage sous la plaque absorbante afin d'améliorer le processus de séchage. Le sable est utilisé comme matériau de stockage (Le séchoir fonctionnait avec/sans matériel de stockage). Les fruits suivants peuvent être utilisés pour sécher dans ce séchoir, comme les raisins sans pépins, les figues et les pommes, ainsi que les légumes, tels que les pois verts, les tomates et les oignons.

Irradiante solaire, distribution de la température aux différentes parties du système, température ambiante et humidité relative de l'entrée et l'air de séchage de sortie sont enregistrés. Un nouveau sécheur solaire à convection naturelle a été mis au point [38]. Il se compose d'un aérotherme solaire et d'une chambre de séchage (Figure 13).

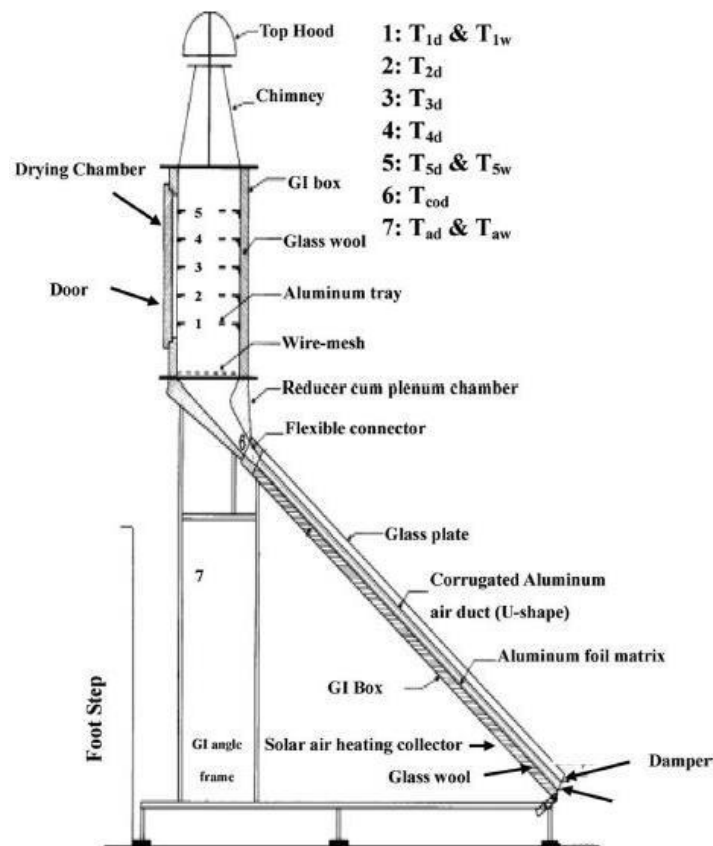


Figure 13. Détails sectoriels schématiques d'un séchoir solaire à convection naturelle, Pangavhane et al, 2002.

L'analyse a montré que le séchage traditionnel a séché les raisins en 15 et 7 jours, alors que le séchoir solaire n'a pris que 4 jours. Le temps de séchage total est réduit de 43%. Un système de chauffage de l'air passif à énergie solaire a été conçu. Il se compose d'un capteur solaire à plaque plane vitrée unique intégré à un système de stockage de chaleur à matériau à changement de phase (PCM) (Figure 14) [39].

Le PCM est construit en modules qui sont équidistants sur la plaque absorbante. Les espaces entre les paires de modules servent de canaux de chauffage de l'air. Les canaux sont connectés aux collecteurs communs d'entrée et de refoulement d'air. L'équipement de séchage solaire a été testé pendant la journée dans des conditions à vide à Nsukka, au Nigéria, sur une plage de température ambiante de 19 à 41 ° C et une plage d'irradiation mondiale quotidienne de 4,9 à

19,9 MJ / m². Ces observations ont montré que le système pouvait fonctionner avec succès pour les applications de séchage des récoltes.

Une étude de performance d'un séchoir à effet de serre tunnel (figure 15). Dans ce système de séchage, la serre agit comme un capteur solaire. Il donne une relation fonctionnelle linéaire entre le rayonnement solaire incident et la température de sortie de la serre [40].

Les résultats ont montré qu'une production presque constante est obtenue chaque jour. Les résultats de la simulation pour le poivron rouge ont montré une amélioration de 160% de la production, par rapport au séchoir à chambre unique. Aussi l'amélioration d'environ 40%, si le séchoir à double chambre est considéré. La performance moyenne est d'environ 30%.

Un séchoir solaire a été mis au point pour permettre aux agriculteurs indiens d'ajouter de la valeur à leurs produits en les séchant à la ferme même (figure 16). Ce sécheur est une conception à plusieurs étages avec chauffage intermédiaire, sécheur solaire passif, intégral, direct / indirect et portable permettant un séchage uniforme sur tous les plateaux. Une caractéristique unique de ce séchoir est que le produit peut être séché à l'ombre ou autrement selon les besoins. La conception nécessite un faible capital donc un faible coût. La limite maximale de la température de stagnation était de 75 ° C au mois de novembre à Ludhiana (31 °N), en Inde [41].

2. Système de séchage solaire actif :

Une conception simple et un collecteur d'air solaire rentable avec séchoir en armoire a été mis au point (figure 17) [42]. Un système de séchage solaire à convection forcée a été conçu à grande échelle présenté à la figure 18 [43]. Le système de séchage comprenait un ensemble de 40 capteurs solaires et trois armoires de séchage avec un ventilateur. Par conséquent, il économisait une grande quantité de carburant, gardait le produit propre et prenait moins de temps. Ainsi, les systèmes de séchage solaire à convection forcée convenaient dans les Industries alimentaires et chimiques.

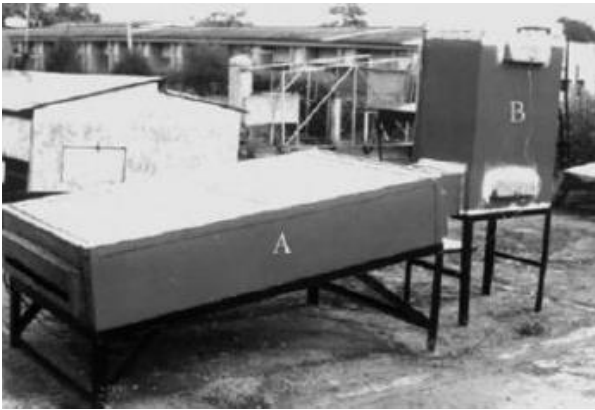


Figure 14. Photographie de l'ensemble de collecteur du système de chauffage de l'air (A) avec le sous-système de stockage d'énergie et de chauffage de l'air et l'espace de chauffage (B).

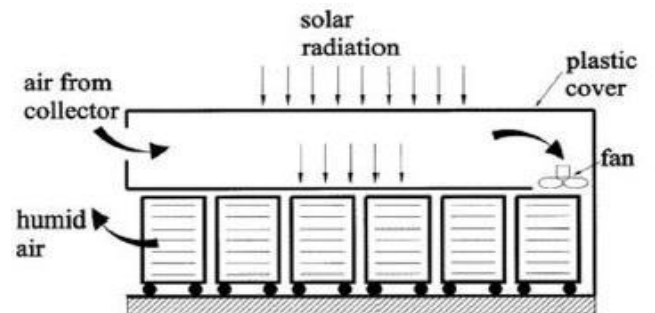


Figure 15. Schéma de fonctionnement du séchoir à effet tunnel. Vue fragmentée.

Un nouveau sécheur solaire a été conçu et mis au point (figure 20). Il se composait d'un réchauffeur d'air solaire et d'une chambre de séchage. Le système de séchage a été testé avec des raisins sultana, des haricots verts, des poivrons doux et des piments forts. Par conséquent, il a réduit le temps de séchage et a fourni une meilleure qualité du produit. Les rendements du réchauffeur d'air solaire et de la section de séchage sont fonction de paramètres physiques typiques. Les résultats expérimentaux pour différents produits alimentaires à différents débits d'air ont été observés [44]. Ce système de séchage avait une efficacité thermique comprise entre 30% et 80%.

Un séchoir à grains solaire avec circulation d'air photovoltaïque a été conçu (figure 21). La principale caractéristique de ce sécheur était l'utilisation de cellules solaires photovoltaïques incorporées dans la section des aérothermes solaires.

Ce séchoir peut sécher 90 kg de grains de maïs par lot d'une teneur en humidité initiale de 33,3% sur une base sèche à moins de 20% sur une base sèche en seulement 1 jour. La température de l'air de séchage a une limite supérieure de $60 + 3^{\circ}\text{C}$ ou $60 - 3^{\circ}\text{C}$ pour éviter la surchauffe et la fissuration du grain.

Un prototype de séchoir solaire a été conçu et mis au point, (figure 22). Le lit de dessiccation était un plateau peu profond avec un fond perforé. Un double vitrage Tedler a été placé juste au-dessus du lit. Ce panneau et le lit de déshydratant étaient inclinés à 15° par rapport à l'horizontale pour une collecte optimale de l'énergie solaire [45].

Un ventilateur alimenté par une batterie 12 V, chargé par un petit panneau photovoltaïque a été monté à côté. La demande de puissance par le ventilateur était de l'ordre de 5 à 10 W. Des expériences sont faites sur le séchage des abricots dans un séchoir cylindrique à colonne rotative nouvellement développé (figure 23), équipé d'un capteur solaire à air spécialement conçu et réduit ainsi le temps de séchage [46].

Une conception à faible coût a été construite et testé pour un séchoir à effet de serre tunnel à convection forcée (figure 24) [47]. Les avantages les plus importants de ce sécheur étaient :

- a. une Production continue.
- b. Coût de la main-d'œuvre réduit.
- c. Taux de production constant.
- d. Consommation de l'énergie réduite.

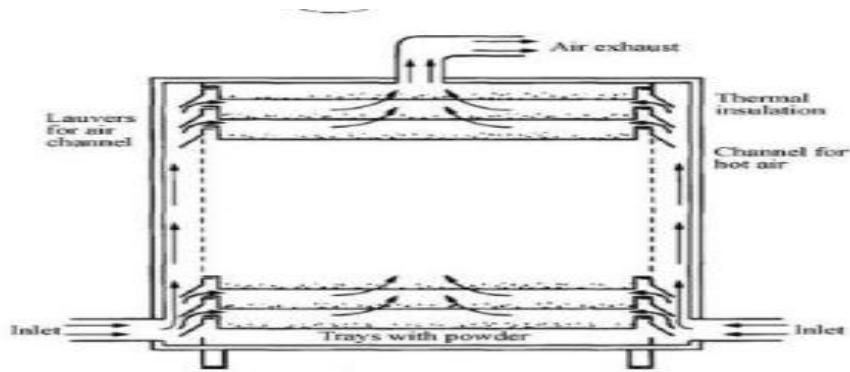


Figure 16. Schéma de principe d'une armoire de séchage d'un pâtissière, Pa

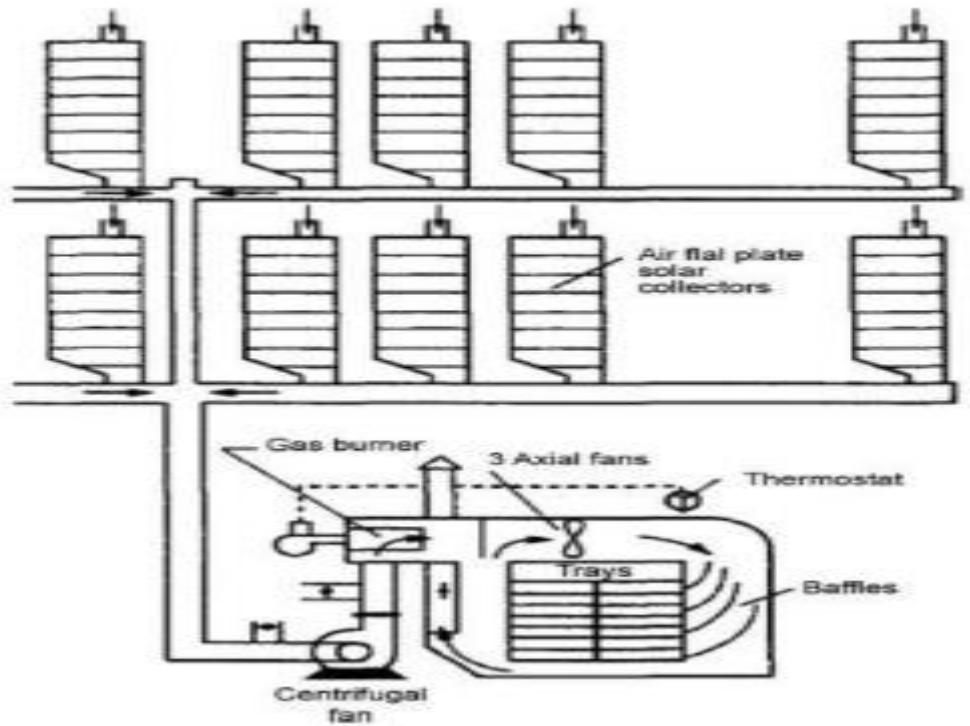


Figure17 : collecteur air solaire avec séchoir à armoire pour les applications de séchage des fruits, rata et Sharma, 1991.

