

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur 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

Etude expérimentale comparative entre les deux
séchoirs solaires parabolique et cylindro -parabolique

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Dr. BOUKHARI Ali Président
MEGDOUD Soufiane Examinateur
LAOUINI Abdjalil Encadreur

- BERROUKECHE Ratmi
- BAOUIA Ahmed Rami

2018-2019

Remerciement

Nous remercions d'abord Dieu tout puissant de nous avoir donné la foi, l'amour et la force de faire ce travail.

Tous nos remerciements à notre encadreur Monsieur, LAOUNI Abdeldjalil, Rendre la gentillesse et la disponibilité et les choses plus faciles et son expérience et ses conseils était sans aucun doute nécessaire pour aider ce travail pendant la période de recherche, il n'a pas été possible de compléter les expériences sans l'aide de certains professeurs dans le département de mécanique et le département de l'électricité.

Un merci spécial aux boursiers dans le domaine des énergies renouvelables et de la spécialisation Énergétique

Dédicaces

*Je dédie mon""....."" à ma famille avec tous mes sentiments de respect,
d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés
pour m' élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleurs
conditions, à messans exception, pour leurs efforts afin de m'assurer
une formation ou bien stage ...solide.*

à tous mes amis ..

à tous les responsables de..

*Nous tenions à dédier set humble travail à nos familles et à tous ceux que
nous aimons pour leurs encouragements et leurs soutiens et à ceux qui ont veillé
à ce que ce travail soit à la hauteur*

*A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait
toujours les grands hommes...*

A mon Père.

*A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation... A ma
Mère.*

A tous mes amis et tous ceux qui me sont chers...

Que Dieu vous gard

Table des matières

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicaces</i>	
Table des matières	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Nomenclature	vii
I.1. Introduction Générale	1
I. Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du séchage	3
I.3. Théories descriptives du phénomène de séchage [5].	3
I.3.1. Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)	3
I.3.2. Théorie capillaire (1937).....	4
I.3.3. Théorie Whitaker (1977).....	4
I.3.4. Théorie de Luikov (1934)	5
I.3.5. Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938).....	5
I.3.6. Théorie de Philip et De Vries (1957)	5
I.4. Mécanisme de séchage : [2]	5
I.5. Les trois phases de séchage [2]:.....	6
I.6. Différents modes de séchage	7
I.7. Caractéristiques de l'air de séchage [10]	8
I.7.1. Humidité absolue (Arditti 1972).....	8
I.7.2. Humidité relative (Arditti 1972)	8
I.7.3. Degré de saturation (Arditti 1972).....	9
I.7.4. Températures caractéristiques de l'air humide : [11]	9

I.8. Caractéristiques des solides humides : [12]	10
I.8.1. Humidité absolue :	10
Teneur en eau à base humide	10
I.8.2. Taux d'humidité :	10
I.8.3. États de siccité :	11
I.8.4. Taux d'humidité à l'équilibre :	11
I.9. Les différents types des séchoirs solaires	11
I.9.1. Séchoirs solaires de type direct ou intégré :	11
I.9.2. Sécheurs solaires indirects ou distributifs :	13
I.9.3. Séchoirs solaires en mode mixte : [18]	15
I.9.4. Les séchoirs solaires hybrides :	16
I.10. Conclusion	18
II. Les collecteurs solaires thermiques:	19
II.1. Introduction	19
II.2. Collecteurs non concentrés :	19
II.2.1. Capteurs plans: [22]	19
II.2.2. Les captures solaires hybrides photovoltaïques thermiques PV/T : [21]	20
II.3. Collecteurs à concentration :	21
II.3.1. Système de centrale à tour (héliostat):	21
II.3.2. Concentrateurs paraboliques:	22
II.3.3. Concentrateurs cylindro-paraboliques:	24
II.4. Conclusion	28
III. Appareillage de mesure et protocole expérimental	28
III.1. Introduction :	28
III.2. Présentation les systèmes étudiés	28
III.2.1. Séchoirs solaires assistée par concentrateur parabolique	28

III.2.2. Séchoirs solaires cylindro- parabolique	32
III.3. Instrumentations de mesure.....	34
III.3.1. Mesure de la température	34
III.4. Préparation du produit.....	36
III.4.1. La tomate.....	36
III.5. Conclusion.....	38
IV. Résultats et discussions :.....	39
IV.1. Introduction :.....	39
IV.2. La tomate.....	40
IV.2.1. La variation de la masse de produit dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps	40
IV.2.2. Variation de teneur en eau à base sèche dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps	41
IV.2.3. Variation de la température des récepteurs en fonction de temps.....	42
IV.2.4. Variation de la température d'entre des chambres en fonction de temps	43
IV.2.5. Variation de la température de sortie des chambres en fonction de temps	44
IV.2.6. Variation de la température de la produit de séchoir en fonction de temps.....	45
IV.2.7. Variation de la humidité de entre des chambres en fonction de temps.....	46
IV.2.8. Variation de la humidité de sortie des chambres en fonction de temps.....	47
IV.2.9. Variation de la radiation solaire pour les journées 08/06/2019 de séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur parabolique et 12/06/2019 séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur cylindro-parabolique en fonction de temps.....	48
IV.3. Conclusions.....	49
V. Conclusion Générale	50
Références bibliographiques	ix

Liste des figures

Figure I-1: <i>Courbe de séchage</i>	6
Figure I-2 : <i>Le principe d'un séchoir solaire direct</i>	12
Figure I-3 : <i>Le séchoir solaire coffre</i>	12
Figure I-4 : <i>Le séchoir solaire intégral</i>	13
Figure I-5 : <i>Le principe d'un séchoir solaire indirect</i>	14
Figure I-6: <i>séchoir solaire armoire</i> [15]	14
Figure I-7: <i>Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1</i>	15
Figure I-8 : <i>Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-</i>	16
Figure I-9 : <i>séchoir solaire hybride à convection forcée</i> [15]	17
Figure I-10: <i>Séchoir solaire hybride solaire-gaz</i> [15]	17
Figure II-1: <i>Constitution d'un capteur ou collecteur plan</i> [23]	20
Figure II-2: <i>Capteurs solaires hybrides PV-T</i> [24]	21
Figure II-3: <i>tour métallique en Californie (usa) à gauche et AORA Solar CSP (Israël) à droite</i> [27]	22
Figure II-4 : <i>La géométrie parabolique</i> [36]	23
Figure II-5: <i>schéma d'un concentrateur solaire</i>	25
Figure II-6 : <i>coupe transversale d'un concentrateur CCP (distance focal « f » et l'angle</i>	26
Figure II-7: <i>Rayon local de miroir</i>	27
Figure III-1: <i>Séchoirs solaires parabolique</i>	28
Figure III-2: <i>Le réflecteur</i>	29
Figure III-3: <i>Le récepteur</i>	30
Figure III-4: <i>Système de poursuite manule</i>	31
Figure III-5: <i>Armoire de séchage</i>	31
Figure III-6: <i>Moteur ventilateur</i>	32

Figure III-7:Séchoirs solaires cylindro -parabolique	32
Figure III-8:Réflecteur cylindro-parabolique	33
Figure III-9:Récepteur de concentrateur cylindro-parabolique	34
Figure III-10:Thermomètre numérique de type K à double entrée TMD-50 AMPROBE	34
Figure III-11:multimètre.....	35
Figure III-12:Capteur de température et d'humidité.....	36
Figure III-13:La balance électrique	36
Figure III-14:les tranches de tomate	37
Figure III-15:tomates séchées	38
Figure IV-1 :La variation de la masse de produit en fonction de temps (La tomate).....	40
Figure IV-2: Variation de teneur en eau à base sèche dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps	41
Figure IV-3 : Variation de la température des récepteurs en fonction de temps.....	42
Figure IV-4: Variation de la température d'entre des chambres en fonction de temps.....	43
Figure IV-5: Variation de la température de Sortie des chambres en fonction de temps.....	44
Figure IV-6 :Variation de la température de la produite du séchoir en fonction de temps.....	45
Figure IV-7: Variation de la humidité de entre des Chambers en fonction de temps.....	46
Figure IV-8: Variation de l'humidité de sortie des chambres en fonction de temps.....	47
Figure IV-9: Variation de la radiation solaire pour les journées 08/06/2019 de séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur parabolique et 12/06/2019 séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur cylindro-parabolique en fonction de temps.....	48

Liste des tableaux

Tableau III.1: <i>Compositions chimique de la tomate</i>	38
--	----

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
H_a	Humidité absolue	Kg eau / kg (as)
H_r	Humidité relative	%
H_{as}	Humidité absolue de saturation	kg eau / kg (as)
M_a	Masse du gaz	kg
M_e	Masse de l'eau	kg
M_s	Masse sèche du produit	kg
M_h	Masse humide du produit	kg
P_v	Pression de la vapeur d'eau dans l'air	Pascal
P_s	Pression de saturation	Pascal
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg ms
X_r	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau / kg mh
T_r	Température de rosé	°C
T_h	La température humide	°C
T_s	Température du bulbe sec	°C
T_{sa}	Température de saturation adiabatique	°C
ψ	Degré de saturation (Eq 0.1)	%
f	Distance focale	[m]
ψ	Angle mesure à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique (P)	[degré]
ψ_p	Angle d 'ouverture de la parabole	[degré]

A_x	Surface parabole	$[m^2]$
G	Eclairement solaire	w/m^2
G_D	Eclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur cylindro-paraboliques	w
S_0	Section d'ouverture du concentrateur cylindro-paraboliques	$[m^2]$
S_G	Surface d'image de GAUSS	$[m^2]$
S_R	Surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal	$[m^2]$
C	Taux de concentration	-
w_{eff}	Ouverture du capteur	m
ω	Angle horaire	[degré]
ϕ_r	Angle d'ouverture du concentrateur cylindro-paraboliques	[degré]
$\emptyset$	Diamètre	[m]
r	Rayon local du miroir	[m]

Introduction Générale

I.1. Introduction Générale

Le séchage (ou la déshydratation) est un processus simple consistant à éliminer l'excès d'eau (humidité) d'un produit naturel ou industriel afin d'atteindre le taux d'humidité spécifié dans les spécifications standard. C'est une opération énergivore. Il est particulièrement essentiel de réduire la teneur en humidité des denrées alimentaires, car celles-ci ont en général une teneur en eau beaucoup plus élevée (environ 25 à 80%, mais généralement environ 70% pour les produits agricoles) que celle qui convient à une conservation longue. Réduire la teneur en humidité des aliments jusqu'à un certain niveau ralentit l'action des enzymes, des bactéries, des levures et des moisissures. Ainsi, les aliments peuvent être stockés et conservés longtemps sans altération.

Le rayonnement solaire, sous forme d'énergie solaire thermique, est une source d'énergie alternative pour le séchage, en particulier pour les fruits secs, les légumes, les céréales agricoles et d'autres types de matériaux, tels que le bois, etc. Cette procédure est particulièrement applicable dans les « ceinture ensoleillée » dans le monde entier, c'est-à-dire dans les régions où l'intensité du rayonnement solaire est élevée et l'ensoleillement prolongé. On estime que dans les pays en développement, les pertes après récolte de produits agricoles, dues à l'absence d'autres moyens de conservation, peuvent être évitées grâce à l'utilisation de séchoirs solaires.

Le séchage à l'énergie solaire est une procédure plutôt économique pour les produits agricoles, en particulier pour les petites et moyennes quantités de produits, afin de préserver les excès de production. C'est respectueux de l'environnement. Il est encore utilisé pour le séchage domestique de petites ou grandes entreprises commerciales, de produits agricoles et de produits alimentaires, tels que fruits, légumes, herbes aromatiques, bois, etc., contribuant ainsi de manière significative à l'économie des petites communautés agricoles et des fermes. Le séchage par rayonnement solaire peut être divisé en deux catégories principales [1] :

- Séchage direct au soleil ou en plein air, exposition directe au soleil.
- Séchage solaire indirect ou par convection solaire.

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

Le temps de séchage et la quantité de produit séché sont parmi les facteurs les plus importants qui déterminent l'efficacité des séchoirs solaires et c'est le problème qui nous a amenés à faire ce travail. Nous mènerons une étude pilote pour comparer deux sécheurs, l'un connecté à un collecteur parabolique et l'autre connecté à un collecteur cylindro -parabolique à convection forcée.

Nous allons diviser le travail en quatre chapitres:

Le ***premier chapitre*** nous allons discuter en général du séchage et de certaines caractéristiques du séchage à l'air, nous évoquerons également différents types de séchoirs solaires.