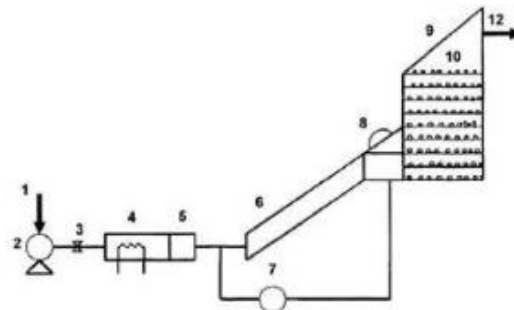


Figure 18. Système de séchage (I _entrée d'air; 2 _ventilateur; 3 _soupape; 4 _chauffage électrique; 5 _débitmètre; 6 _réchauffeur d'air solaire; 7 _transducteur de pression; 8 _pyranomètre; 9 _chambre de séchage; 10 _Rack; II _ produit; 12 _ sortie d'air).

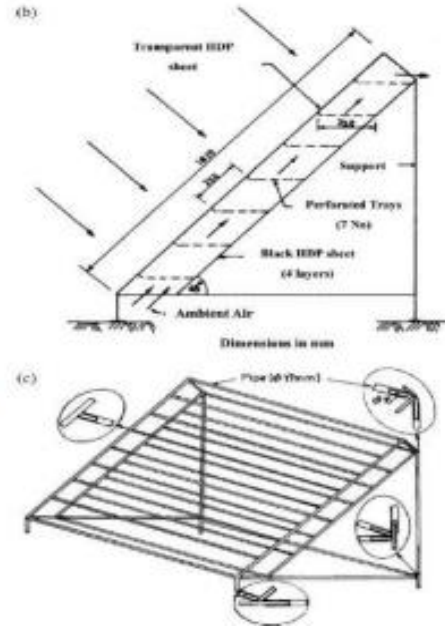


Figure 19. (a) photographie du séchoir solaire de ferme portable PAU (b) vue latérale du séchoir (c) détails du rack multi-bac, Singh et al., 2004.

Des expériences sur le séchage solaire de l'ananas ont été menées à l'aide d'un séchoir tunnel solaire (Figure 25). Ce séchoir dispose d'un collecteur plat recouvert de plastique transparent et d'un tunnel de séchage. De l'air chaud a été fourni au tunnel de séchage à l'aide de deux ventilateurs DC actionnés par un module solaire. Le séchoir avait une capacité de chargement de 120 à 150 kg d'ananas [49].

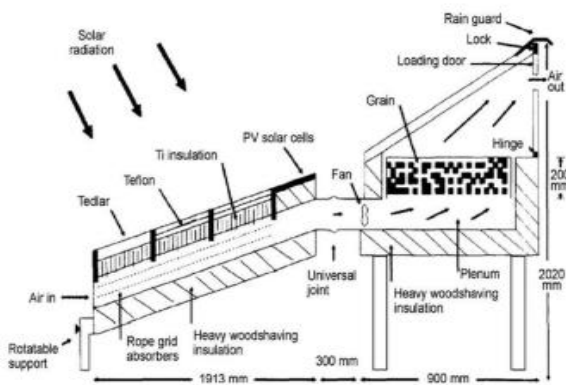


Figure 23. Une illustration d'un séchoir à grain solaire incorporant un ventilateur DC alimenté par photovoltaïque.

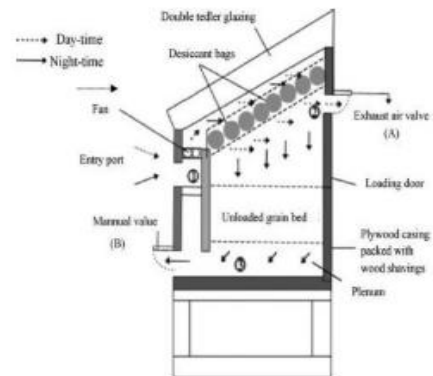


Figure 22. Le diagramme schématique d'un déshumidificateur déshydratant / collecteur intégré monté sur le bac de récolte, Sharma et al., 2009.

Le coefficient a été évalué de transfert de masse convectif pour le jaggery.

Les expériences ont été menées dans un environnement contrôlé (figure 26) [50].

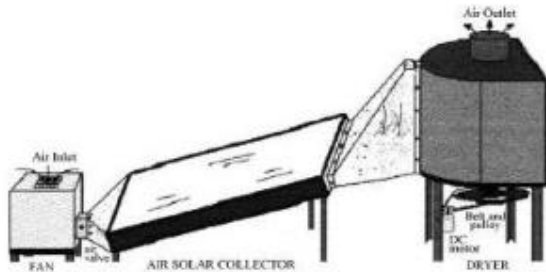


Figure 21. le système de séchage complet, Sarsilmaz et al., 2000.

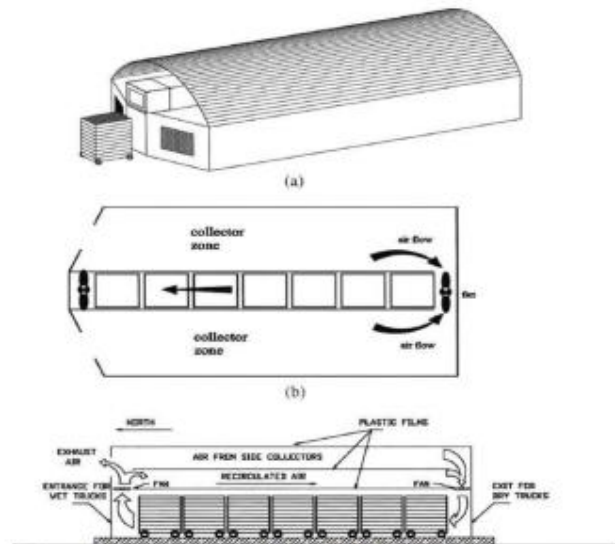


Figure 20. (a) Vue de face du séchoir à effet tunnel. (b) Vue de l'usine du séchoir à effet tunnel. (c) Séchoir à convection forcée à effet de serre du tunnel, Condori et al., 2001.

Dans ce processus, il y avait différentes masses de jaggery, séché dans une serre de type toit à portée uniforme d'une surface au sol de $1,2 \times 0,8 \text{ m}^2$ en mode de convection naturelle et forcée à la pression atmosphérique. Jaggery a été séché jusqu'à ce qu'il n'y ait presque aucune variation de masse. Des données expérimentales sur la masse évaporée, les températures de jaggery, l'air ambiant des serres et l'humidité relative ont été mesurées.

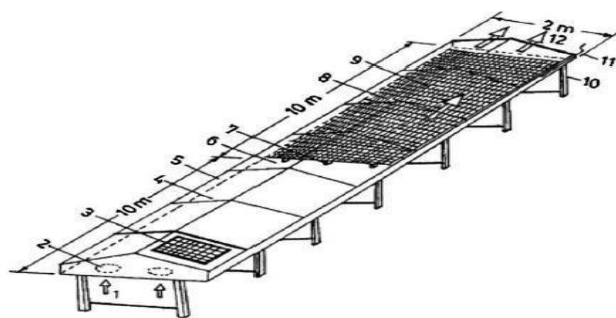


Figure 24. Sécheur solaire à tunnel: (1) entrée d'air; (2) ventilateur; (3) module solaire; (4) capteur solaire; (5) cadre métallique latéral; (6) sortie du collecteur; (7) support en bois; (8) filet en plastique; (9) structure de toit pour supporter le couvercle en plastique; (10) structure de base pour supporter le séchoir tunnel; (11) barre de roulement; (12) sortie du tunnel de séchage, Bala et al., 2003.

Un modèle analytique transitoire a été présenté pour étudier l'application d'une serre avec stockage thermique à lit tassé au séchage des cultures. La serre de forme uniforme avec un lit tassé et un séchoir a été appliquée pour le séchage des oignons. Le modèle a été utilisé pour calculer les températures de l'air et divers composants fonctionnels des systèmes de séchage pour une journée du mois de mai pour les conditions climatiques de Delhi (figure 27). L'étude paramétrique a impliqué l'effet de la longueur et de la largeur. La serre de 6 m de longueur, 4 m de largeur avec un débit massique d'air de $0,278 \text{ kg}^{-1}$ avec une hauteur de 0,25 m de lit tassé pouvait sécher 2280 kg d'oignon à partir d'une teneur en humidité de 6,14 à $0,21 \text{ kg d'eau / kg de matière sèche}$ en une période de séchage de 24 h [51]. Un sécheur solaire à convection forcée indirecte et à dessiccateur intégré a été conçu et fabriqué (figure 28) [52].

Ils ont étudié les performances dans les conditions climatiques chaudes et humides de Chennai, ce système se composait d'un collecteur d'air solaire à plaques plates, d'une chambre de séchage et d'une unité de dessiccation. L'unité de dessiccation a été conçue pour contenir 75 kg de déshydratant solide à base de CaCl_2 . Il se composait de 60% de bentonite, 10% de chlorure de calcium, 20% de vermiculite et 10% de ciment. Les expériences de séchage ont été effectuées pour des pois verts à différents débits d'air. L'efficacité de ramassage du système, le taux d'extraction d'humidité spécifique, la perte de masse sans dimension, le taux de retrait massique et la vitesse de séchage ont été observés.

3. Tendances récentes du système de séchage solaire.

3.1. Système de séchage solaire passif :

Un séchoir solaire domestique à plusieurs étages a été mis au point pour sécher divers produits à la maison, composé de trois plateaux perforés disposés l'un au-dessus de l'autre (figure 29). L'air de séchage circule à travers le produit par circulation naturelle [41].



Figure 25. Jaggery séchant dans une serre sous (a) mode de convection naturelle, (b) mode de convection forcée Réimprimé à partir du Journal of Food Engineering, 2 (9), Tiwari et al., 2004.

La vitesse de séchage était uniforme dans tous les plateaux. La température maximale de stagnation de ce séchoir solaire a été de 100°C au mois de novembre à Ludhiana (31°N). Le séchoir solaire domestique était un séchoir solaire de petite taille à circulation naturelle. La plupart des produits utilisés sous forme de poudre dans la cuisine domestique en petites quantités de l'ordre de quelques kg par an. Compte tenu de ces exigences, la surface d'ouverture de ce séchoir a été maintenue à $0,36\text{ m}^2$ de telle sorte qu'il était capable de sécher environ 1 kg de produit frais par jour. L'utilisation de ce séchoir au niveau domestique a montré que cette capacité était tout à fait adaptée aux ménages du nord de l'Inde. Un modèle thermique a été développé pour prédire la température de jaggery, la température de l'air de la serre et l'humidité évaporée, pendant le séchage du jaggery en mode convection naturelle.

L'expérience a été menée séparément pour 0,75 kg et 2,0 kg de morceaux de jaggery ayant des dimensions de $0,03 \times 0,03 \times 0,01 \text{ m}^3$ pour un séchage complet (figure 30) [53].

Une couche mince de séchage solaire organique de tomate a été conçue à l'aide d'un séchoir tunnel solaire [54].

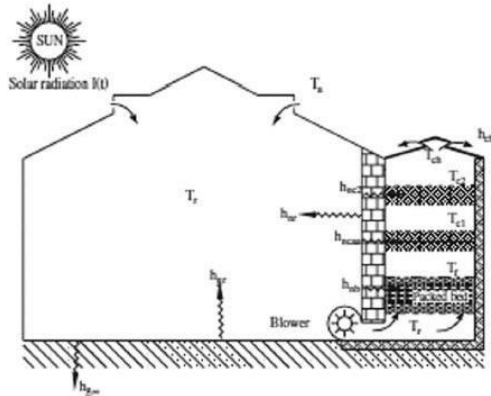


Figure 26. Une illustration d'un séchoir à cultures en serre montrant divers coefficients de transfert de chaleur, Jain, 2005.

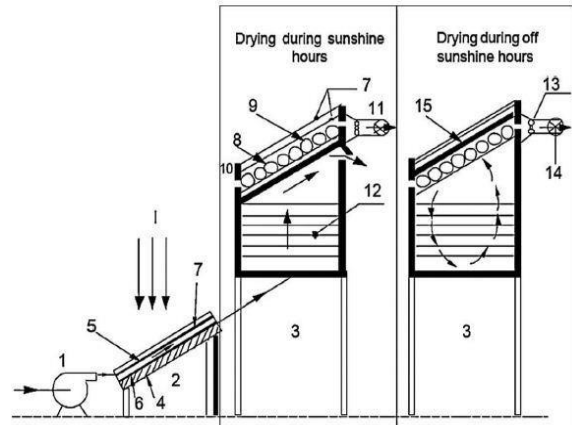


Figure 27. La vue schématique du séchoir solaire intégré à dessiccateur, Shanmugam et Natarajan, 2006.

Des expériences ont été menées dans les conditions écologiques d'Ankara (figure 31). En cours d'expérimentation, des tomates biologiques séchées la teneur en humidité finale de 11,50 à partir de 93,35% en poids, en 4 jours de séchage dans le séchoir tunnel solaire contre 5 jours de séchage en plein soleil. Les courbes de séchage n'ont montré qu'une période de vitesse de séchage décroissante. Une procédure de régression non linéaire utilisée pour ajuster 10 modèles analytiques en couche mince différents est disponible dans la littérature pour les courbes de séchage expérimentales.



Figure 28. Une illustration d'une photographie d'un séchoir solaire domestique avec porte ouverte, Singh et al 2006.

Ces modèles ont été comparés à l'aide du coefficient de détermination, du pourcentage d'erreurs relatives moyennes, de l'erreur quadratique moyenne et du chi carré réduit.

Dans ceux-ci, l'approximation du modèle de diffusion a montré un meilleur ajustement aux données expérimentales de séchage par rapport aux autres modèles également été déterminée.

L'influence de la température de séchage et de l'humidité relative sur la constante et les coefficients du modèle de séchage a également été déterminée. Les produits séchés dans le séchoir à tunnel solaire étaient complètement protégés des insectes, de la pluie et de la poussière.

Les échantillons séchés étaient de haute qualité, il est de construction très simple et construit à faible coût avec des matériaux disponibles localement. Aucune période de vitesse de séchage constante n'a été observée et tous les processus de séchage ont eu lieu pendant la période de vitesse de descente. La teneur en humidité a été réduite de 93,35% à 11,50% p.b. en 5 jours pour le séchage au soleil en plein air, alors que le séchoir à tunnel solaire n'a pris que 4 jours. En fonction des conditions de la saison, le séchoir tunnel solaire a entraîné une réduction du séchage temps dans une mesure de 26,9% par rapport au séchage au soleil en plein air. De plus, les échantillons de séchoir à tunnel solaire ont été complètement protégés des insectes, des oiseaux, de la pluie et de la poussière. La possibilité d'utiliser un séchoir solaire pour le séchage a été examinée (Figure 32). Il se compose d'une chambre de séchage en forme de serre et de 6 m² de collecteurs d'air. L'observation a montré que le séchage solaire des greengages salés était très efficace, et la période de séchage raccourcie à environ 15 jours. Il a été constaté que le séchoir solaire nouvellement développé pouvait éliminer un processus qui prend 20 jours pour dessaler les greengages salés [55]. Un petit séchoir solaire avec une capacité de suivi solaire limitée a été conçu et testé (Figure 33). Ce sécheur avait une plaque absorbante en acier doux et un couvercle transparent en polychlorure de vinyle (PVC). Il peut être ajusté pour suivre le soleil par incréments de 15°.

Les performances du séchoir ont été observées en ajustant l'angle du suivi du soleil. Le café était utilisé pour sécher dans ce séchoir. La distribution de la température dans le plénum et la vitesse de séchage du café parchemin ont été déterminées. La température à l'intérieur du plénum pourrait atteindre une limite maximale de 70,4 °C. Le séchoir peut abaisser la teneur en humidité des grains de café de 54,8% à moins de 13% (p / b) en 2 jours. Il faudra 5 à 7 jours pour sécher au soleil [56].

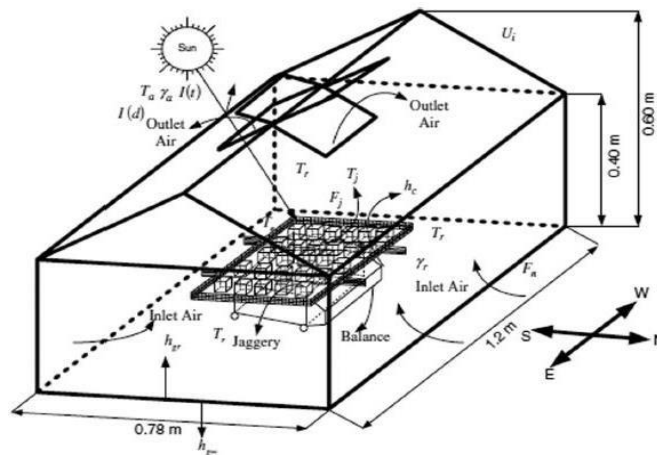


Figure 29. Principe de fonctionnement du séchage par jaggery en serre en mode convection naturelle, Kumar et Tiwari, 2006.

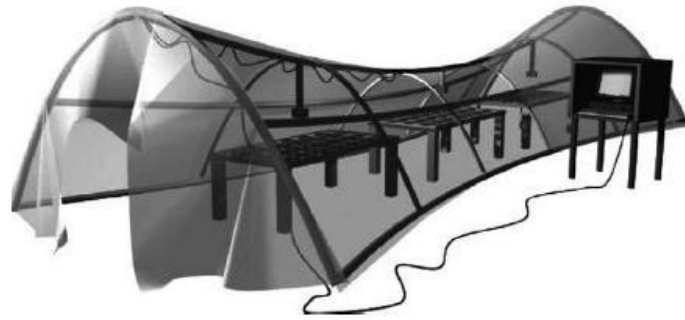


Figure 30. Le schéma de principe du sécheur tunnel solaire, Sacilik et al 2006.

Un séchoir hybride à l'échelle du village a été développé. Un séchoir à biomasse solaire à convection naturelle de type direct a été développé. La performance des rhizomes de curcuma a été évaluée dans ce séchoir. Le système était capable de générer un débit d'air chaud adéquat et continu entre 55 et 60 ° C. Les rhizomes de curcuma séchés obtenus sous séchage à la biomasse solaire (hybride) par deux traitements différents, à savoir, l'ébullition et le tranchage de l'eau étaient de qualité similaire en ce qui concerne l'apparence physique comme la couleur, la texture, etc., mais il existe une variation significative de l'huile volatile. L'analyse quantitative a montré que le séchage traditionnel, avait mis 11 jours pour sécher les rhizomes tandis que le séchoir à biomasse solaire ne prenait que 1,5 jour avec meilleure qualité. L'efficacité de l'ensemble de l'unité obtenue était de 28,57%. Les détails du séchoir sont présentés à la figure 34 [57].

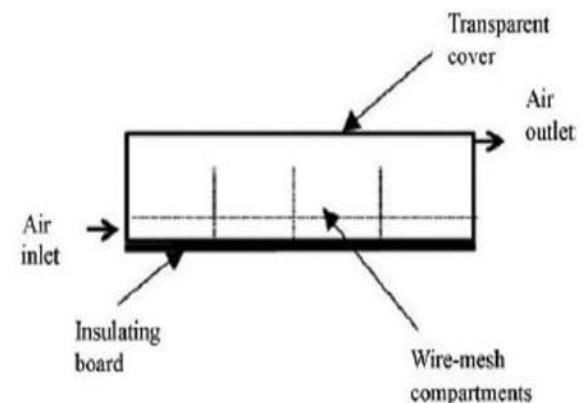
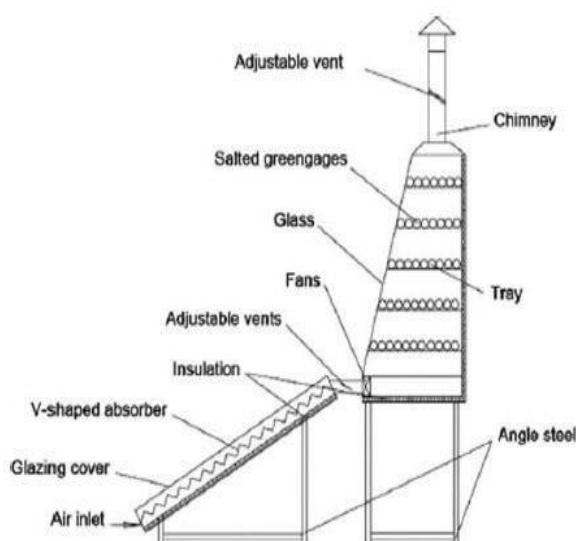


Figure 32. Vue en coupe du séchoir solaire, Mwithiga et Kigo, 2006.

Figure 31. Un diagramme schématique d'un séchoir solaire en coupe, Li et al 2006.

Un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect avec capteurs solaires intégrés Stockage et chauffage d'appoint à biomasse a été conçu, construit et évalué (figure 35). Les

Principaux composants du sécheur étaient le brûleur à biomasse, la masse thermique de stockage du collecteur et la chambre de séchage.

La masse thermique avait été placée dans la partie supérieure de l'enceinte du brûleur à bio masse. Le séchoir a été fabriqué d'une façon simple. Il a été testé dans trois modes de fonctionnement (solaire, biomasse et solaire-biomasse) en séchant 12 lots d'ananas frais. Chaque lot comprenait environ 20 kg. Les résultats ont montré que la masse thermique était capable de stocker une partie de l'énergie solaire absorbée et de la chaleur du brûleur. Il était possible de sécher un lot d'ananas utilisant l'énergie solaire uniquement par temps clair. Le séchage s'est déroulé avec succès même dans des conditions météorologiques défavorables en mode de fonctionnement solaire-biomasse. Dans ce mode de fonctionnement, le séchoir a réduit la teneur en humidité des tranches d'ananas d'environ 66% à 11% (d.b.) [58].

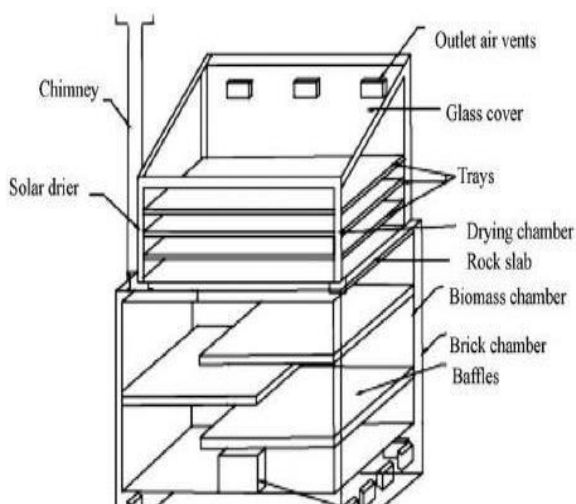


Figure 34. Une illustration d'un sécheur de biomasse solaire, Prasad et al 2006.

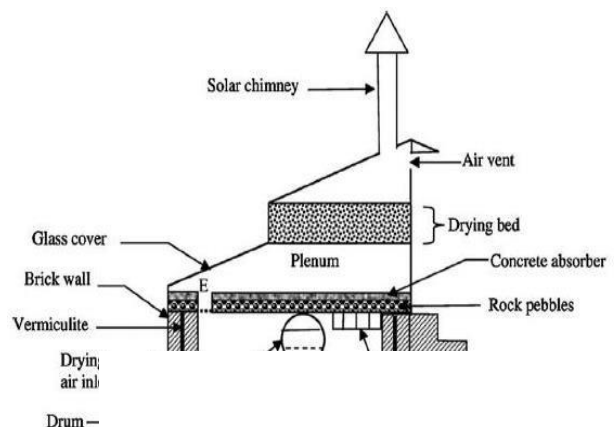


Figure 33. Une illustration de la vue en coupe du sécheur solaire à travers Le brûleur, le collecteur, la chambre de séchage et la cheminée solaire, Madhopa et Ngwalob, 2007.

Les valeurs moyennes de l'efficacité de captage d'humidité au dernier jour étaient de 15%, 11% et 13% dans le solaire, la biomasse et modes de fonctionnement solaire-biomasse, respectivement.