Le ***deuxième chapitre***, qui sera une métaphore de la classification de différents types de complexes thermiques, abordera la mention des caractéristiques et des équations mathématiques relatives aux compilateurs utilisés dans l'étude.

Le ***troisième chapitre*** discutera du mécanisme de travail suivi et des outils utilisés pendant le travail pilote.

Le ***quatrième chapitre*** discutera et analysera les résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires

I. Généralités sur le séchage et les séchoirs solaires

I.1. Introduction

Le séchage solaire est une option fondamentale pour la conservation des aliments. C'est probablement la première méthode de conservation des aliments utilisée par l'homme.

Cependant, le séchage direct au soleil entraîne des processus lents et des pertes de produit. Pour remédier aux inconvénients des méthodes traditionnelles, les séchoirs solaires semblent être une technologie appropriée pour les opérations de séchage à petite échelle. Ils existent dans une grande variété de configurations et de dimensions. Un processus de séchage solaire dépend essentiellement du produit à sécher et du climat environnant. [2]

I.2. Définition du séchage

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [3].

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année) [4].

I.3. Théories descriptives du phénomène de séchage [5].

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit:

I.3.1. Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la Loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau. Autrement dit, du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits.

La diffusité dépend de plusieurs facteurs, comme la nature du solide, et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

I.3.2. Théorie capillaire (1937)

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits granulaires. Ceaglske et Hougen démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendant de la concentration Krisher de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre

I.3.3. Théorie Whitaker (1977)

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et de masse, pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquide et gaz) et les lois de la thermodynamique. Ensuite il applique pour chacune de phases la prise de moyenne avec certaines simplifications, en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores; ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Il aboutit à un système d'équations permettant de calculer les différents paramètres décrivant le séchage. Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

I.3.4. Théorie de Luikov (1934)

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité. Il propose que le gradient de température est l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité. Il s'est basé sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique, et le processus de l'irréversibilité pour vérifier que le transfert de la vapeur et du liquide est divisé en deux parties: Un gradient de concentration et un gradient de température.

I.3.5. Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938)

Krischer, suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires, et dans l'état vapeur au gradient de concentration de la vapeur. Berger et Pei proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration, et la diffusion de vapeur est due au gradient de pression de la vapeur.

I.3.6. Théorie de Philip et De Vries (1957)

Philip et De Vries, proposent que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux.

I.4. Mécanisme de séchage : [2]

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

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

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux :

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

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

I.5. Les trois phases de séchage [2]:

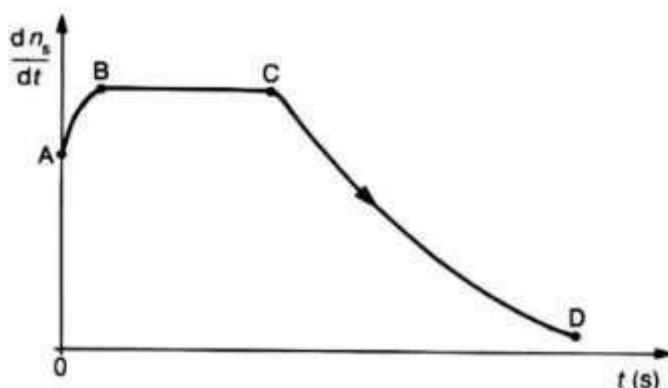


Figure I-1: Courbe de séchage

La période de mise en température [AB]

Elle est souvent très courte et se caractérise par une vitesse de séchage croissante et correspond à la montée en température du produit jusqu'à une température d'équilibre. Lorsque le produit reçoit autant de chaleur de l'air qu'il doit en fournir à l'eau, il est alors en phase de sa vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte de suite puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse, et une inertie thermique relativement importante. La vitesse de séchage sera croissante puisque

l'échange d'eau entre le produit et l'air sera d'autant plus efficace que le produit sera réchauffé.

La période de vitesse de séchage constante [BC]

Elle correspond à l'évaporation de l'eau libre en surface de produit, sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La température du produit reste constante.

Phases de ralentissement du séchage [CD]

Elle correspond à l'évaporation de l'eau liée. L'eau libre, qui migrait de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être alors transformée en vapeur d'eau, a complètement disparu en fin de phase II. Il ne reste plus dans le produit que de l'eau liée, plus accrochée au produit. L'eau ne s'évapore plus à la surface du produit mais à l'intérieur. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du produit. La vapeur d'eau est ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du produit, plus le transfert d'eau est difficile. A ce stade la température du produit augmente et tend vers celle de l'air à l'entrée si la température et le débit restent les mêmes qu'avant.

I.6. Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [6]

a) Séchage par conduction [7]

Dans ce mode de séchage, 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.

b) Séchage par convection (ou par entraînement)

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

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

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels [8] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

c) Séchage par rayonnement [9]

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.

d) La lyophilisation [2]

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

d) Séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect)

I.7. Caractéristiques de l'air de séchage [10]**I.7.1. Humidité absolue (Arditti 1972)**

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (I.1)$$

Si on considère P la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$H_a = \left(\frac{18}{29}\right) \left[\frac{P}{P - P_v}\right] \quad (I.2)$$

I.7.2. Humidité relative (Arditti 1972)

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

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.3)$$

I.7.3. Degré de saturation (Arditti 1972)

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{as} la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I.4)$$

Dans le cas où P_v et P_s sont tous deux petits devant P (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire :

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.5)$$

I.7.4. Températures caractéristiques de l'air humide : [11]

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables.

a) Température sèche « Température de bulbe sec » T_s :

La température sèche ou la température de bulbe sec T est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, le thermomètre étant placé dans l'air.

b) Température humide « Température de bulbe humide » T_h :

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide

c) Température de rosée T_r :

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas.

d) Température de saturation adiabatique T_{sa} :

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température T

I.8. Caractéristiques des solides humides : [12]

Le solide à un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présent dans une enceinte, à la même température.

Soit une masse M_h de matériau humide contenant une masse M_e d'eau et une masse M_s de matière sèche:

$$M_h = M_e + M_s \quad (I.6)$$

I.8.1. Humidité absolue :

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur (kg av/kg as) en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.7)$$

Teneur en eau à base humide :

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

$$X_r = \frac{M_e}{M_e - M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (I.8)$$

I.8.2. 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.

I.8.3. 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.

I.8.4. 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.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.9)$$

I.9. Les différents types des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires peuvent être classés sur la base du mode d'air la circulation ou le mécanisme de contact d'air chaud avec le Produit. Ils sont appelés

- ❖ Passif lorsque la circulation de l'air à travers le séchoir se fait par convection naturelle.
- ❖ Actif lorsque le mouvement est en mode de convection forcée à l'aide de soufflantes ou de ventilateurs.
- ❖ Mode de convection mixte lorsque la méthode de circulation d'air combine les modes passif et actif.

Ces séchoirs peuvent être encore sous-classes en fonction de la réception du rayonnement solaire comme suit :

I.9.1. Séchoirs solaires de type direct ou intégré :

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud (Fig. I.2). La chaleur est générée par absorption

des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [13].

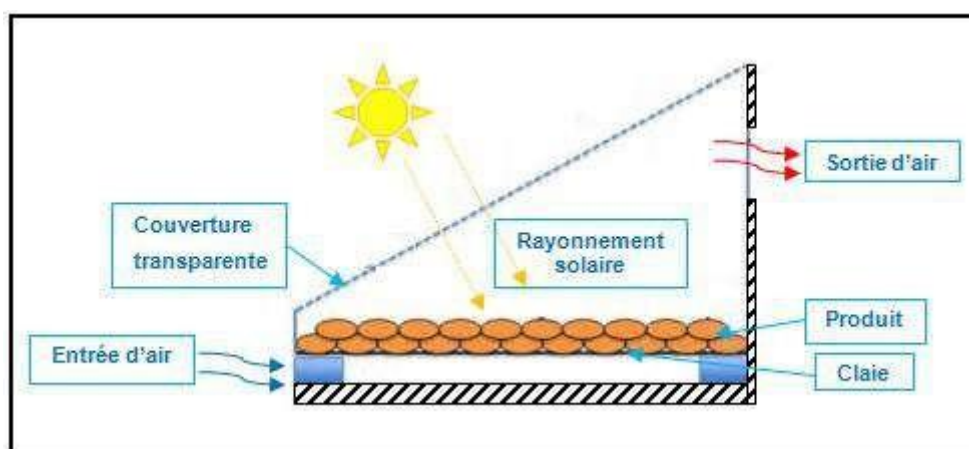


Figure I-2 : *Le principe d'un séchoir solaire direct*

Ce type de séchage présente deux avantages : offre une meilleure protection contre la poussière, les insectes et la pluie par rapport au séchage conventionnel, Il ne nécessite pas de compétences élevées. Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes. [14]

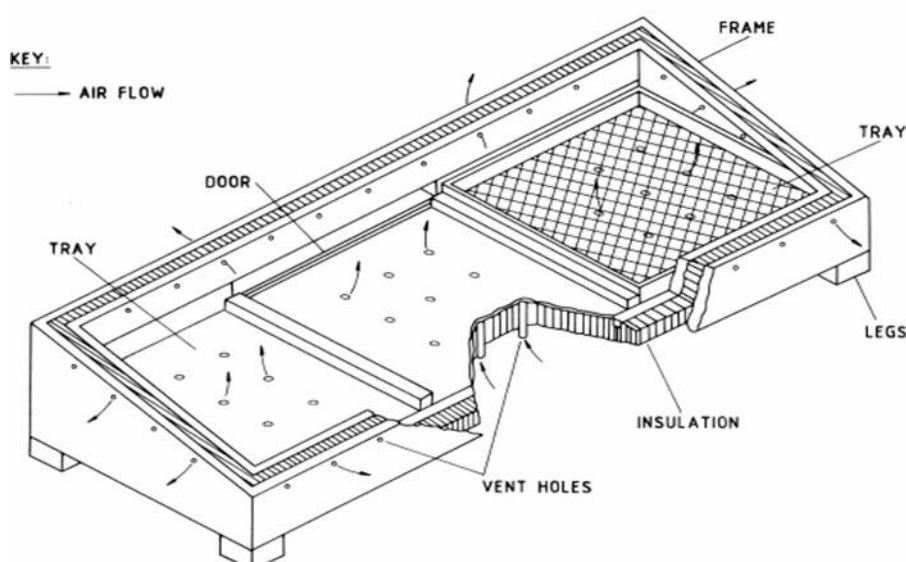


Figure I-3 : *Le séchoir solaire coffre*

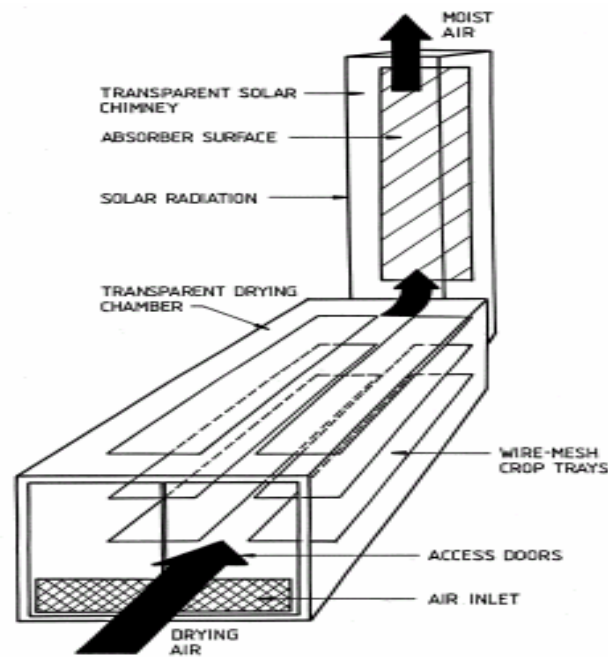


Figure I-4 : Le séchoir solaire intégral

I.9.2. Sécheurs solaires indirects ou distributifs :

Le système de séchage est divisé en deux parties : le capteur solaire où l'air est d'abord préchauffé avant d'entrer dans la chambre de séchage. La méthode de prélèvement et de canalisation de la chaleur dans la chambre de séchage peut être basée sur une plaque plate nue ou un collecteur plat couvert (passe-simple ou double air, avec ou sans ailettes) ou par des tubes d'évacuation.

Il est fréquent de voir pendant le séchage solaire indirect l'utilisation d'instruments supplémentaires qui donnent le contrôle sur les conditions de fonctionnement, comme un radiateur ou un matériel de stockage de chaleur.