Une étude a été présentée pour la biomasse solaire en plein soleil et à convection naturelle de type direct. C'est très simple dans la construction et peut être fabriqué en utilisant des matériaux locaux. Des études expérimentales ont été menées pendant les mois d'été (avril-mai 2004) et d'hiver (novembre-janvier 2003-2004) à Delhi, en Inde. Le séchoir hybride a économisé 63 heures de temps de séchage par rapport au séchage au soleil ouvert pour du gingembre de 0,008 m d'épaisseur.

La qualité du gingembre séché dans un séchoir hybride s'est également avérée meilleure que celle obtenue par séchage au soleil. Dans le séchoir hybride, le gingembre d'une épaisseur de 0,008 m a été séché en 33 h alors qu'il a fallu 96 h en plein soleil.

L'efficacité de séchage globale du séchoir hybride s'est avérée être de 18% et 13% dans des conditions climatiques d'été et d'hiver respectivement. La perte de teneur en huile volatile du gingembre est moindre dans le séchoir hybride par rapport au séchage au soleil ouvert.

On a trouvé que la température moyenne de l'air de séchage de 60 ° C avec une vitesse d'air moyenne de 0,6 m / s était suffisante pour le séchage du gingembre dans le séchoir hybride.

Le séchoir hybride est simple, qui peut être fabriqué avec des matériaux disponibles localement et peut être utilisé pour le séchage d'autres épices, légumes et fruits, etc. [59].

Une étude a été présentée ; l'application du réseau neuronal artificiel (ANN) pour la prédiction de la variation de température des produits alimentaires pendant le séchage solaire. Les variables climatiques importantes, à savoir l'intensité du rayonnement solaire et la température de l'air ambiant, avaient été considérées comme les paramètres d'entrée pour la modélisation ANN. Des données expérimentales sur des cylindres et des tranches de pomme de terre obtenus avec un séchoir solaire en mode mixte pendant 9 jours typiques de différents mois de l'année ont été utilisées pour la formation et le test des réseaux de neurones (figure 36) [60].

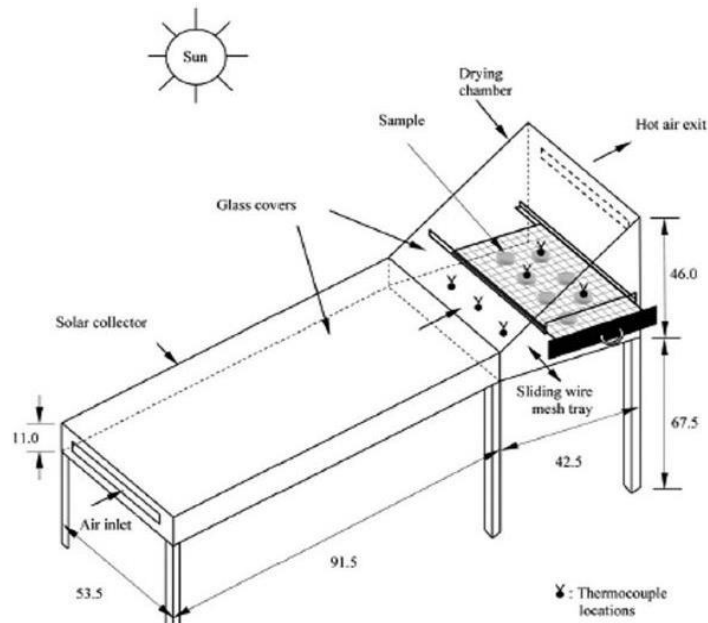


Figure 35. Le schéma de principe du sécheur solaire en mode mixte. (Les dimensions sont en cm), Tripathy et Kumar, 2009.

Les résultats de l'analyse révèlent que le réseau avec quatre neurones et la fonction de transfert de logis et l'algorithme de propagation en retour trainrp sont l'approche la plus appropriée pour les cylindres et les tranches de pommes de terre sur la base de mesures d'erreurs minimales.

Afin de tester la pertinence du modèle ANN pour la prévision de la variation de la température des aliments, un modèle analytique de diffusion de la chaleur avec des conditions aux limites appropriées et un modèle statistique avait également été proposé. Sur la base de l'analyse des erreurs, la capacité de prédiction du modèle ANN s'est avérée être la meilleure de tous les modèles de prédiction étudiés, quelle que soit la géométrie de l'échantillon alimentaire.

Les aspects de modélisation d'une serre floricole ont été présentés. Il convient à un fonctionnement dans un climat indien typique sous ventilation naturelle (figure 37). Dans ce modèle, une ventilation combinée de faîtage et de paroi latérale est prise en compte. L'étude analytique paramétrique a permis de comprendre les effets des variations de paramètres tels que la vitesse du vent, l'intensité du rayonnement solaire, la hauteur effective de la serre, etc. Le sécheur de performance a été influencé par ces paramètres [61].

Un séchoir à tente solaire sous convection naturelle a été conçu, développé et testé pour étudier la cinétique de séchage en couche mince de grains d'amarante. Le séchage des grains dans le séchoir avait été effectué sur une grille de séchage à deux couches ; haut et bas (figure 38). La température ambiante variait de 22,6 à 30,4 ° C et l'humidité relative varie de 25 à 52%. La température intérieure et l'humidité relative du séchoir solaire variaient respectivement de 31,2 à 54,7 ° C et de 22 à 34%. Des grains d'amarante fraîchement récoltés avec une teneur moyenne en humidité de 64% ont été séchés sous le séchoir à tente solaire pendant 7 h jusqu'à une teneur finale en humidité de 7% (base sèche) [47]. Une analyse de régression non linéaire a été utilisée pour évaluer six modèles de séchage en couche pour les grains d'amarante. Le modèle a été comparé à l'aide du coefficient de détermination (R^2), de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), du chi carré réduit (χ^2) et des performances de prédiction (η_p). Sur la base d'un intervalle d'erreur résiduelle de $\pm 5\%$, le modèle Page a atteint les performances de prédiction les plus élevées ($\eta_p = 80\%$). un séchoir à tunnel solaire hémicylindrique de type walk-in a été développé, conçu et testé construit avec un mur nord de protection thermique.

Il est destiné au séchage des produits agricoles et horticoles à grande échelle (figure 39). Les performances des raisins sans pépins ont été évaluées dans ce séchoir. L'étude a montré que les raisins non traités chimiquement prenaient 7 jours pour sécher à 16% (p.b) d'humidité. Le gradient de température à l'intérieur du séchoir tunnel est d'environ 10 à 28 ° C par temps clair. Il suffit de sécher les produits agricoles [62].

3.2. Système de séchage solaire actif :

Les performances d'un système de séchage solaire de fruits et légumes en Irak ont été testées. Ce système de séchage se compose de trois parties (capteur solaire, armoire de séchage solaire et ventilateur). Deux capteurs solaires à air identiques ayant des plaques d'absorption ondulées en V de deux passages d'air, un seul couvercle en verre ont été utilisés. La superficie totale des collecteurs était de 2,4 m². Le cabinet était divisé en six divisions séparées par cinq étagères. Deux types de fruits et un type de légume y ont été séchés simultanément. Les raisins, les abricots et les haricots peuvent être utilisés pour sécher dans cette configuration. Teneur en humidité de l'abricot réduite de 80 à 13% en 1 jour et demi de séchage. La teneur en humidité des raisins est passée de 80 à 18% en deux jours et demi de séchage, tandis que celle des grains a baissé de 65 à 18% en 1 jour seulement. L'effet de la variation de la vitesse de l'air à l'intérieur de l'armoire de séchage est faible. L'humidité relative de l'air sortant de l'armoire était faible (entre 25 et 30%) et il n'y avait donc pas besoin d'air à haute vitesse à l'intérieur de l'armoire [63].

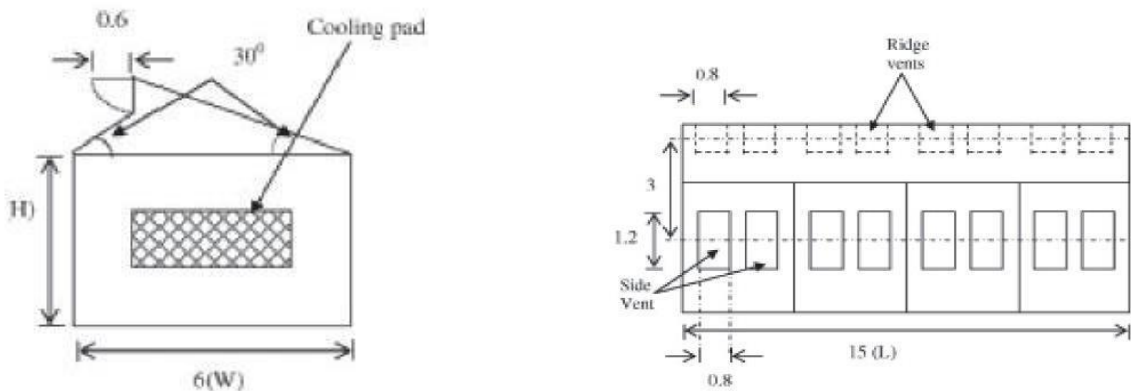


Figure 36. Élévation de la serre expérimentale (pas à l'échelle ; toutes les dimensions en m), Ganguly et Gosh, 2009.

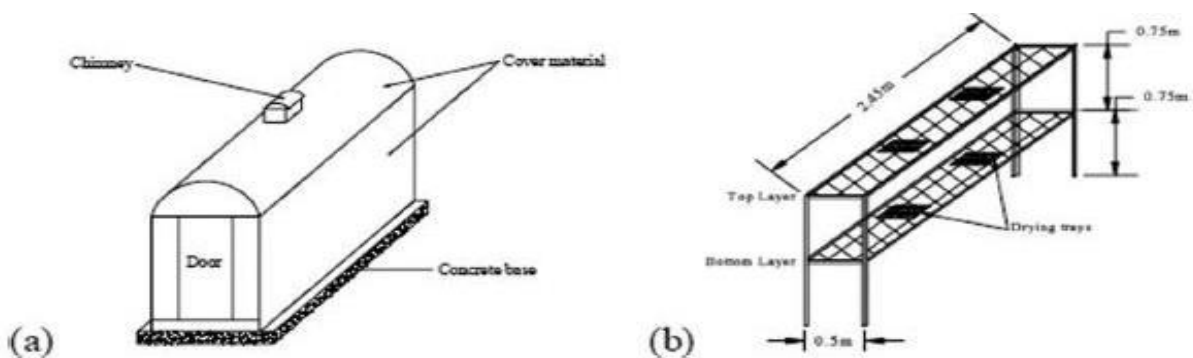


Figure 37. (a) d'un diagramme schématique d'un séchoir à tente solaire à convection naturelle et (b) d'un diagramme montrant la disposition des plateaux de séchage en deux couches (Ronoh et al 2010).

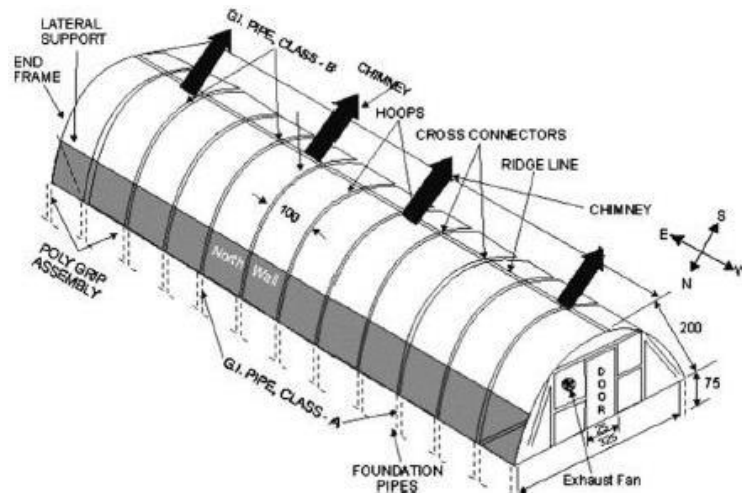


Figure 38. Une illustration du séchoir tunnel solaire à convection naturelle, Rathore et Panwar, 2010.

Une nouvelle approche a été introduite pour utiliser le rayonnement solaire comme principale source d'énergie pour le séchage du paddy. Un banc d'essai de séchage a été conçu, fabriqué et évalué. Le séchoir solaire pour riz brut était un type à flux transversal, à mode mixte actif avec un nouveau système de décharge semi-continu efficace assisté par minuterie. La configuration expérimentale comprend six aérothermes solaires ordinaires, un canal de chauffage électrique auxiliaire, une chambre de séchage avec une vanne de décharge électriquement rotative et un système de distribution d'air (Figure 40). La superficie de chaque collecteur était de 2 m^2 (totalement 12 m^2) et ils ont été installés sur un châssis léger incliné à 45° vers le sud. Le système de séchage comprenait un bac d'entrée, une chambre de séchage terminée par une vanne de décharge, un bac de sortie et une chambre de plénum. Au fond du lit du séchoir, une vanne rotative électromécanique a été installée, contrôlée par une minuterie qui active la vanne rotative pour qu'elle fonctionne occasionnellement pour décharger le lit de séchage en semi-continu [66].

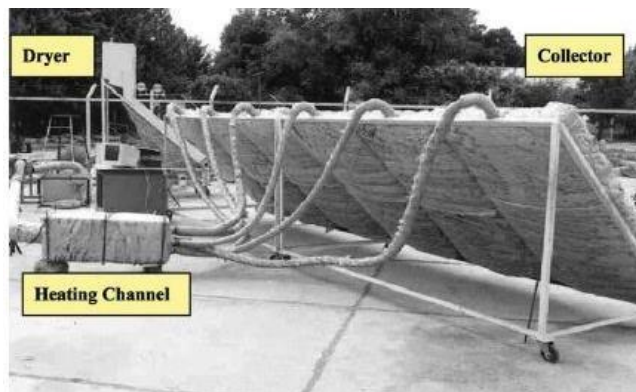


Figure 39. Nouveau système de séchage de type mixte actif semi-continu (six aérothermes solaires, canal de chauffage, conduits d'air, ventilateur et sécheur, Zomorodian et al 2007. La première expérience a été menée avec deux facteurs : le débit massique (trois niveaux) et

l'intervalle de temps de décharge (deux niveaux). Deuxièmement, l'expérience a été menée avec trois facteurs : la teneur en humidité de différents endroits sur le lit du sécheur (quatre niveaux), le débit massique (trois niveaux) et l'intervalle de temps de décharge (deux niveaux). La capacité du sécheur, l'efficacité des collecteurs et l'efficacité globale du système de séchage ont été évaluées. L'efficacité globale maximale du système de séchage était de 21,24% (avec une température moyenne de l'air de séchage de 55 ° C) et la fraction d'énergie consommée par le canal de chauffage auxiliaire pendant le processus de séchage par rapport à l'énergie solaire n'était que de 6 à 8%. La capacité maximale du séchoir était d'environ 132 kg de riz brut avec initialement 27% de p.b. jusqu'à 13% d.b. teneur finale en humidité en 3 h de séchage. un séchoir à convection forcée à assistance solaire a été mis au point pour la déshydratation des tranches d'oignon pour des conditions contrôlées de température de l'air de séchage et des débits d'air similaires à ceux utilisés dans la déshydratation commerciale des oignons (figure 41). Le sécheur facilitait la recirculation de l'air d'échappement. L'énergie totale requise pour le séchage des tranches d'oignon augmentait avec l'augmentation du débit d'air et diminuait avec l'augmentation de la température de l'air de séchage.

Pour le séchage des tranches d'oignon d'une teneur en humidité initiale d'environ 86% (wb) à une teneur en humidité finale d'environ 7% (wb), l'énergie totale requise par unité de masse d'eau variait entre 23,548 et 62,117 MJ / kg sans recirculation d'air.

La contribution énergétique en pourcentage du réchauffeur d'air solaire, du réchauffeur électrique et du ventilateur aux besoins énergétiques totaux variait entre 24,5% et 44,5%, 41,0% et 66,9% et 8,6% et 16,3%, respectivement [67]. Les performances d'un séchoir solaire à convection forcée indirecte intégré à un dessinant ont été également étudiées. Il a été utilisé pour sécher les pois verts et les tranches d'ananas avec et sans miroir réfléchissant (figure 42) [52].

L'inclusion d'un miroir réfléchissant sur le lit de desséchant a considérablement augmenté le potentiel de séchage. Une élévation de température d'environ 10°C a été obtenue avec un miroir. Il a réduit le temps de séchage de 2 h et 4 h respectivement pour les pois verts et l'ananas. L'efficacité de ramassage, la vitesse de séchage et l'efficacité thermique moyenne du séchoir étaient relativement plus élevées que celles du séchage solaire et du séchage intégré par desséchant. Un séchage uniforme dans tous les plateaux a été obtenu avec une bonne qualité en termes de couleur et de dégradation microbologique, par rapport au séchage solaire. Le goût de l'ananas séché était satisfaisant. Le matériau déshydratant était stable même après un fonctionnement continu pendant plus d'un an.

Il réduit le temps de séchage et améliore la qualité du produit séché. Le séchage du poivron rouge a été étudié en plein soleil et dans des conditions de séchage en serre (figure 43). L'expérience a été réalisée à l'intérieur d'une soufflerie où le rayonnement solaire était simulé par une lampe de 1000 W pour différents paramètres externes (rayonnement incident, température et vitesse de l'air). La teneur en humidité et le temps de séchage ont été déterminés. Il a été observé que le modèle de laboratoire surestime le processus de séchage dans des conditions variables dans le temps. Le facteur de correction a été introduit pour ajuster ces prévisions. Pour cela, la cohérence du modèle, le coefficient de détermination et le chi carré réduit ont été utilisés. Les résultats expérimentaux de ces tests ont confirmé la cohérence du modèle en laboratoire dans des conditions constantes et en plein soleil et en serre [68].

Un séchoir tunnel solaire à convection forcée de type mixte a été développé. Il a été appliqué sur des piments secs rouges et verts dans les conditions météorologiques tropicales du Bangladesh (Figure 44). Le séchoir avait une capacité de chargement de 80 kg de piments frais. La teneur en humidité du piment rouge a été réduite de 2,85 à 0,05 kg kg⁻¹ (d.b.) en 20 h dans un séchoir à tunnel solaire. Cependant, il a fallu 32 h pour réduire la teneur en humidité à 0,09 et 0,40 kg kg⁻¹ (d.b.) dans les méthodes de séchage au soleil améliorées et conventionnelles, respectivement.

Dans le piment vert, une teneur en humidité d'environ 0,06 kg kg⁻¹ (d.b.) a été obtenue à partir d'une teneur en humidité initiale de 7,6 kg kg⁻¹ (d.b.) en 22 h dans un séchoir tunnel solaire [69].

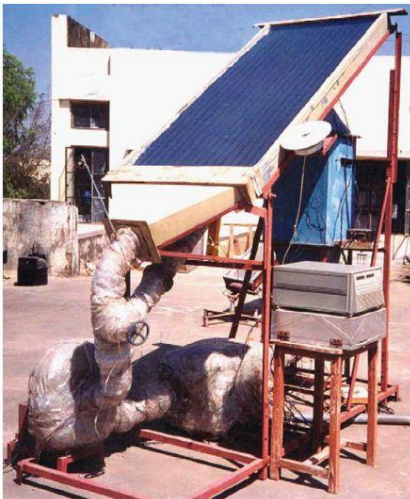


Figure 40. Séchoir solaire, Sarsavadia.

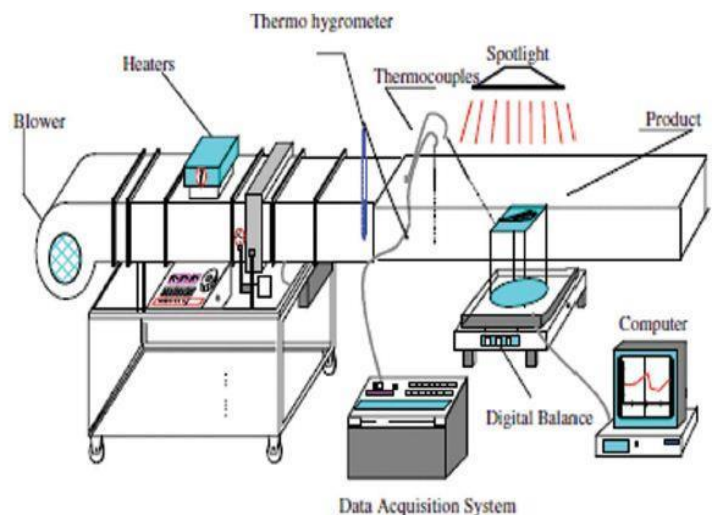


Figure 41. Installation expérimentale de laboratoire, Kooli et al 2007.

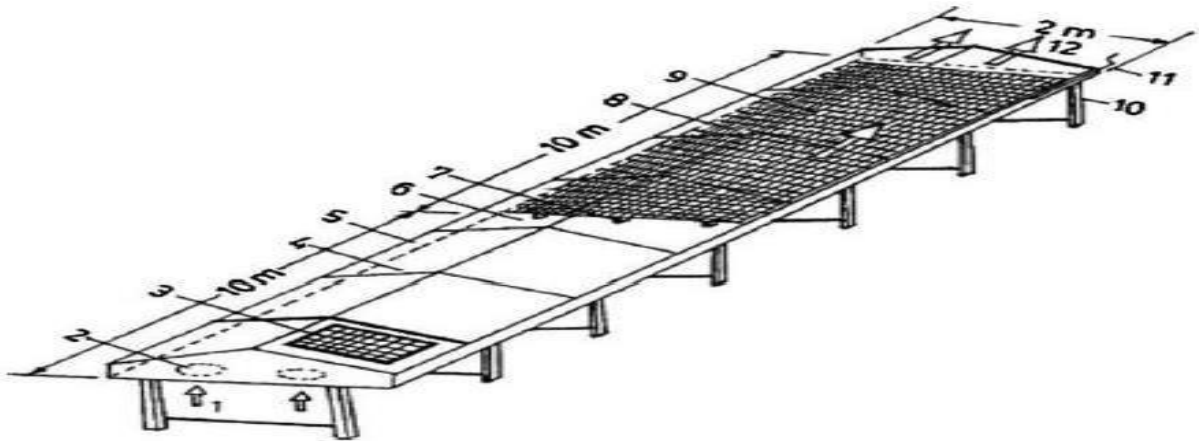


Figure 42. Sécheur solaire à tunnel : (1) entrée d'air ; (2) ventilateur ; (3) module solaire ; (4) capteur solaire ; (5) structure métallique latérale ; (6) Sortie du collecteur ; (7) support en bois ; (8) filet en plastique ; (9) structure de toit pour couvercle en plastique ; (10) structure de base pour supporter le séchoir tunnel ; (11) barre de roulement ;



Figure 43. Vue picturale du dispositif expérimental, Shanmugam et Natarajan,

Il faudrait 35 h pour atteindre la teneur en humidité à 0,10 et 0,70 kg kg⁻¹ (d.b.) dans les méthodes de séchage au soleil améliorées et conventionnelles, respectivement. Le séchoir tunnel solaire a été recommandé pour le séchage des piments rouges et verts.



Figure 44. Vue picturale du séchoir solaire à effet de serre.

Une enquête expérimentale a été menée pour tester un nouveau séchoir solaire à flux forcé (Figure 45) à l'Université Kun Shan, Tainan, Taiwan ; Il se composait d'un aérotherme solaire et d'une chambre de séchage. Les chips de banane ont été séchées dans le système actuel. La teneur en humidité des chips de banane a diminué de 75–85% à 7–8%. L'efficacité thermique du sécheur était de 30,86% pendant les 5 jours de 9 h à 16 h. Ce sécheur solaire a fourni une meilleure qualité et une période de séchage plus courte [70].

Un séchoir à effet de serre hybride photovoltaïque (PV / T) d'une capacité de 100 kg a été conçu et développé, (figure 46). Ce sécheur a été utilisé pour sécher les raisins sans pépins de Thompson (Mutant : Sonaka).