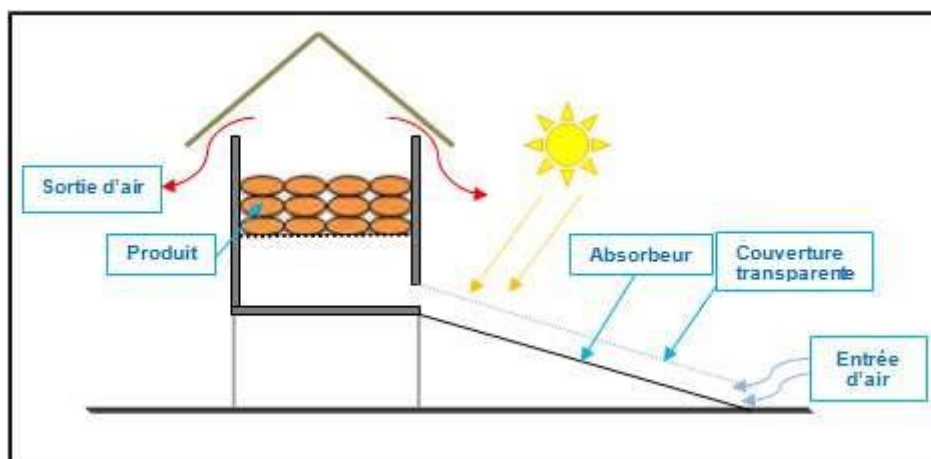


Figure I-5 :Le principe d'un séchoir solaire indirect.

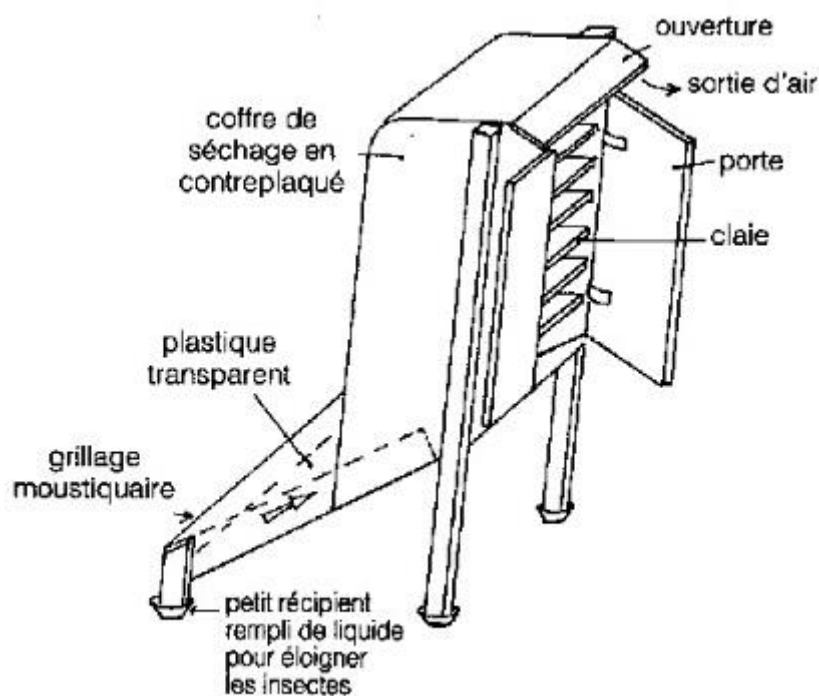


Figure I-6: séchoir solaire armoire [15]

Avantage:

- Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [16]
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [17].

Inconvénients:

- La vitesse de séchage est très variable en fonction des conditions climatiques et de la conception du séchoir.

I.9.3. Séchoirs solaires en mode mixte : [18]

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure 7) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminé) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral

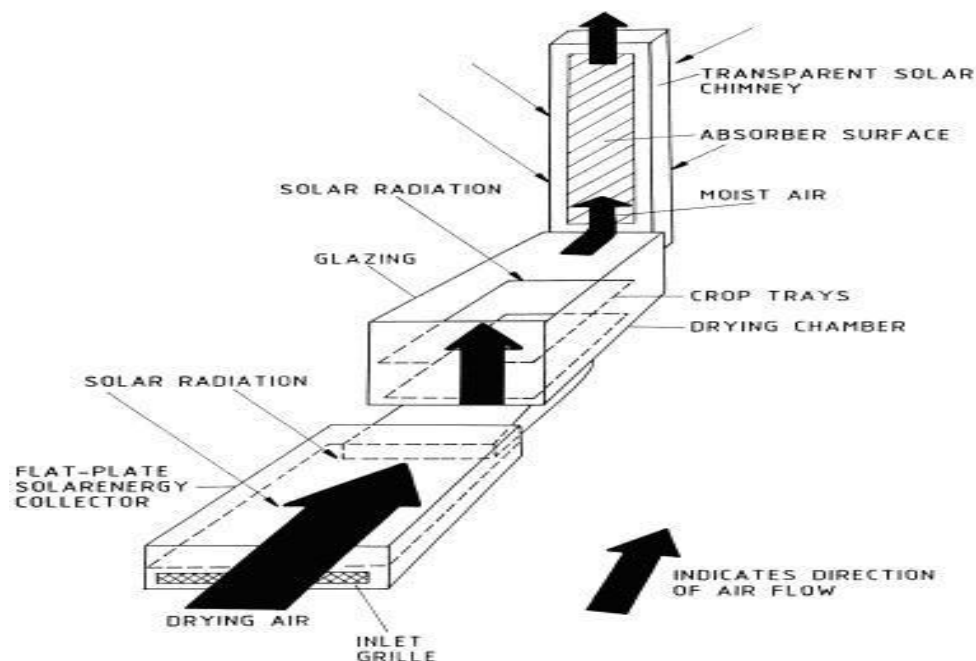


Figure I-7: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1

Une autre conception (figure 8) se compose d'un capteur à air avec une pile de granit (sert le rôle d'un absorbeur et stockage d'énergie) recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant trois claies superposées, les parois sont des contre-plaques, la surface supérieure recouverte de verre.

La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie

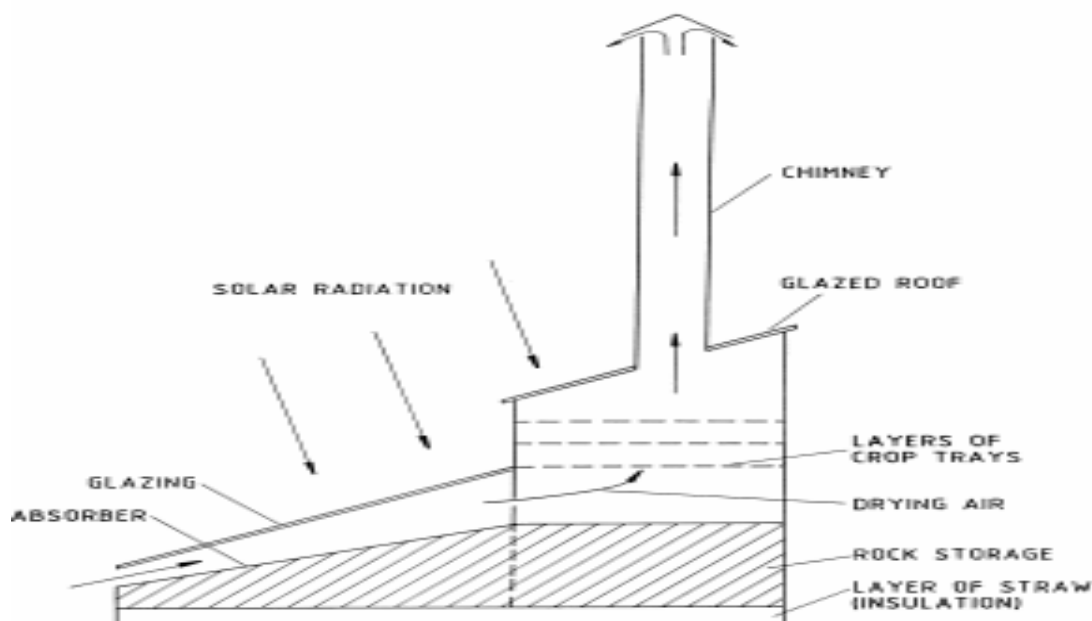


Figure I-8 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-

I.9.4. Les séchoirs solaires hybrides :

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz ... l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [19]:

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

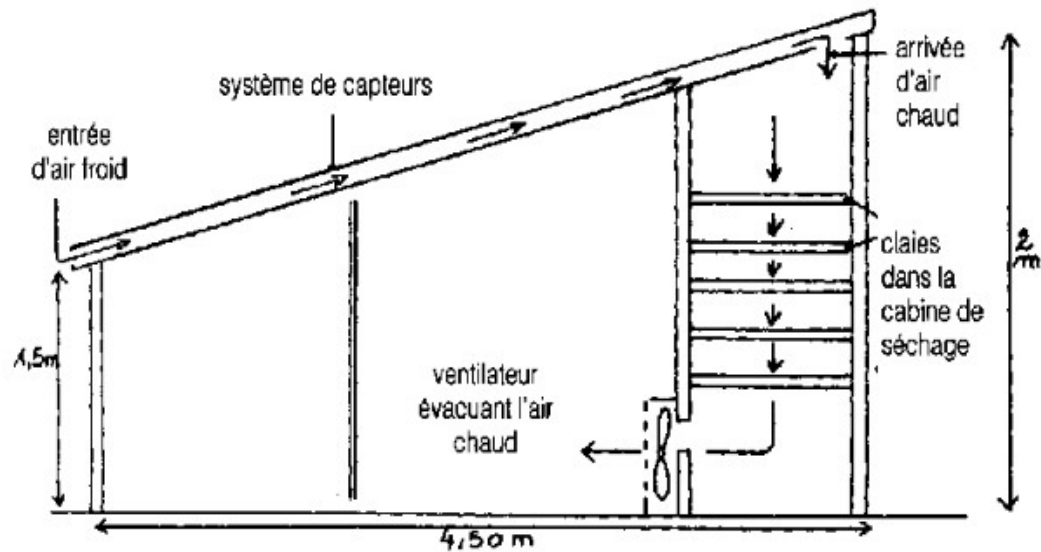


Figure I-9 : séchoir solaire hybride à convection forcée [15]

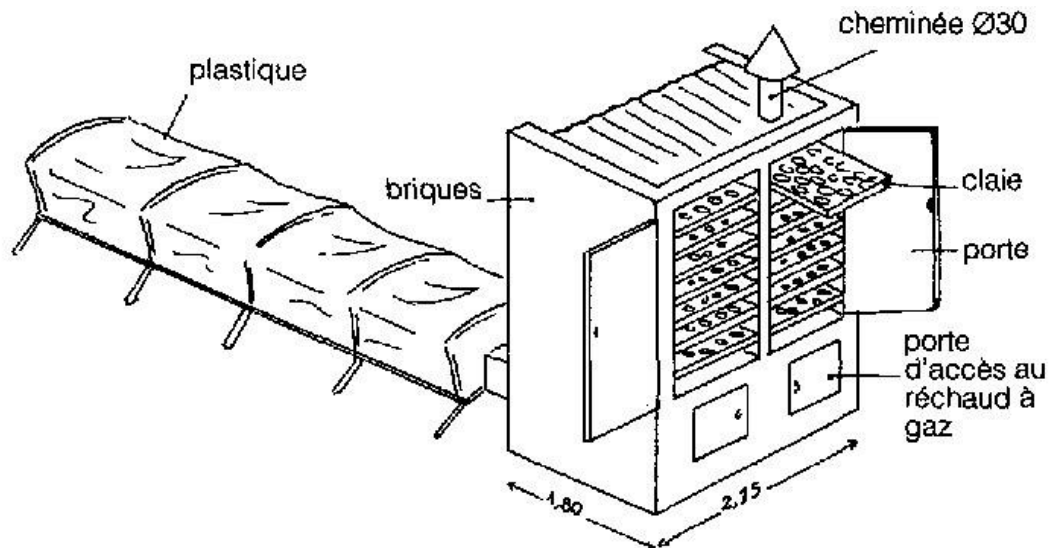


Figure I-10: Séchoir solaire hybride solaire-gaz [15]

Avantage :

- Meilleur contrôle du séchage [20]
- Augmentation significative de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car la machine peut fonctionner la nuit ou pendant la saison des pluies, et de la neige si nécessaire

Inconvénients :

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Le besoin d'approvisionnement local en carburant, électricité et pièces de rechange.
- Le processus de maintenance nécessite des concepteurs qualifiés

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale du séchage et avons présenté différents types de Séchoirs solaires.