Dans ce système, un ventilateur CC fonctionnait pour la convection en mode forcé. Diverses données d'essais expérimentaux horaires, à savoir l'humidité évaporée, les températures de surface du raisin, la température et l'humidité de l'air ambiant, la température et l'humidité de l'air de serre, etc., ont été enregistrées pour évaluer le transfert de chaleur et de masse pour le système proposé. Il a été constaté que la valeur du coefficient de transfert de chaleur convectif pour les raisins (GR-I) se situe entre 0,26 et 0,31 W / m² K pour la serre et 0,34-0,40 W / m²

K pour les conditions ouvertes et pour les raisins (GR-II) se situe entre 0,45 et 1,21 W / m² K pour la serre et 0,46–0,97 W / m² K pour les conditions ouvertes. Sreekumar, Manikantan et Vijayakumar (2008) ont développé et testé un nouveau type de séchoir solaire efficace, particulièrement destiné au séchage des légumes et des fruits. Le sécheur a deux compartiments : l'un pour collecter le rayonnement solaire et produire de l'énergie thermique et l'autre pour répandre le produit à sécher (Figure 47). Des dispositions ont été prises pour absorber le maximum de rayonnement solaire par la plaque absorbante. Le produit a été chargé

sous la plaque absorbante, ce qui a évité le problème de décoloration dû à l'irradiation par la lumière directe du soleil. Deux ventilateurs à flux axial ont été fournis dans ce prototype de déshumidificateur déshydratant / collecteur intégré monté sur le bac de récolte. Il a été testé au Kenya (jour / nuit). Le séchoir avait six plateaux perforés pour charger le matériau. La plaque absorbante du sécheur a atteint une température de $97,2^{\circ}\text{C}$, lorsqu'elle a été étudiée dans des conditions à vide. La température maximale de l'air dans la sécheuse, dans ces conditions, était de $78,1^{\circ}\text{C}$. Le séchoir a été chargé avec 4 kg de courge amère ayant une teneur initiale en humidité de 95%, et la teneur en humidité finale souhaitée de 5% a été atteinte en 6 h sans perdre la couleur du produit, alors qu'elle était de 11 h pour le séchage au soleil.



Figure 45. Séchoir à effet de serre intégré photovoltaïque-thermique (PV / T) hybride.

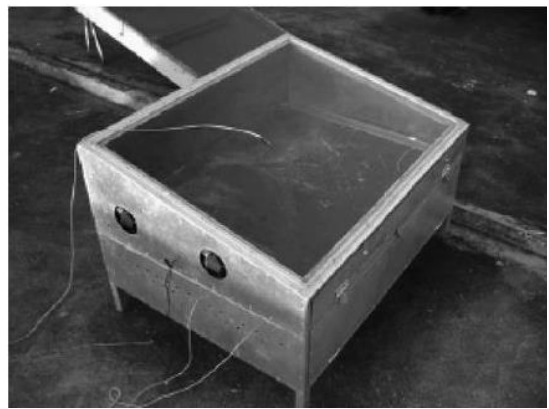


Figure 46. Photographie du séchoir solaire, Sreekumar et al 2008.

Le vitrage des capteurs était incliné selon un angle particulier, adapté à l'emplacement, pour l'absorption du rayonnement solaire maximal. La qualité du produit séché dans le séchoir solaire était compétitive par rapport aux produits de marque disponibles sur le marché. 40, 50 et 60 ° C pour une fine couche de gel [71].

L'effet de la température de l'air et du débit d'air sur la cinétique de séchage de *Gelidium Sesquipedale* dans le séchage solaire par convection a été étudié. Dans ce cas, le processus de séchage a été conduit en utilisant un sécheur solaire à convection forcée indirecte (Figure 48). Il contenait un collecteur d'air solaire, un chauffage d'appoint, un ventilateur de circulation et une armoire de séchage. Ce séchage a été réalisé à 40, 50 et 60 ° C pour une fine couche de *Gelidium Sesquipedale*.



Figure 47. Photographie d'un séchoir solaire de laboratoire, *Gelidium sesquipedale*, 2008.

L'humidité relative avait varié de 50% à 57%, et le débit d'air de séchage variait de 0,0277 à 0,0833 m³ / s. Le processus de séchage solaire du *Gelidium Sesquipedale* s'était produit pendant la période de baisse du taux. Par conséquent, il a été conclu que le principal facteur influençant la cinétique de séchage était la température de l'air de séchage [72].

Un séchoir solaire à convection forcée a été conçu, fabriqué et testé (figure 49) pour le séchage du coprah dans des conditions climatiques indiennes. Dans celui-ci, le séchoir solaire était constitué d'un aérotherme solaire à plaques plates d'une superficie de 2 m² relié à une chambre de séchage. L'espace entre le verre et la surface de l'absorbeur a été maintenu et connecté à un ventilateur centrifuge de 0,75 KW (1 HP) avec un débit d'air jusqu'à 300 m³ h⁻¹ et l'autre côté avec une chambre de séchage. La section divergente a été prévue à l'entrée du réchauffeur d'air solaire pour une circulation uniforme de l'air sur la surface de l'absorbeur. L'aérotherme s'incline à un angle d'environ 25 ° par rapport à l'horizontale, ce qui est considéré comme un angle optimal pour la performance du système toute l'année à Podlachie, en Inde. Le système a été réglé pour faire face

au sud pour maximiser le rayonnement solaire incident sur le capteur solaire. Sur la base de l'observation, Pollachi (latitude de 10,39°N, longitude de 77, 03°E), où l'expérience a été menée, avait environ 11 h 30 min de lumière du jour, avec généralement environ 8 h par jour d'ensoleillement disponible pour le séchage [73].

Le coprah de séchage dans le séchoir a réduit sa teneur en humidité d'environ 51,8% à 7,8% et 9,7% en 82 h pour les plateaux en bas et en haut, respectivement. Le coprah était classé à 76% de coprah fraisage (MCG1), 18% (MCG2) et 6% (MCG3) selon le Bureau of Indian Standards (BIS : 6220-1971).

L'efficacité thermique du séchoir solaire était estimée à 24%.

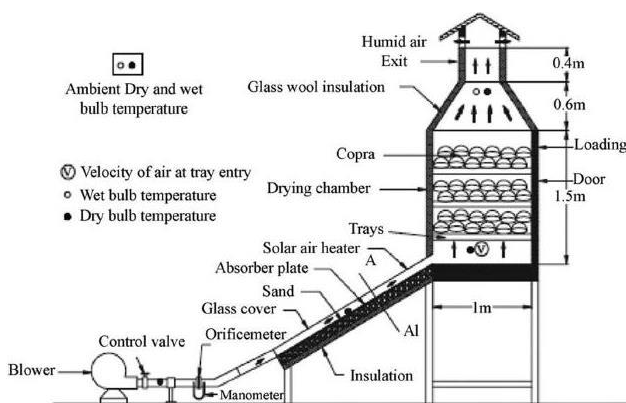


Figure 50. Système de séchage solaire pour le séchage du coprah, Mohanraj et Chandrasekar, 2008.

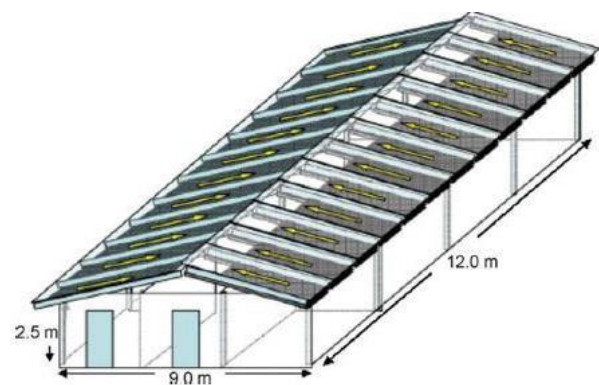


Figure 49. Une illustration du système de séchage solaire intégré au toit, Janjaia et al 2008.

Des performances expérimentales de séchage solaire de la fleur de rosella et du piment à l'aide d'un séchoir solaire intégré au toit ont été présentées (figure 50). Le séchage dans le séchoir solaire intégré au toit a permis de réduire considérablement le temps de séchage par rapport à la méthode traditionnelle de séchage au soleil. Le produit sec est un produit sec de qualité par rapport aux produits de qualité sur les marchés. La période de récupération du séchoir solaire intégré au toit est d'environ 5 ans. Ce sécheur se compose d'un capteur solaire intégré au toit et d'un bac de séchage avec un ventilateur à flux axial actionné par un moteur électrique (220 V, monophasé, 0,373 kW) pour fournir le débit d'air requis. Bac relié au milieu du collecteur par un conduit d'air de type T. Le capteur intégré au toit contient deux réseaux de capteurs : l'un exposé au sud et l'autre au nord d'une superficie totale de 108 m².

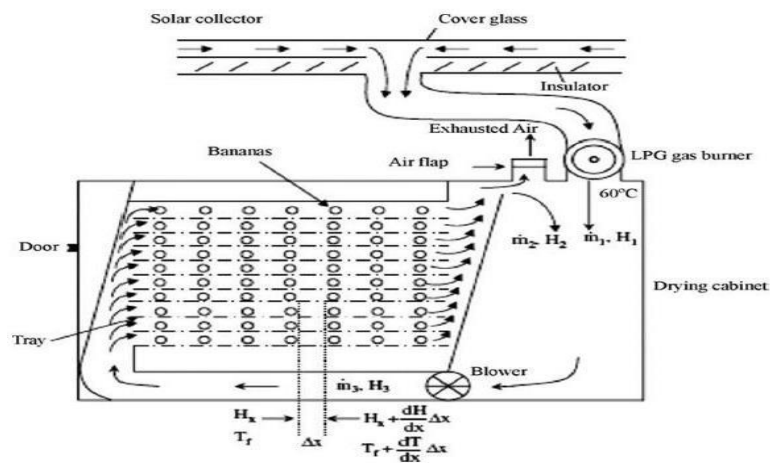


Figure 48. Système de séchage solaire, Smitabhindu et al 2008.

Le collecteur intégré au toit est un noir isolé toit peint servant d'absorbeur, qui était recouvert d'une plaque en polycarbonate. Le bâtiment a été divisé en un espace pour le bac de séchage et un autre pour deux pièces supplémentaires. La première salle du bâtiment servait à la préparation du produit à sécher et la seconde au stockage des produits séchés [74].

Un système de séchage a été développé, il se compose de deux parties principales, à savoir : (1) le capteur solaire et (2) l'armoire de séchage (Figure 51). Le capteur solaire était installé sur le toit du bâtiment de séchage et l'armoire de séchage était à l'intérieur du bâtiment. Le capteur solaire contenait un isolant arrière en polyuréthane et une vitre de protection. Il y avait un espace d'air entre le couvercle en verre et l'isolant, dans lequel l'air ambiant était aspiré des deux extrémités des toits à travers les collecteurs.

L'air était aspiré au milieu du collecteur et alimenté dans l'armoire de séchage avec une source de chaleur auxiliaire utilisant un brûleur à gaz GPL. . En cela, chaque partie du collecteur a été conçue avec un concept modulaire. Les parties du collecteur telles que l'isolation et le verre de protection étaient de forme modulaire afin de pouvoir facilement se transporter et se connecter les unes aux autres.

L'armoire de séchage était de type plateau et peut accueillir 15 plateaux en piles avec une surface de séchage totale de 8 m² et la dimension d'un plateau était de 1 m × 2 m × 1,5 m. L'armoire de séchage avait été spécialement conçue de telle sorte que l'air chaud était guidé pour circuler parallèlement à travers les produits placés dans les plateaux dans les piles.

Cette conception avait l'avantage que les températures de l'air dans l'armoire étaient uniformes. L'air ambiant a été préchauffé par le capteur solaire. Il était aspiré par un ventilateur électrique et de la chaleur supplémentaire si nécessaire, était fournie par un brûleur à gaz GPL. Ensuite, de l'air chaud a été fourni à l'armoire [75].



Figure 51. Configuration expérimentale du sécheur solaire en mode mixte, Tripathy et Kumar, 2009.

Une analyse énergétique qui a été utilisée a été étudiée pour prédire les poisons température de surface, température de l'air ambiant de la serre et humidité évaporée pendant séchage en serre de crevettes dans des conditions de convection naturelle et forcée.

L'estimé les valeurs montraient des concordances justes avec les valeurs expérimentales (Coefficient de corrélation, $r = 0,94-0,99$; écart quadratique moyen en pourcentage, $e = 2,4-10\%$) [60]. l'influence de la géométrie des échantillons et de la température de réhydratation sur la qualité caractéristiques de la pomme de terre séchée a été étudié dans le séchage solaire en mode mixte et le séchage au soleil ouvert. Des expériences ont été réalisées à 40° , 50° et 60° C avec des échantillons de pommes de terre séchés simultanément sous un séchoir solaire à mode mixte et un séchage au soleil ouvert. Il a été constaté que la capacité d'absorption d'eau du produit séché est principalement affectée par la température de réhydratation, suivi de la géométrie de l'échantillon et de la méthode de séchage.

Il a été constaté que les deux échantillons cylindriques et le séchage solaire en mode mixte montrent des valeurs plus élevées des indices de réhydratation proposés, une meilleure rétention de la couleur pendant le séchage et une plus grande dureté de la texture [61]. Un séchoir à effet de serre solaire à grande échelle avec une capacité de chargement de 1000 kg de fruits ou légumes a été développé et testé sur le terrain.