Chapitre II:

Les collecteurs solaires thermiques

II. Les collecteurs solaires thermiques:

II.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée la sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser deux sortes de panneaux solaires, le plus répandu étant le panneau solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité à partir de l'impact des rayons du soleil. L'autre sorte est le panneau solaire thermique qui produit la chaleur pour chauffer les maisons et l'eau [21]

II.2. Collecteurs non concentrés :

II.2.1. Capteurs plans: [22]

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante.

Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège le rayonnement calorifique s'échappant de la plaque absorbante. Ils peuvent chauffer les fluides caloporteurs à des températures légèrement supérieures à 80°C, avec un rendement variant entre 40 et 80%.

Les principaux composants des capteurs solaires sont :

La vitre : la matière le plus utilisé est le verre.

L'absorbeur : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur thermique ; cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes

- Une bonne conductivité thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.

Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.

L'isolant : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques. Les matériaux utilisés comme isolant sont le bois, les cendres de végétaux, la laine de verre etc. ...

Le fluide caloporteur : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail.

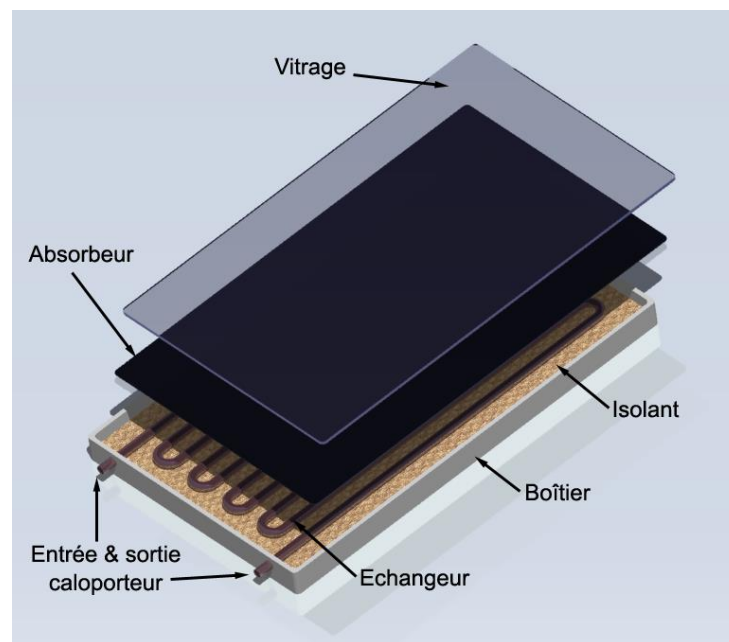


Figure II-1: Constitution d'un capteur ou collecteur plan [23]

II.2.2. Les captures solaires hybrides photovoltaïques thermiques PV/T : [21]

Un capteur photovoltaïque thermique (PV/T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique.

Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé et selon le type d'absorbeur et la couverture.

Le capteur solaire PV/T plan peut classer en capteur PV/T d'eau combinaison de capteur PV/T eau/air, et capteur PV/T d'air ça dépend de type de fluide utiliser plus loin les capteurs PV/T peuvent être distingué par la présence de l'absorbeur sous la plaque PV. Une désigne complète de capteur PV/T plan doit constituer le verre couvert (vitrer ou non). Cellule solaire et absorbeur en dessous

L'absorbeur joue un rôle très important dans le système PV/T, il refroidit la cellule PV simultanément collecte l'énergie thermique produit sous forme d'eau ou air chaud. Pendant ce processus l'efficacité de la cellule PV augmente.

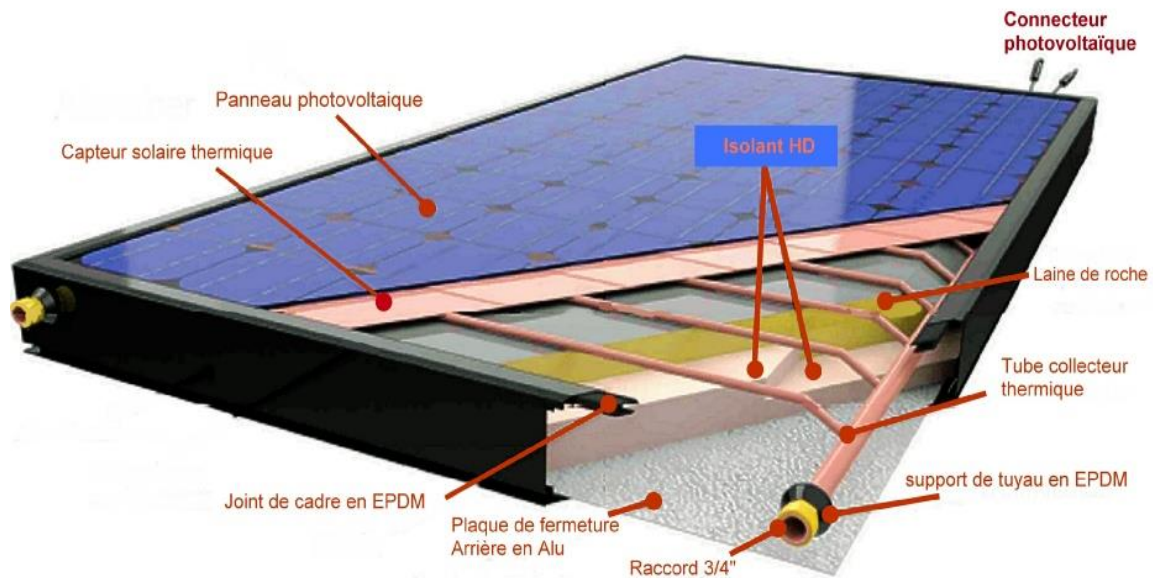


Figure II-2: Capteurs solaires hybrides PV-T [24]

II.3. Collecteurs à concentration :

II.3.1. Système de centrale à tour (héliostat):

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaire à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. Ces capteurs possèdent un ensemble de grands miroirs qui suivent le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000 °C [25], [26],



Figure II-3: tour métallique en Californie (usa) à gauche et AORA Solar CSP (Israël) à droite [27]

II.3.2. Concentrateurs paraboliques:

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée. [28]

a. La géométrie parabolique :

Une parabole est le parcours ou un point qui se déplace de façon que ses distances d'une ligne fixe et un point fixe soient égaux. Ceci est illustré sur la figure II.4, où la ligne fixe est appelé la directrice et le point fixe (F) appelé foyer et que la longueur FR est égale à la longueur RD. La ligne perpendiculaire à la directrice et passant par le foyer F est appelé l'axe de la parabole [29].

La parabole croise son axe à un point (V) appelé le sommet, qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice [30], [31].

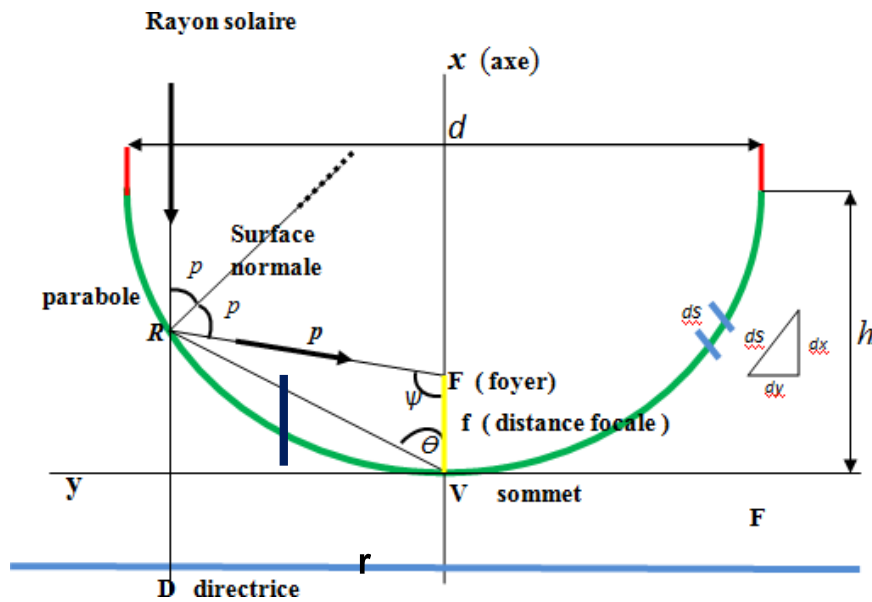


Figure II-4 : La géométrie parabolique [36]

Si l'origine est prise au sommet (V) et l'axe des abscisses le long de l'axe de la parabole, l'équation de la parabole est . [32] :

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x \quad (\text{II. 1})$$

Souvent, dans les études solaires, il est plus utile de définir la courbe parabolique à l'aide de la distance focale (f) et en fonction de l'angle (ψ). L'angle (ψ) est mesuré à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique p qui représente la distance (RF) entre le foyer F et de la courbe de la parabole. Donc :

$$P = \frac{2f}{1 + \cos\psi} \quad (\text{II. 2})$$

➤ Taille de la parabole

La hauteur de courbe parabolique (h) peut être définie comme la distance maximale depuis le sommet jusqu'à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole. A propos de la distance focale et le diamètre de l'ouverture, la hauteur (h) de la parabole est [33]

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (\text{II.3})$$

Ou (f) et (d) sont la distance focale et l'ouverture de la parabole.

D'une manière similaire, on peut décrire l'angle d'ouverture (ψ) en fonction des dimensions de la parabole:

$$\tan \psi_p = \frac{1}{\left(\frac{d}{8h}\right) - \left(\frac{2h}{d}\right)} \quad (\text{II. 4})$$

➤ **Surface d'une parabole**

La surface de la section transversale de l'espace enfermé entre une parabole et une ligne à travers son ouverture est donnée par [34], [35]

$$A_x = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \quad (\text{II. 5})$$

➤ **Angle d'ouverture d'une parabole [36]**

Dans l'évaluation de la géométrie parabolique et les dérivations optiques connexes, le lecteur occasionnel devient souvent confondu avec les nombreuses formes utilisées pour représenter la géométrie d'une forme parabolique particulière. Les équivalences suivantes sont données pour la commodité du lecteur:

$$\tan \psi_p = \frac{\frac{f}{d}}{2\left(\frac{f}{d}\right)^2 - \left(\frac{1}{8}\right)} \quad (\text{II.6})$$

f : Distance focale. ,

D : Diamètre de l'ouverture de la parabole.

II.3.3. Concentrateurs cylindro-paraboliques:

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [37] Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C [38]

a. La géométrie du concentrateur [39]

On peut définir les différents paramètres géométriques qui se trouvent dans CCP

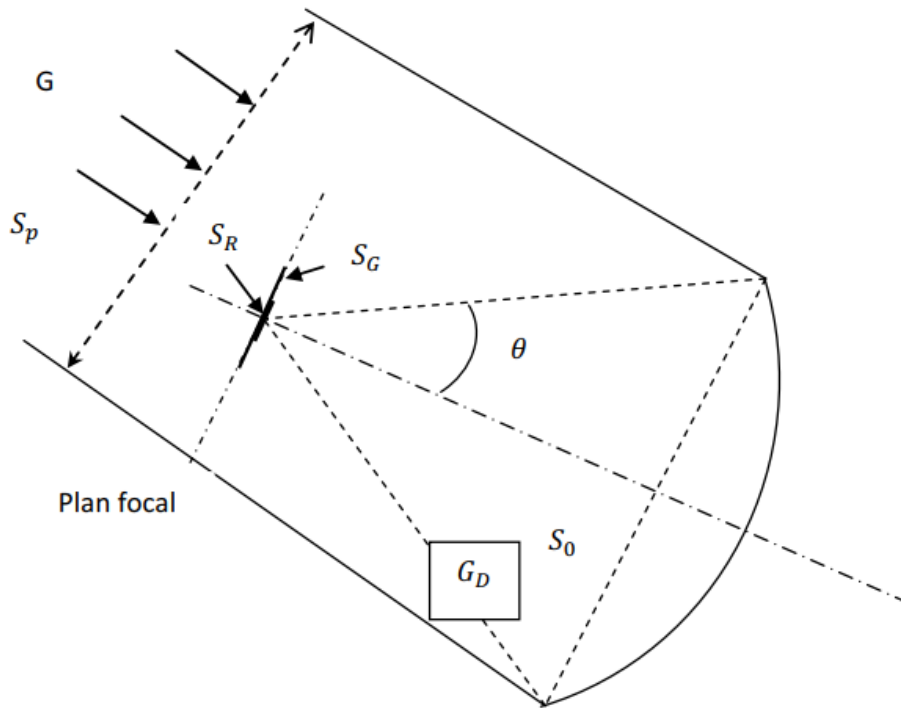


Figure II-5: schéma d'un concentrateur solaire

Θ : angle d'ouverture du concentrateur.

G : éclairement solaire.

G_D : Éclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur

S_0 : Section d'ouverture du concentrateur caractérisée par l'angle θ , S_p section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur S_p se confond avec S_0 quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil, surface de l'image de Gauss du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux, c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique.

S_R : Surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.

➤ **Le plan focal:**

On détermine un réflecteur à 2 dimensions c'est un cylindre, de longueur infinie.

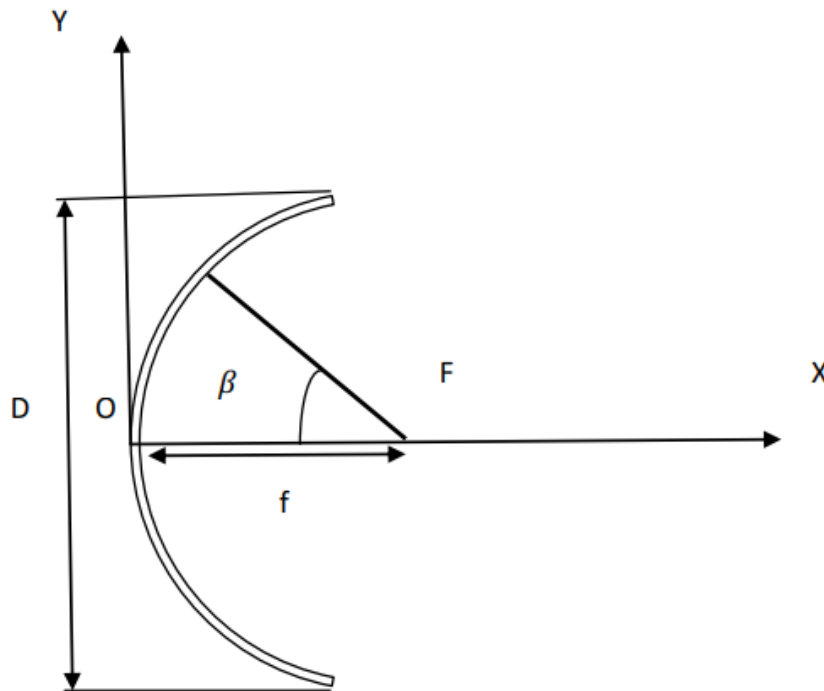


Figure II-6 : coupe transversale d'un concentrateur CCP (distance focal « f » et l'angle

Pour un concentrateur cylindro-parabolique l'équation de la courbure en coordonnées cartésiennes est la suivantes :

$$X^2 = 4 \cdot f \cdot y \quad (\text{II. 7})$$

Ou f : la distance focale du CCP

En coordonnées polaire

$$r = \frac{f}{\cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (\text{II. 8})$$

β : Angle d'ouverture

$$W_{eff} = 2r \sin \beta = 4f \tan \quad (\text{II. 9})$$

➤ **Angle d'ouverture:** [40]

L'ouverture est (a), et (f) la longueur focale (la distance du point focale au sommet) respectivement. Les faisceaux du rayonnement solaire incident sur le réflecteur au point (B) où le rayon (r) est au maximum, est égal à (r_r) et fait un angle de (ϕ_r), décrit par AFB est donnée par l'équation

$$(\phi_r) = (\tan^{-1}(\frac{8f}{a})) / (16 \left(\frac{f}{a}\right)^2) = \sin^{-1}(a/2r_r) \quad (\text{II. 10})$$

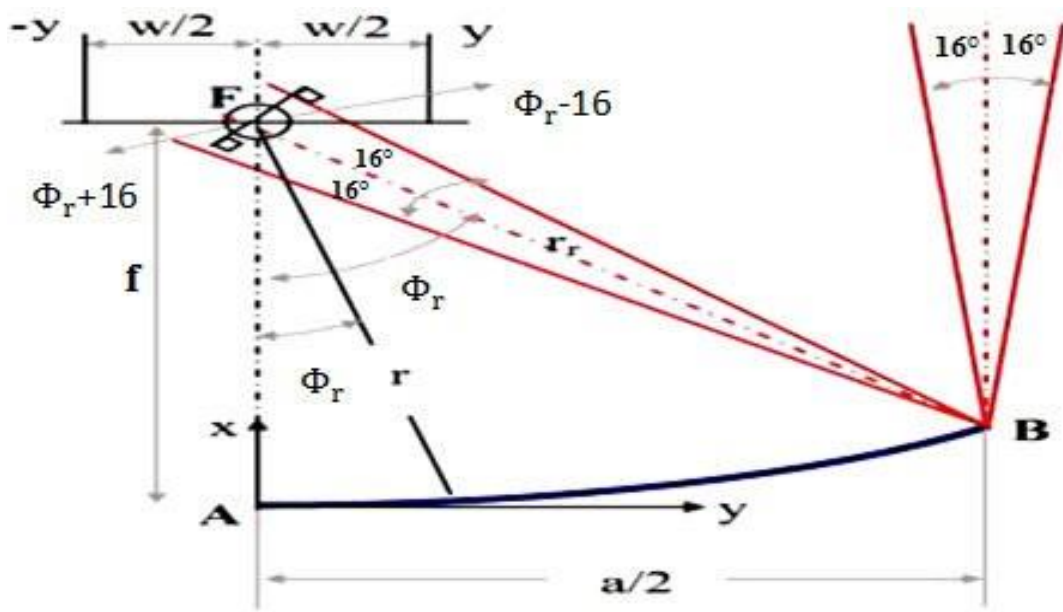


Figure II-7: Rayon local de miroir

Pour n'importe quel point du réflecteur parabolique le rayon du miroir est :

$$r = 2 \cdot \frac{f}{1 + \cos \phi} \quad (\text{II. 11})$$

b. Taux de Concentration :

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture à la surface du récepteur :

$$C = \frac{S_0}{S_r} \quad (\text{II. 12})$$

S_0 : est la surface d'ouverture

S_r : La surface de l'absorbeur

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les types de complexes thermiques et l'équation de la modélisation mathématique pour la collecte paraboliques et cylindro-paraboliques

Chapitre III:
Appareillage de mesure
et
protocole expérimental

III. Appareillage de mesure et protocole expérimental

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les systèmes étudiée, les instruments des mesure utilisée et les différentes étapes pour étudier et séchage les produits agro-alimentaires (la pomme de terre, la tomate) par le séchoir solaire indirecte a convection forcé.

III.2. Présentation les systèmes étudiés

III.2.1. Séchoirs solaires assistée par concentrateur parabolique

Le séchoir solaire indirect à convection forcée utilisé est composé de trois parties essentielles, un réflecteur solaire, un chambre de séchage et un récepteur et des autres parties moins importance figure.1. Les caractéristiques techniques de ces derniers en sont les suivantes:



Figure III-1: *Séchoirs solaires parabolique*

a. Réflecteur (miroir) :

Ressemblant à des paraboles de réception satellite, le capteur solaire parabolique est un miroir qui réfléchit les rayons du soleil sur un point de convergence appelé foyer, qui est situé dans le récepteur. la parabole suit le déplacement du soleil pour profiter de l'ensoleillement maximum. Le récepteur monte donc en température. Cette dernière peut atteindre 1000°C sur le foyer mais les produits a séché n'a pas besoin d'une chaleur intense pour donné des produits optimaux.

**Figure III-2:Le réflecteur.**

Diamètre de la parabole	$d=1.81\text{ m}$
Taille de la parabole	$h=0.26\text{ m}$
L'angle d'ouverture	$\Psi_p = 59.7^\circ$
Distance focale	$f=0.78\text{ m}$
Surface d'ouverture	$A_a=2.57\text{ m}^2$

b. Le récepteur:

Le métal récepteur doit avoir une bonne conductivité, nous avons choisi le fer (dont la conductivité thermique est de l'ordre de 80 W/ k.m^2), c'est un tube de 17 cm de diamètre extérieur et 15 cm de longueur, il est muni deux trous le premier trou pour entre l'air et le deuxième pour sorte l'air chaud, contiennent intérieur a des obstacles pour laisser l'air de rester plus longtemps pour le bien chauffée.



Figure III-3:*Le récepteur*

c. Le support

Le support est un élément qui porte le dispositif. Il est réalisé en cornière soudés à l'arc électrique pour réduire le poids et faciliter la mobilité et le stockage.



Figure III.2.14 *le support*

d. Système de poursuite manuel

Le concentrateur parabolique nécessite un système de poursuite du mouvement du soleil pour atteindre le maximum de flux solaire. Nous avons adopté un mécanisme de poursuite très simple se basant sur un (vérins et un axe rotatif) pour tourner le foyer à la position du soleil à tout instant.



Figure III-4: *Système de poursuite manule.*

e. Le Chambre de séchage

Est une boîte (armoire) bien isolé à trois couche (bois et endêver et résine) ses dimensions 50 (cm) de longueur et 50 (cm) de largeur et 50(cm) de hauteur, il contient calie métallique pour placer la produit à sécher, il est deux trous de 60 (mm) de diamètre en haute et bas pour permettre de circuler l'air-chaud au sien la chambre à travers les trous



Figure III-5: *Armoire de séchage*

f. Moteur ventilateur

C'est un composant qui permet un écoulement forcé d'air chaud dans le foyer vers la chambre de séchage



Figure III-6:*Moteur ventilateur*

III.2.2. Séchoirs solaires cylindro- parabolique

Le séchoir solaire couplée par concentrateur cylindro- parabolique est composé de trois parties essentielles, un réflecteur solaire cylindro- parabolique, un enceinte de séchage et un récepteur et des autres parties moins importance figure.III.7. Les caractéristiques techniques de ces derniers en sont les suivantes:



Figure III-7:*Séchoirs solaires cylindro -parabolique*

a. Le réflecteur

Le réflecteur cylindro-parabolique est un type de capteur d'énergie solaire thermique, les performances technico-économique est le fait de réussir la production des panneaux de miroirs de très belle qualité d'un réflecteur de 94%.



Figure III-8:*Réflecteur cylindro-parabolique*

b. Le récepteur

Le récepteur de concentrateur cylindro-parabolique sous forme prismatique sur toute la longueur de réflecteur, Le métal de récepteur doit avoir une bonne conductivité, nous avons choisi le fer (dont la conductivité thermique est de l'ordre de 80 W/k.m^2), le récepteur absorbe le rayonnement concentre sur une surface noir et transforme la chaleur générée au l'air de séchage, le récepteur contiennent intérieur a des obstacles pour laisser l'air de rester plus longtemps pour le bien chauffée.



Figure III-9: Récepteur de concentrateur cylindro-parabolique

III.3. Instrumentations de mesure

III.3.1. Mesure de la température

a. Mesure de la température ambiante

Pour mesurer la température ambiante en utilisant le thermomètre numérique de type K à double entrée.



Figure III-10: Thermomètre numérique de type K à double entrée TMD-50 AMPROBE

b. Mesure de la température de récepteur

Nous avons utilisé un multimètre digital pour mesurer la température de récepteur dont les caractéristiques suivantes :

- Plage de température $-20^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$
- Erreur $\pm 1^{\circ}\text{C}$

- Lecture 1°C
- Alimentation : une batterie (9V).



Figure III-11:*multimètre*

c. Mesure de température et humidité de la chambre de séchage

Nous avons utilisé le capteur de température et d'humidité DHT11 comprend un complexe de capteurs de température et d'humidité avec une sortie de signal numérique étalonnée. En utilisant la technique exclusive d'acquisition de signal numérique et la technologie de détection de la température et de l'humidité, il garantit une grande fiabilité et une excellente stabilité à long terme. Ce capteur comprend un composant de mesure d'humidité de type résistif et un composant de mesure de température NTC, et se connecte à un microcontrôleur 8 bits haute performance, offrant une excellente qualité, une réponse rapide, une capacité anti-interférences et une rentabilité élevée.

Tension d'alimentation : +5 V

Plage de température : 0-50 ° C erreur de ± 2 ° C

Humidité : 20-90% HR $\pm 5\%$ HR error

Interface : numérique

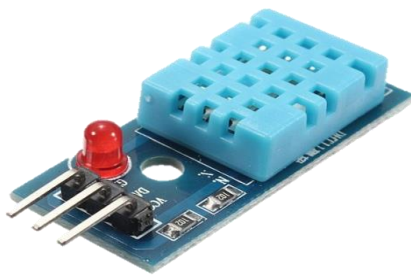


Figure III-12: Capteur de température et d'humidité

d. Mesure de la masse de produit

En utilisant la balance électrique pour mesurer la masse de produit séché



Figure III-13: La balance électrique

III.4. Préparation du produit

III.4.1. La tomate

Les perles de tomate sont lavées avant d'être tranchées, puis coupées en rondelles d'une épaisseur de 0.003m, elles ont été réparties sur la claie de séchage.