Il était recouvert de feuilles de polycarbonate. La base du séchoir est un sol en béton noir d'une superficie de $7,5 \times 20,0$ m². Trois modules de cellules solaires de 50 W alimentaient neuf ventilateurs CC et ont été utilisés pour ventiler le sécheur. Il est régulièrement utilisé pour sécher le piment, la banane et le café. Pour évaluer les performances expérimentales du sécheur, la température de l'air, l'humidité relative de l'air et la teneur en humidité du produit ont été mesurées. Les 1000 kg de banane avec une teneur initiale en humidité de 68% (pds) ont séché en 5 jours. Cependant, 7 jours ont été nécessaires pour un séchage naturel au soleil avec les mêmes conditions météorologiques et la même quantité [77].

Chapitre III:

Résultats & Discussion

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier d'une façon théorique la température qui atteint la surface d'ouverture de le récepteur et dans la chambre de séchage et le teneur d'eau dans le produit à sécher (Menthe), ainsi que l'influence de certains paramètres sur sa variation.

Après, on commence la phase de validation de nos calculs par des valeurs mesurés pendant un intervalle de temps s'étalant de 9 :45 h à 12 h45 , Le mardi 06 octobre 2020.

1. Variation de la teneur en eau en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

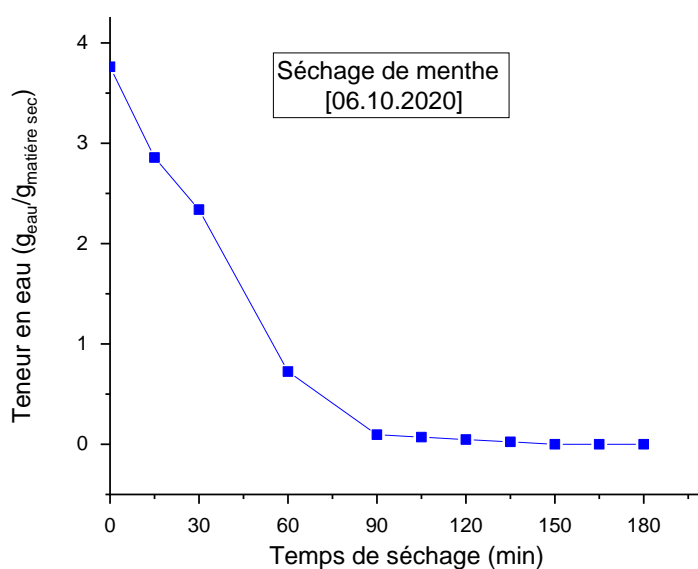


Figure .1 : Variation de la teneur en eau en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

La figure 1 montre la variation de la teneur en eau en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe, la diminution de la teneur en eau au fil du temps dans les feuilles de menthe séchées de 3,76 (g_{eau}/g_{MS}) à 0 (g_{eau}/g_{MS}) en 180 minutes, La diminution de masse a été rapide au début de l'expérience et cela est normal pour la présence d'eau dans la couche externe du produit, Après cela elle ralentissement en raison de la difficulté

extraction d'eau de l'intérieur du produit.

2. Variation des températures (ambiante, entre, milieu et sorte de la chambre) en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

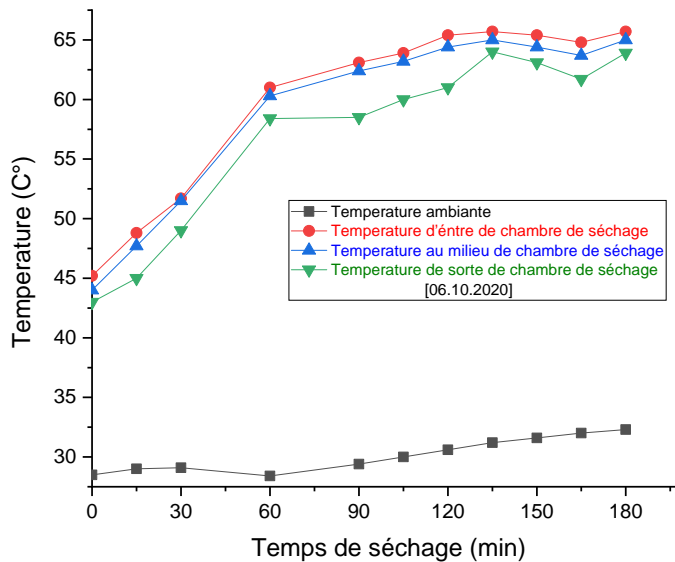


Figure .2 : Variation des températures (ambiante, entre, milieu et sorte de la chambre) en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

La figure 2 montre les différentes températures de la chambre de séchage, en plus de la température ambiante, il y a une harmonie dans les résultats, ce qui est très apprécié par l'amélioration que nous avons apportée à la chambre de séchage, la température d'entrée était supérieure à la température chambre et la température chambre était supérieure à la température de la cheminée.

3. Variation de la radiation solaire et température de récepteur en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

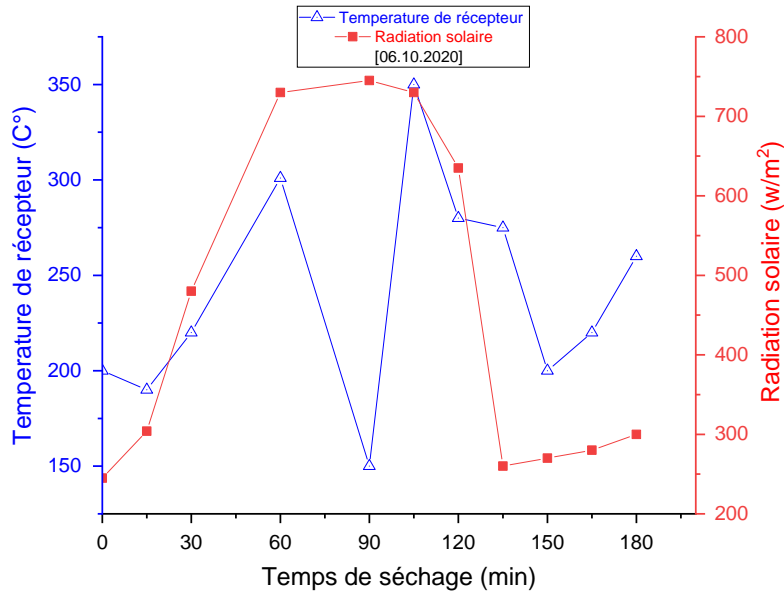


Figure .3 : Variation de la radiation solaire et température de récepteur en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

La figure 3 montre l'évolution de la température du récepteur et de l'intensité du rayonnement solaire en fonction de temps, La température du récepteur varie entre 150 C° comme valeur minimale et 350 C° comme valeur maximale, tandis que le rayonnement solaire varie entre 250 W/m² et 750 W/m², La courbe de température du récepteur n'était pas au niveau requis en raison de deux facteurs, à savoir l'absence du système de poursuite, qui peut être le rayonnement solaire à son apogée et la température du récepteur est faible en raison du manque de concentration de tous les rayons et des nuages qui passent en raison de celui-ci la température du récepteur et le rayonnement solaire sont réduits.

4. Variation de l'humidité de produit en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

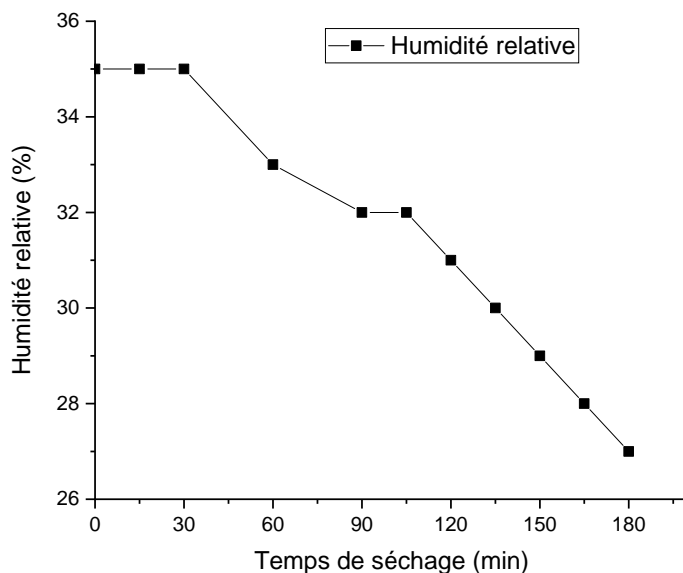


Figure .4 : Variation de l'humidité de produit en fonction de temps de séchage pour les feuilles de menthe

La figure 4 montre la diminution de l'humidité du produit en fonction de temps. Le comportement du produit selon la décroissance d'humidité dans le cas idéal. On remarque la stabilité de la valeur d'humidité dans la première demi-heure en raison de la disponibilité d'humidité dans la couche externe du produit.

Conclusion :

Selon les résultats obtenus à partir de l'expérience de séchage de menthe pour évaluer l'amélioration que nous avons apportée à la chambre de séchage, cela est considéré comme acceptable en termes d'isolation de la chambre, mais si nous montée sur le séchoir un système de poursuite, les résultats seraient meilleurs.

Conclusion

Générale

Il ressort de notre étude que l'outil d'aide à la décision conçu est assez pratique et permettra une meilleure utilisation des séchoirs solaires. Cependant, il faut sensibiliser les différents utilisateurs sur l'importance du séchage solaire qui demeure la meilleure alternative pour les pays à fort ensoleillement comme l'Algérie.

Avec le protocole de caractérisation proposé, les séchoirs solaires présents pourront servir au suivi de la cinétique de séchage du produit introduit ; des conclusions peuvent alors être obtenues sur les différents types et phases de séchage.

Nos principales recommandations sont les suivantes :

- Approfondir l'outil d'aide à la décision en intégrant les teneurs en eau initiales et finales des produits à sécher (après avoir réalisé des expériences) en présentant les différents types de séchoirs.
- Poursuivre les recherches sur les éléments caractéristiques d'un séchoir solaire dans le but d'avoir de meilleurs résultats (en chiffres illustratifs) sur la caractérisation.

En Algérie, nous préconisons de se munir de plus d'équipements pour caractériser ses séchoirs. Ces derniers peuvent être des étuves pour déterminer les masses sèches des produits, des anémomètres pour mesurer la vitesse du vent à l'entrée des séchoirs et des outils pour avoir l'humidité des produits. Nous leur conseillons également de disposer d'une balance à proximité du lieu de séchage pour qu'ils ne prennent pas de l'humidité lors des pesées régulières tout au long du séchage.

Résumé :

En cette ère d'efficacité énergétique et d'énergie propre, le séchage par énergie solaire est d'un grand intérêt. Ce procédé réduit considérablement l'eau contenue dans les produits et ainsi, l'activité des microorganismes au sein de ces produits ; ces derniers pourront alors être mieux conservés.

Ce travail est axé sur deux grands points : d'une part l'élaboration d'un outil d'aide à la décision permettant un choix de séchoir solaire pertinent selon le besoin de l'utilisateur, et d'autre part, la proposition d'un protocole de caractérisation des séchoirs solaires. Ce dernier point fait ressortir les différents tests effectués afin d'affirmer l'efficacité d'un séchoir, il éclaire également le lecteur sur les outils utilisés et leur finalité sur les différents types de séchoirs solaires.

Le principal objectif visé par cette étude est d'avoir en toute période de l'année, des différents types de séchoir et de séchage solaire. L'Algérie pourra alors être classée au rang des pays exportateurs de produits séchés de qualité incomparable.

ملخص :

شهد هذا العصر كفاءة في الطاقة النظيفة، والتجفيف بالطاقة الشمسية يعتبر ذو أهمية كبيرة، كونه يقلل بشكل كبير من المياه الموجودة في المنتجات وبالتالي نشاط الكائنات الحية الدقيقة داخل هذه المنتجات؛ ويمكن بشكل جيد من الحفاظ هذه الحفاظ عليها و على خصائصها.

وتركز هذه الدراسة على نقطتين رئيسيتين: تطوير أدوات تسمح باختيار مجففات شمسية ذات صلة وفقاً لحاجة المستخدم، واقتراح بروتوكول لتوصيف المجففات الشمسية. هذه النقطة الأخيرة تسلط الضوء على مختلف الاختبارات التي أجريت من أجل تأكيد فعالية المجفف الشمسي، كما يوضح في هذا البحث على الأدوات المستخدمة والغرض منها.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو التعرف والحصول على أنواع مختلفة من مجفف الطاقة الشمسية في أي وقت من السنة. و هو ما يمكن من تصنيف الجزائر كمصدر لمنتجات مجففة لا تضاهي جودتها باعتبارها تملك طاقة شمسية مهمة.