Figure III-14: *les tranches de tomate*

Composition globale de tomate

Les trois fractions de la tomate fraîche « Agora » sont données dans le tableau III.1: La teneur en pulpe, exprimée en pourcentage pondérale (poids de la pulpe /poids du fruit frais) est de 89%, quant aux pelures, elles représentent environ 8% (MF) du poids total de la tomate. Les résultats obtenus sont légèrement supérieur à ceux trouvés par Zidane, (2009) qui est 75% pour la pulpe et 25 % pour la pelure et graines, ce qui peut s'expliquer par les conditions dans lesquelles sont réalisés les mesures, sachant que l'instabilité de la teneur en eau du produit dépend de sa structure et les zones géographiques de la récolte.

Pour 100g de tomate crue :

Nutriments	Quantités
Protéines	0.86 g
Lipides	0.26 g
Glucides	2.26 g
Eau	94.1 g

Fibres	1.2 g
Vitamine C	15.5 mg
Bêta-carotène	449 µg
Vitamine E	0.66 mg
Potassium	256 mg
Calcium	8.14 mg
Magnésium	10.1 mg

Tableau III.1: *Compositions chimique de la tomate*



Figure III-15: *tomates séchées*

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les systèmes de séchage étudiés, le produit utilisé dans l'étude, les appareils de mesure et certaines de leurs caractéristiques.

Chapitre IV:

Résultats et discussion

IV. Résultats et discussions :

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous parlerons à quelque résultats concernant par discussion les courbes suivants: (pour chaque séchoir)

La variation de la masse de produit en fonction de temps (La tomate).

Variation de teneur en eau à base sèche dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps.

Variation de la température des récepteurs en fonction de temps.

Variation de la température d'entre des chambres en fonction de temps.

Variation de la température de Sortie des chambres en fonction de temps.

Variation de la température de la produite du séchoir en fonction de temps.

Variation de la humidité de entre des Chambers en fonction de temps.

Variation de la radiation solaire pour les journées 08/06/2019 de séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur parabolique et 12/06/2019 séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur cylindro-parabolique en fonction de temps.

IV.2. La tomate

IV.2.1. La variation de la masse de produit dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps

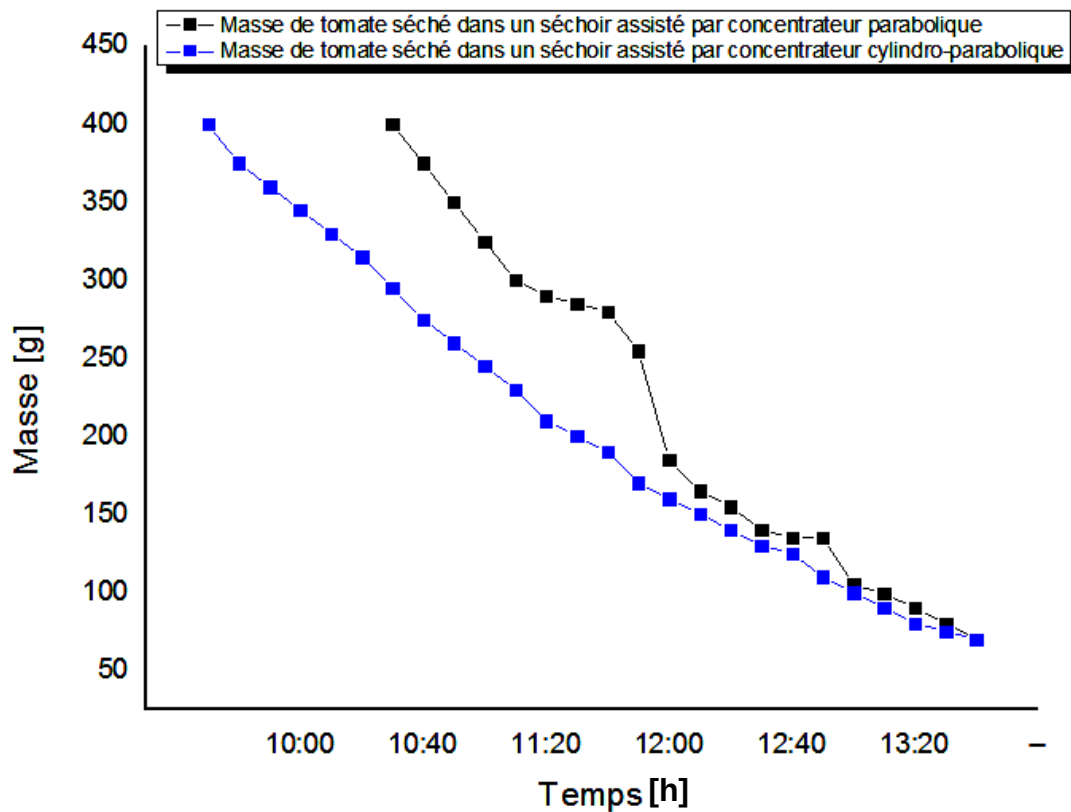


Figure IV-1 : La variation de la masse de produit en fonction de temps (La tomate)

La figure(IV.1) On observe une diminution de la masse de tomates dans les deux Séchoirs solaires. de 400g à 70g. Où il était le temps de réduction de la masse dans le séchoir cylindro – parabolique était supérieur à celui d'un séchoir parabolique.

IV.2.2. Variation de teneur en eau à base sèche dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps

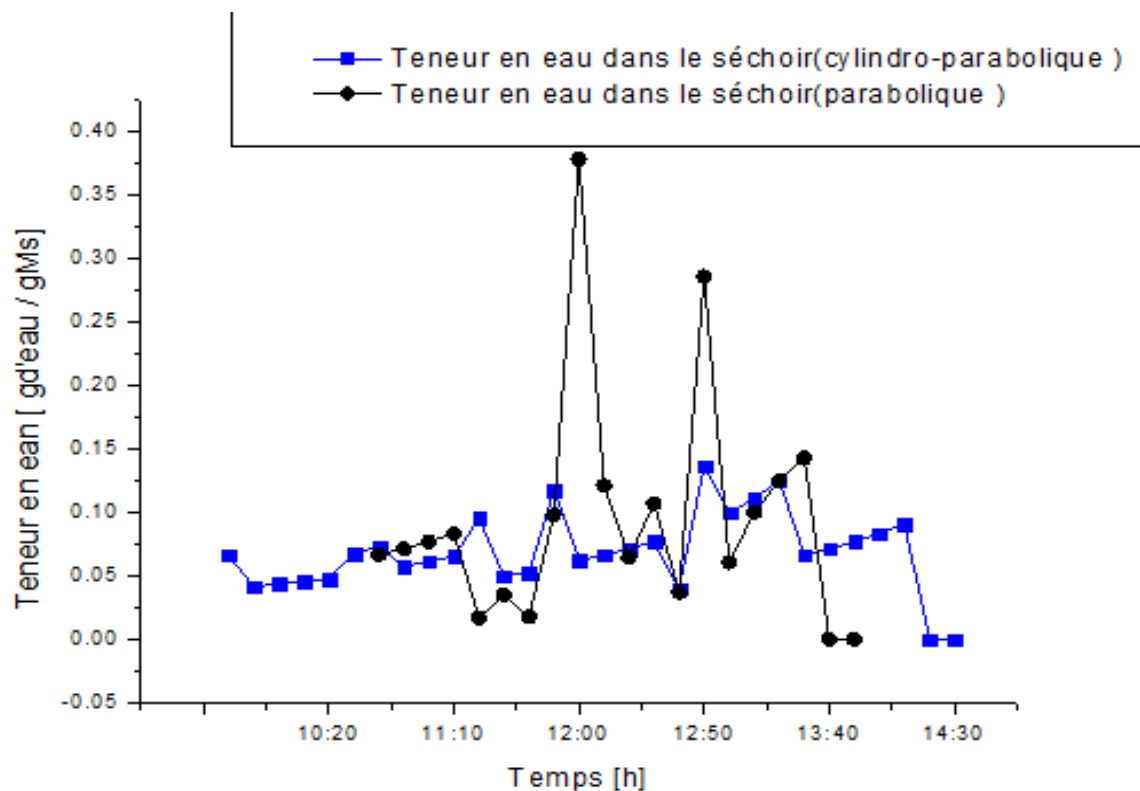


Figure IV-2: Variation de teneur en eau à base sèche dans les deux les deux Séchoirs solaires (P-CP) en fonction de temps

La figure (IV-2) montre que le temps de séchage de la tomate (épaisseur 0.3mm et un teneur en eau initial de 0.06 g d'eau/g ms) est de 5 H pour le séchoir solaire séchoir cylindro –parabolique et 4h pour le séchoir parabolique.

IV.2.3. Variation de la température des récepteurs en fonction de temps

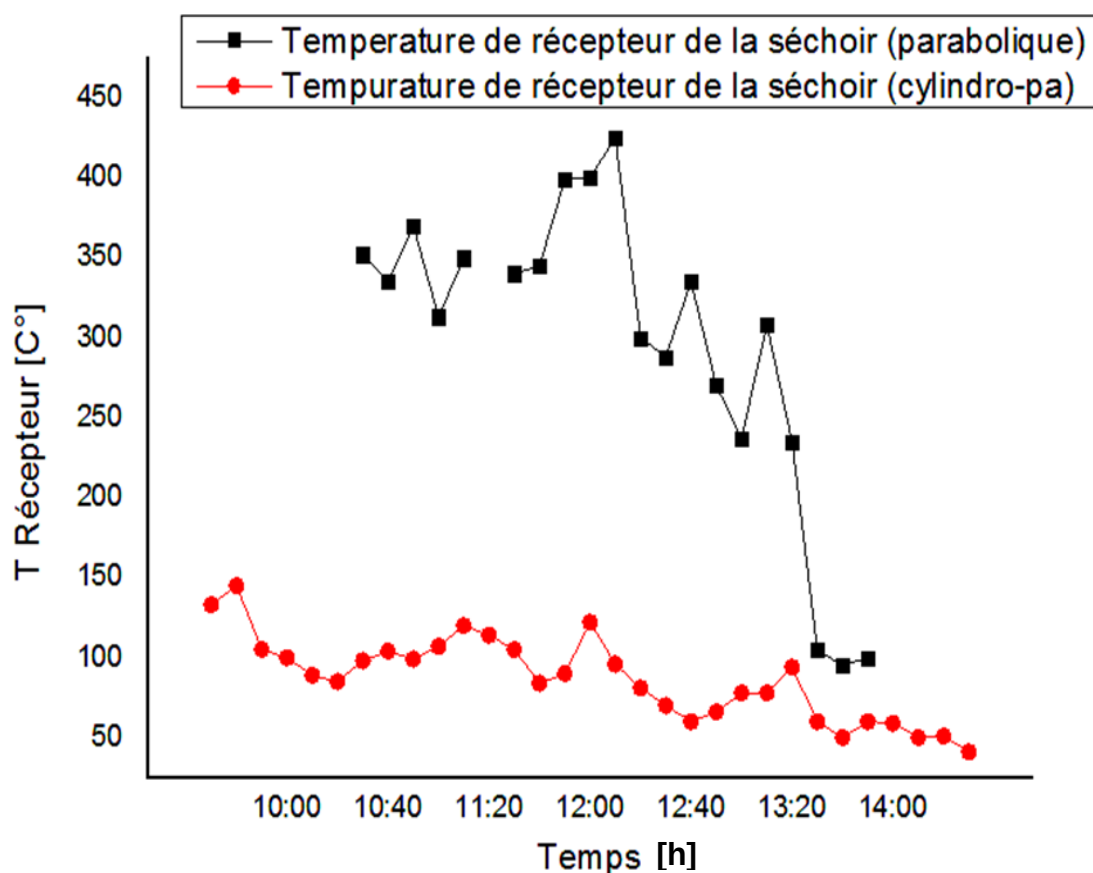


Figure IV-3 : Variation de la température des récepteurs en fonction de temps

La figure (IV.3) on observe que la température dans le récepteur du séchoir parabolique est supérieure à la température dans le récepteur du séchoir cylindro –parabolique à cylindre pendant la période de 10h :00h à 14h:00.

La température maximale du récepteur du séchoir parabolique est estimée à 450°C et le minimum est de 100°C.

La température maximale du récepteur du séchoir cylindro –parabolique est estimée à 150°C et le minimum est de 30°C.