Bibliographies

- [1] **BELAID**, WAHIBA. Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire. 2014. PhD Thesis.
- [2] Définitions lexicographiques et étymologiques de « séchage » du *Trésor de la langue française informatisé*, sur le site du *Centre de ressources textuelles et lexicales*.
- [3] **BOUGHALI**, Slimane. Étude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. PhD Thesis. Université de Batna/ N.Chalal, Étude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine (2007).
- [4] Boukadoum née Boulemta fes Amel, Le séchage solaire des produits agricoles, Attachée de Recherche, Projet Séchage solaire, Équipe Systèmes Solaires à Basses températures, Division Énergie Solaire Thermique et Géothermie
- [5] wikipedia l'encyclopédie libre. Séchage. [03 février 2015].<http://fr.wikipedia.org/wiki/Séchage2015>].
- [6] **Sandali Massoud**, Thème: Étude dynamique ET Thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux, Mémoire de Magister. Faculté de Technologie, Université Abou-Baker Belkaid-Tlemcen, spécialité Énergétique, option Dynamique Des Transferts 2013/2014.
- [7] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés, Séchage, Théorie et calculs. Par André Charreau et Roland Cavallé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [8] M. Daguénet : Les séchoirs solaires : théorie et pratique, 1985.
- [9] **Croûtage** : formation d'une pellicule sèche autour du produit ou des particules qui le constituent, cette pellicule s'opposant au transfert d'humidité vers le milieu extérieur.
- [10] Adnan Midilli, & Haydar Kucuk, 2003.
- [11] Doymaz, 2007, [51], et L. Ait Mohammed, 2006,
- [12] M. Kouhila, 2001.
- [13] H. Communay «Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs» Groupe de Recherche et D'édition, France (2002).12.
- [14] Boussalia **Amar**. Thème : Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Mémoire de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Mentouri-Constantine, option Génie Climatique 2009/2010.
- [15] Ounis **Med Lamdjed, Bessei Med Taher, Bouhanna El Bachir**. Thème : contribution à l'amélioration énergétique d'un séchoir solaire hybride utilisant l'apport d'énergie par cellules photovoltaïques. Mémoire d'ingénieur d'état, Faculté des sciences et technologies et

science de la matière, Université Kasdi Merbah-Ouargla. Spécialité Génie Mécanique, option Énergétique 2010/2011.

[16] Shove, G.C. 1977. Solar energy collectors for drying grain. *Proceedings of the solar grain drying conference*, 34–8.

[17] Peterson, W.H., and Bin Sidewall Sollectors. 1977. In *Proceedings of the solar grain drying conference, 11–12 January*, Urbana Champaign, IL, éd. G.C. Shove, 78–89. St. Joseph, MI : American Society of Agricultural Engineers.

[18] Johnson, P.D.A., and L. Otten. 1980. Solar-assisted, low temperature corn drying in southern Ontario. *Canadian Agricultural Engineering* 22(1) :29–34.

[19] Keener, H.M., M.A. Sabbah, G.E. Meyer, and W.L. Roller. 1977. Plastic film solar collectors for grain drying. In *Proceedings of the solar grain drying conference, January 11–12*, Urbana-Champaign, IL, ed. G.C. Shove, 56–77. St. Joseph, MI : American Society of Agricultural Engineers.

[20] Duffie, J.A., and W.A. Beckman. 1974. *Solar energy thermal processes*. New York, NY : Wiley, 386.

[21] Daniels, F. 1977. *Direct use of the sun's energy*. New York, NY : Ballantine, 271.

[22] Sodha, M.S., A. Dang, P.K. Bansal, and S.B. Sharma. 1985. An analytical and experimental study of open sun drying and a cabinet type drier. *Energy Convers Manage* 25(3) :263–71.

[23] Ezeike, G.O.I. 1986. Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system. *Energy in Agriculture* 5:1–20.

[24] Othieno, H., W. Grainger, and J.W. Twidell. 1981. Application of small-scale solar crop dryers to maize drying in Kenya. *Proceedings of the 2nd Conference on energy for rural & island communities*, Inverness, UK, 377–86.

[25] Grainger, W. 1982. Small-scale solar crop dryers for tropical village use. PhD diss., University of Strathclyde, UK.

[26] Othieno, H. 1983. Multilayer solar air heater and the development of small scale solar maize dryer for village use in Kenya. PhD diss. University of Strathclyde, UK.

[27] Saulnier, B. 1976. Survey of solar agricultural dryers. *Joint Conference of the American Section of the International Solar Energy Society and the Solar Energy Society of Canada, Inc.*, 17:7–21.

[28] Lawand, T.A. 1977. The potential of solar agricultural dryers in developing areas. *UNIDO Conf 5, Tech for Solar Energy Utilization*, 125–32.

[29] Kilkis, B. 1981. Solar-energy assisted crop and fruit drying systems: Theory and applications. In *Proceedings of the seminar on energy conservation & use of solar and other*

- renewable energies in bio-industries*, ed. F. Vogt, London : Polytechnic of Central London, 307–33.
- [30] Ezekwe, C.I. 1981. Crop drying with solar air heaters in tropical Nigeria. *Proceedings of the ISES, Solar World Forum*, Brighton, UK, 997–1005. Oxford : Pergamon Press.
- [31] Das, S.K., and Y. Kumar. 1989. Design and performance of a solar dryer with vertical collector chimney suitable for rural application. *Energy Convers Manage* 29(2):129–35.
- [32] Pande, P.C., and K.P. Thanvi. 1991. Design and development of a solar dryer cum water heater. *Energy Convers Manage* 31(5) :419–24.
- [33] Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy* 59(4/6) :121–6.
- [34] Ekechukwu, O.V., and B. Norton. 1999. Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Convers Manage* 40(6):615–55.
- [35] Ampratwum, D.B. 1998. Evaluation of a solar cabinet dryer as an air-heating system. *Applied Energy* 59(1) :63–71.
- [36] Nijmeh, M.N., A.S. Ragab, M.S. Emeish, and B.A. Jubran. 1998. Design and testing of solar dryers for processing food wastes. *Applied Thermal Engineering* 18:1337–46.
- [37] El-Sebaili, A.A., S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, and H.G. El-Gohary. 2002. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Convers Manage* 43:2251–66.
- [38] Pangavhane, D.R., R.L. Sawhney, and P.N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 27:579–90.
- [39] Enibe, S.O. 2002. Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renew Energy* 27:69–86.
- [40] Condorí, M., and L. Saravia. 2003. Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse drier. *Renewable Energy* 28:467–85.
- [41] Singh, S., P.P. Singh, and S.S. Dhaliwal. 2004. Multi-shelf portable solar dryer. *Renew Energy* 29:753–65.
- [42] Arata, A., and V.K. Sharma. 1991. Performance evaluation of solar assisted dryers for low temperature drying applications. I. Plants description. *Renew Energy* 1(5/6) :729–35.
- [43] Pawar, R.S., M.G. Takwale, and V.G. Bhide. 1995. Solar drying of custard powder. *Energy Convers Manage* 36:1085–96.
- [44] Tiris, C., M. Tiris, and I. Dincer. 1996. Experiments on a new small-scale solar dryer. *Applied Thermal Engineering* 16(2) :183–7.

- [45] Thoruwa, T.F.N., J.E. Smith, A.D. Grant, and C.M. Johnstone. 1996. Developments in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. In *World renewable energy congress*, ed. A.A.M. Sayigh, 686–9. Oxford, UK : Pergamon Press.
- [46] Sarsilmaz, C., C. Yildiz, and D. Pehlivi. 2000. Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy. *Renew Energy* 21:117–27.
- [47] Condori, M., R. Echazú, and L. Saravia. 2001. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renew Energy* 22:447–60.
- [48] Ivanova, D., and K. Andonov. 2001. Analytical and experimental study of combined fruit and vegetable dryer. *Energy Convers Manage* 42(8): 975–83.
- [49] Bala, B.K., M.R.A. Mondol, B.K. Biswas, B.L.D. Chowdury, and S. Janjai. 2003. Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renew Energy* 28:183–90.
- [50] Tiwari, G.N., S. Kumar, and O. Prakash. 2004. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jiggery. *Journal of Food Engineering* 63:219–27.
- [51] Jain, D. 2005. Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of Food Engineering* 71:170–8.
- [52] Shanmugam, V., and E. Natarajan. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering* 27:1543–51.
- [53] Kumar, A, and G.N. Tiwari. 2006. Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: An experimental validation. *Solar Energy* 80:1135–44. [54] Sacilik, K., R. Keskin, and A.K. Elicin. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering* 73:231–8.
- [55] Li, Z., H. Zhong, and R. Tang. 2006. Experimental investigation on solar drying of salted greengages. *Renew Energy* 31:837–47.
- [56] Mwithiga, G., and S.N. Kigo. 2006. Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *Journal of Food Engineering* 74:247–52.
- [57] Prasad, J., V.K. Vijay, G.N. Tiwari, and V.P.S. Sorayan. 2006. Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale. *Journal of Food Engineering* 75:497–502.
- [58] Madhlopa, A., and G. Ngwalo. 2007. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. *Solar Energy* 81:449–62.
- [59] Prasad, J., A. Prasad, and V. K. Vijay. 2007. Studies on the drying characteristics of

- zingiber officinale under open sun and solar biomass (hybrid) drying. *International Journal of Green Energy* 3:79–89.
- [60] Tripathy, P.P., and S. Kumar. 2009a. Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *International Journal of Thermal Sciences* 48:1452–9.
- [61] Ganguly, A., and S. Ghosh. 2009. Model development and experimental validation of a floriculture greenhouse under natural ventilation. *Energy and Buildings* 41:521–7.
- [62] Ronoh, E.K., C.L. Kanali, J.T. Mailutha, and D. Shitanda. 2010. Thin layer drying kinetics of Amaranth (*Amaranthus cruentus*) grains in a natural convection Solar Tent dryer. *African Journal of Food Agriculture, Nutrition and Development* 10(3) :2218–2233.
- [63] Rathore, N.S., and N.L. Panwar. 2010. Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. *Applied Energy* 87: 2764–7.
- [64] Al-Juamily, K.E.J., A.J.N. Khalifa, and T.A. Yassen. 2007. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Desalination* 209:163–70.
- [65] Zomorodian, A., D. Zare, and H. Ghasemkhani. 2007. Optimization and evaluation of a semi continuous solar dryer for cereals (Rice, etc.). *Desalination* 209:129–35.
- [66] Sarsavadia, P.N. 2007. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renew Energy* 32:2529–47.
- [67] Kooli, S., A. Fadhel, A. Farhat, and A. Belghith. 2007. Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions Mathematical modeling and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 79:1094–1103.
- [68] Hossain, M.A., and B.K. Bala. 2007. Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy* 81:85–92.
- [69] Chen, C.R., A. Sharma, and H.X. Lam. 2007. Experimental thermal performance studies of a forced flow solar dryer. *Presented & published in vol. I, SOLARIS 2007, third international conference at IIT Delhi, New Delhi, India, 293–97.*
- [70] Barnwal, P., and G.N. Tiwari. 2008. Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study. *Solar Energy* 82:1131–44.
- [71] Mohamed, L.A., C.S.E. Kane, M. Kouhila, A. Jamali, M. Mahrouz, and N. Kechaou. 2008. Thin layer modelling of *Gelidium sesquipedale* solar drying process. *Energy Convers Manage* 49:940–6.
- [72] Mohanraj, M., and P. Chandrasekar. 2008. Drying of copra in a forced convection solar drier. *Biosystem Engineering* 99 :604–7.
- [73] Janjaia, S., N. Srisittipokakuna, and B.K. Bala. 2008. Experimental and modelling

- performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices. *Energy* 33:91–3.
- [74] Smitabhindu, R., S. Janjai, and V. Chankong. 2008. Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. *Renew Energy* 33:1523–31.
- [75] Tiwari, G.N., T. Das, C.R. Chen, and P. Barnwal. 2009. Energy and energy analyses of greenhouse fish drying. *International Journal of Exergy* 6(5):620–36.
- [76] Janjai, S.P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa. 2011. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of La People's Democratic Republic. *Renewable Energy* 36:1053–1062.
- [77] B . Nadine, *Fiche sur les différents types de séchoirs solaires à convection naturelle et forcée*, République Fédérale d'Allemagne, 2004.