IV.2.4. Variation de la température d'entre des chambres en fonction de temps

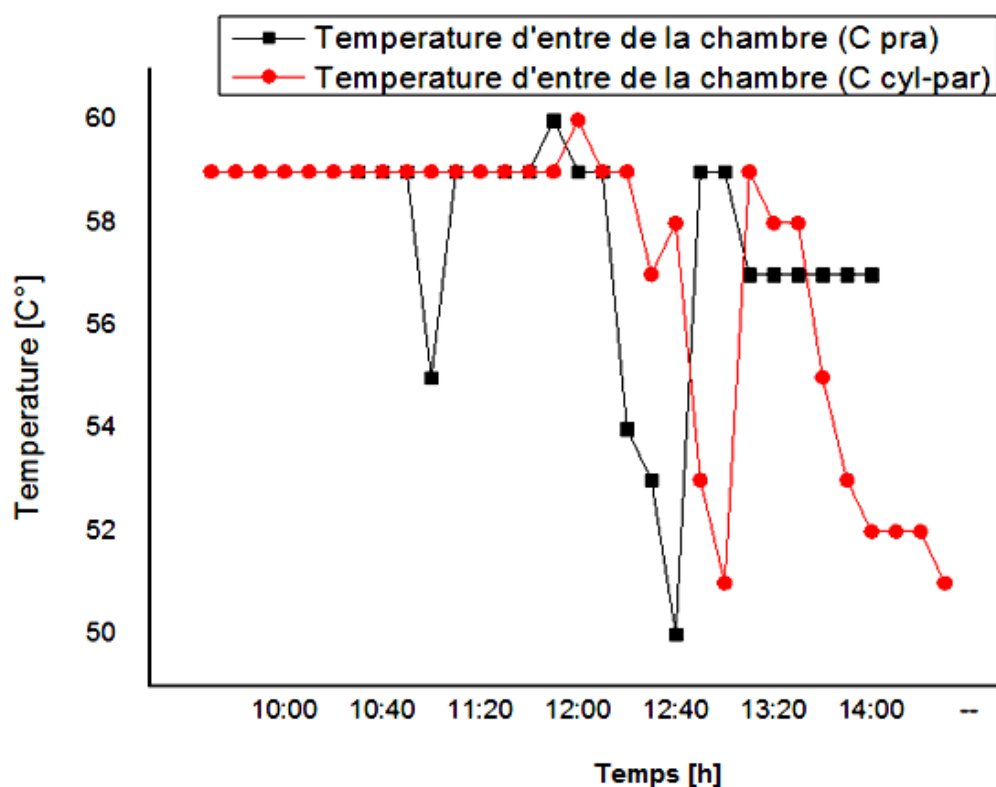


Figure IV-4: Variation de la température d'entre des chambres en fonction de temps

La figure (IV.4) On observe trois phases ; **Ph (10h:00-11 h:20)** : La température d'entrée de la chambre du séchoir cylindro –parabolique doit être stable, tandis que la température d'entrée de la chambre du séchoir parabolique doit chuter à 10:40h jusqu'à 50°C puis retour à la valeur initiale

Ph (11h:20-13h :20) : La température d'entrée de la chambre est réduite dans les deux Séchoirs, où la valeur du séchoir cylindro –parabolique. Estimée à 52°C .et le séchoir parabolique à 50°C

Ph (13h:20-14h :00) :

La température d'entrée de la chambre du séchoir parabolique doit être stable, tandis que la température d'entrée de la chambre du séchoir cylindro – parabolique doit chuter jusqu'à 50°C

IV.2.5. Variation de la température de sortie des chambres en fonction de temps

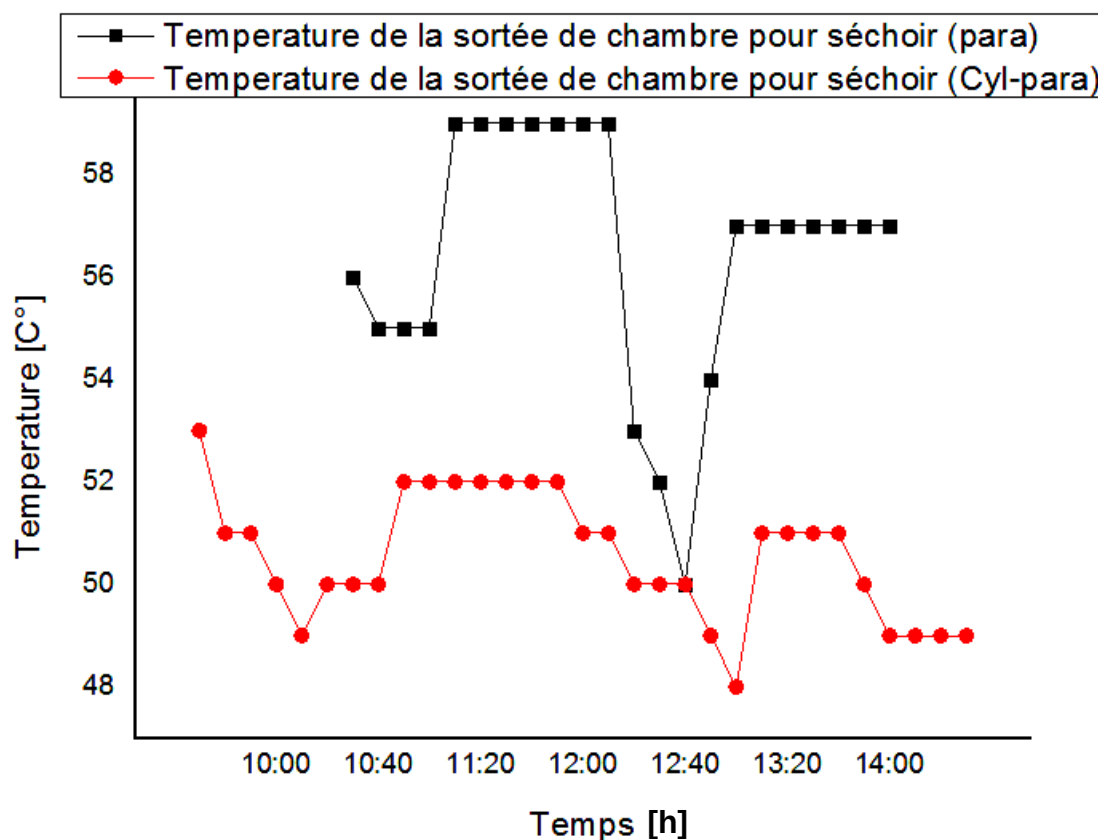


Figure IV-5: Variation de la température de Sortie des chambres en fonction de temps.

La figure(IV.5) On observe ; Les valeurs des températures de sortie de la chambre du séchoir parabolique sont supérieures aux valeurs de température sortant de la chambre du séchoir cylindro –parabolique.

Les mêmes changements de température de sortie des chambres dans les deux séchoirs, Sauf les valeurs de température de 13h:00 à 14h :00 qui sont constantes dans la chambre du séchoir–parabolique, et variables dans la chambre du séchoir cylindro –parabolique.

IV.2.6. Variation de la température de la produit de séchoir en fonction de temps

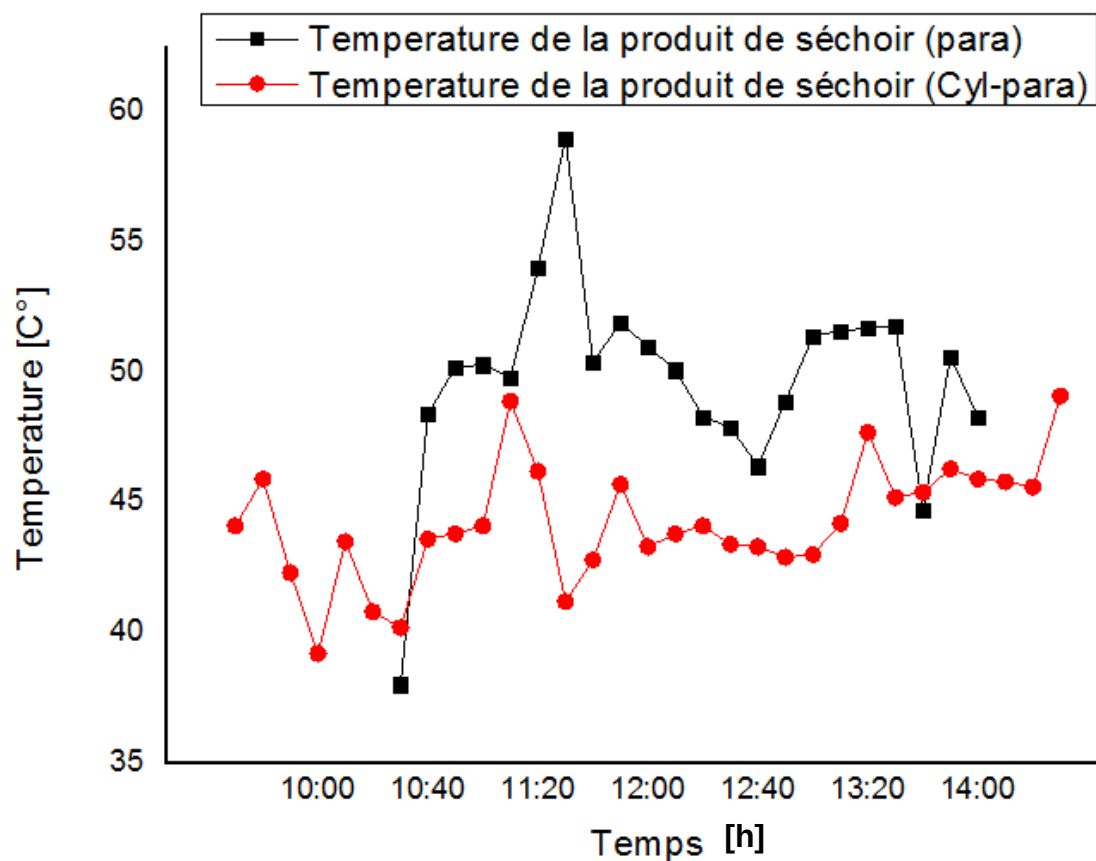


Figure IV-6 : Variation de la température de la produite du séchoir en fonction de temps.

La figure(IV.6) On observe ; Les mêmes changements de température de sortie des chambres dans les deux séchoirs.

La température maximale du produit du séchoir cylindro –parabolique 59°C et inférieure 39°C,
La température maximale du produit du séchoir parabolique 60°C et inférieure 43°C.

IV.2.7. Variation de la humidité de entre des chambres en fonction de temps

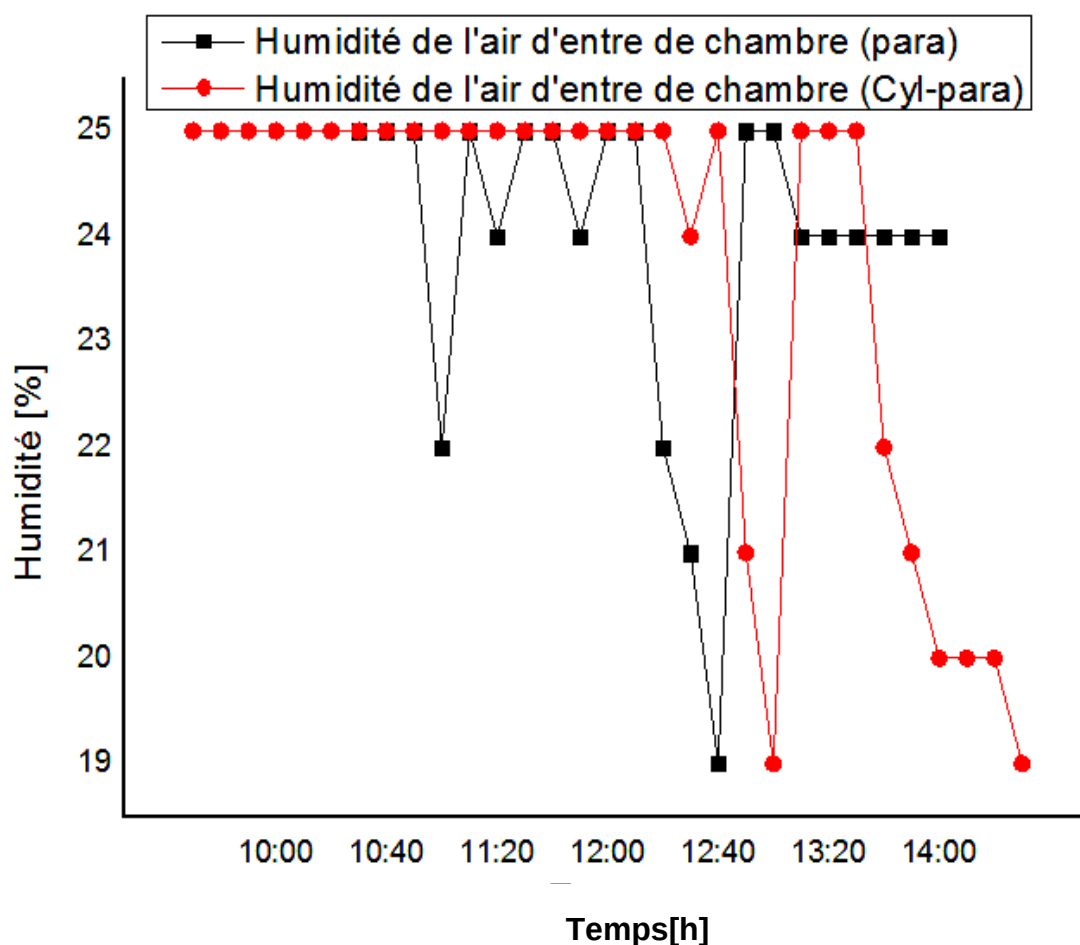


Figure IV-7: Variation de la humidité de entre des Chambers en fonction de temps

La figure (IV.7) On observe trios phases ;

Ph (10h:00 -12 h:00) ; La humidité d'entrée de la chambre du séchoir cylindro –parabolique doit être stable, tandis que la humidité d'entrée de la chambre du séchoir parabolique doit chuter et La valeur d'humidité la plus basse de cette période est 20%

Ph (12h:00 -13h :00) ; La *humidité* d'entrée de la chambre est réduite dans les deux Séchoirs, estimé à 19%.

Ph (13h:00- 14h:00) ; La t humidité d'entrée de la chambre du séchoir parabolique doit être stable, tandis que la température d'entrée de la chambre du séchoir cylindro – parabolique doit chuter jusqu'à 19%.

IV.2.8. Variation de la humidité de sortie des chambres en fonction de temps

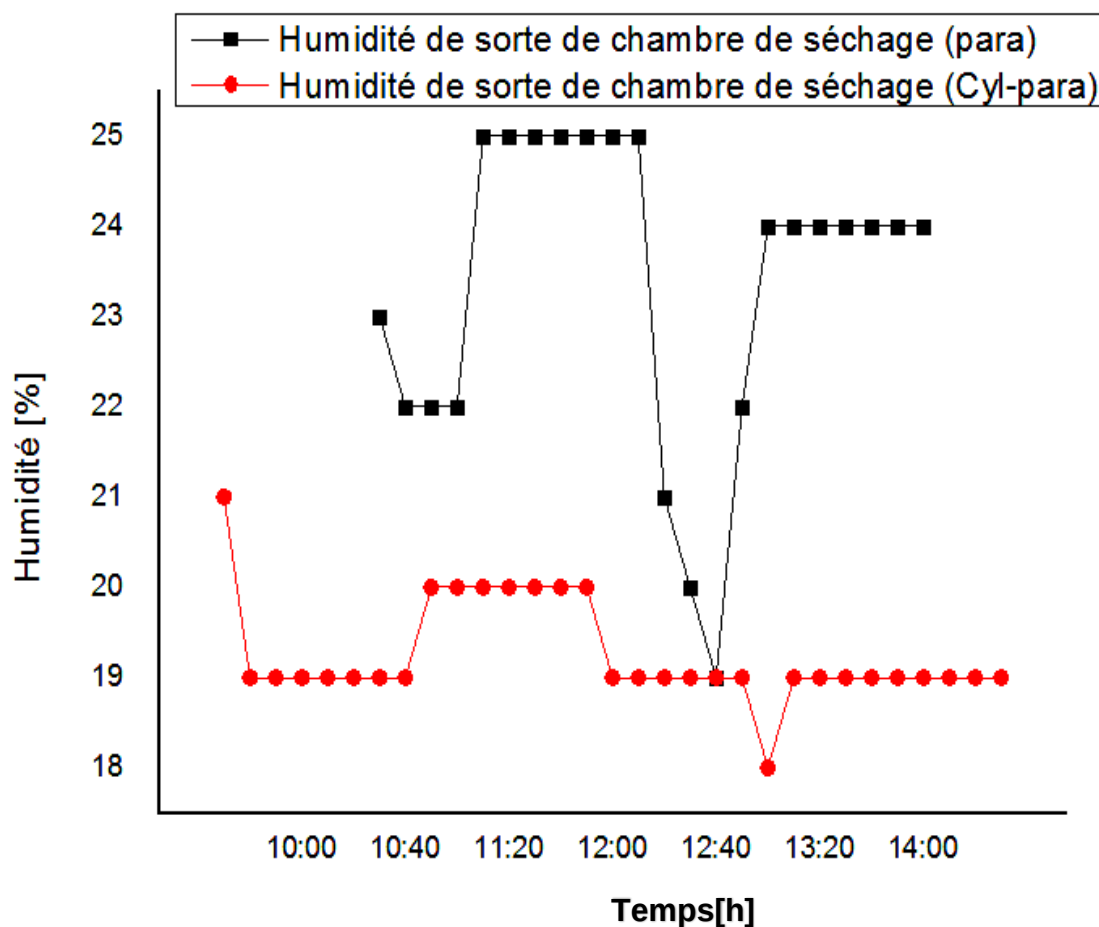


Figure IV-8: Variation de l'humidité de sortie des chambres en fonction de temps.

La figure (IV.8) On observe ;

Les valeurs de l'humidité de sortie de la chambre du séchoir parabolique sont supérieures aux valeurs de l'humidité Sortie de la chambre du séchoir cylindro –parabolique.

Les mêmes changements de l'humidité de sortie des chambres dans les deux séchoirs,

L'humidité maximale du produit du séchoir cylindro –parabolique 20% et minimal 18%

l'humidité maximale du produit du séchoir parabolique 25% et minimal 19 %

IV.2.9. Variation de la radiation solaire pour les journées 08/06/2019 de séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur parabolique et 12/06/2019 séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur cylindro-parabolique en fonction de temps

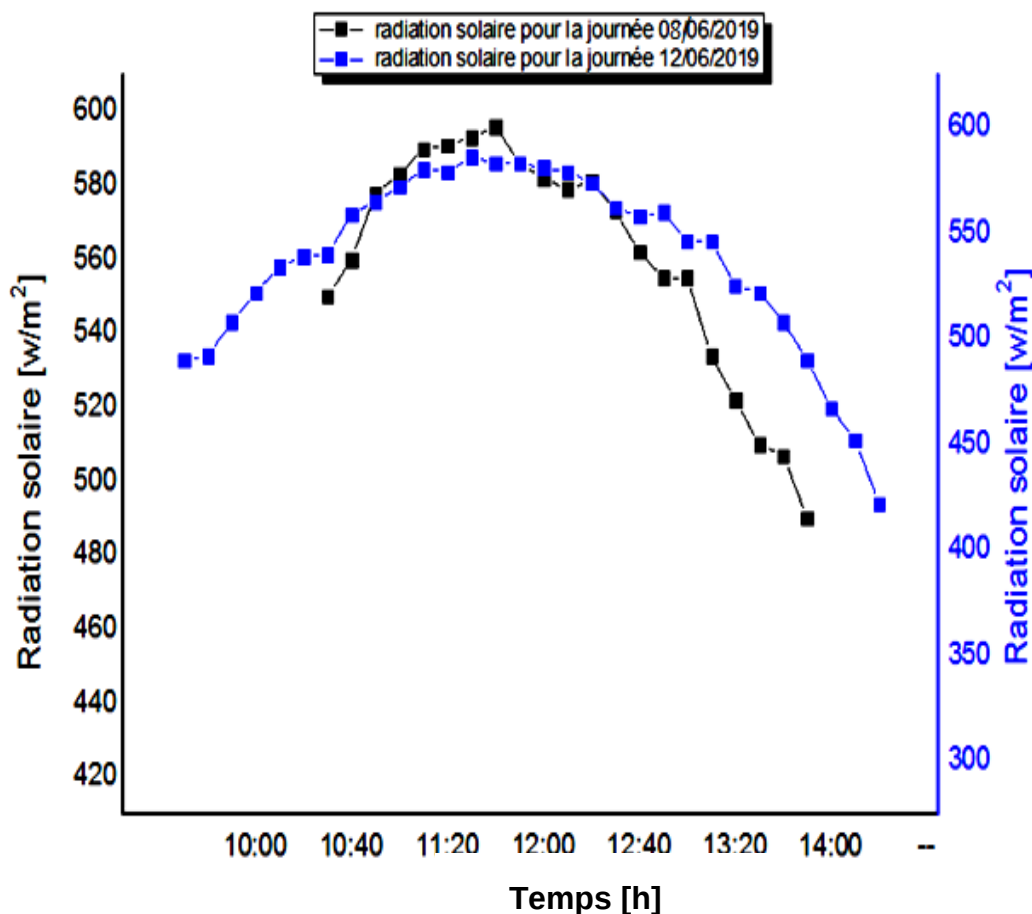


Figure IV-9: Variation de la radiation solaire pour les journées 08/06/2019 de séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur parabolique et 12/06/2019 séchage de tomate par séchoir assisté par concentrateur cylindro-parabolique en fonction de temps

La figure (IV.9) On observe ;

La valeur la plus élevée du rayonnement solaire au cours de la période 11 :20h à 12h :00 Où elle était dans la journée 08/06/2019 égal 590[w/m^2] et la journée 12/06/2019 égal 585 [w/m^2]

IV.3. Conclusions

En analysant et en comparant les résultats précédents, nous concluons que le séchoir solaire parabolique est plus rapide dans le processus de séchage au séchoir solaire cylindro parabolique

Conclusion générale

V. Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons mené une étude empirique comparative entre les deux séchoirs solaires parabolique et cylindro –parabolique, qui reposent sur la convection forcée, nous avons effectué les expériences en deux jours avec une courbe de radiation solaire proche en utilisant la tomate comme produit séché, après avoir analysé et comparé les courbes d'humidité et de changement de température dans le récepteur et dans l'entrée et la sortie de la chambre de séchage aussi le produit séché et teneur en eau , les résultats sont les suivants:

- Les températures dans le récepteur du Séchoirs solaires parabolique sont supérieures aux températures dans le récepteur du Séchoirs solaires cylindro –parabolique.
- Une chute de la masse de substance sèche dans le séchoir parabolique était plus rapide que séchoir solaire cylindro –parabolique.
- La durée de séchage de 400 g de tomates dans le séchoir solaire parabolique est de 4heures
- La durée de séchage de 400 grammes de tomates dans le séchoir solaire cylindro –parabolique est de 5 heures.
- La quantité d'humidité à la sortie de la chambre du séchoir parabolique est supérieure à celle du séchoir cylindro –parabolique.

Nous n'avons constaté que séchoir parabolique sèche plus vite que le séchoir cylindro –parabolique

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] B. E. D. V, «Solar Energy,» *Solar drying*, vol. 8 (85), pp. 1665-1691, 2011.
- [2] S. KHALDI, "Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie", Thèse de doctorat. Bourgogne Franche-Comté,Tlemcen, 2018.
- [3] J. J. BIMBENET, "Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (GIA)," p. pp34 Cité par H, 1984.
- [4] Bimbenet J.J., in *Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire*, Paris 2ème édition , Cité par H. Madjoudj, 1984, p. 34.
- [5] A. Boussalia, "Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux", Mémoire de Magistère Université Mentouri ,Constantine, 2010.
- [6] A. S. e. M. A. S. MUJUMDAR, Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers., vol. 1, Handbook of industrial drying, 1995, pp. 1-39..
- [7] A. e. C. R. CHARREAU, «Séchage: I. Théorie et calculs,» chez *Génie des procédés*, vol. 2, Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, 1991, p. 23.
- [8] S. D. A.S.Mujumdar, Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Exegex Corporation, 2000, p. 187.
- [9] N. B. CHALAL, «Étude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect,» 2008.
- [10] H. HOUHOU, "etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires", Thesis Masters ,Université Mohamed Khider , Biskra,2012.

- [11] R. A. S, "Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour : Simulation Numérique", Mémoire de Magistère, Université Kasdi Merbah , Ouargla, 2015.
- [12] A. B, "Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre", Mémoire de Magistère, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2014.
- [13] C. V. L. A. Sharma, «Solar-energy drying systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 1(7-6), pp. 1210-1185, 2009.
- [14] D. Mennouche, "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire", Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2006.
- [15] «food and nutrition library2.2,».
- <http://www.nzdl.org/gsdldmod?e=d-00000-00---off-0fnl2.2--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-0l--11-en-50---20-about---00-0-1-00---4---0-0-11-1-0utfZz-800&cl=CL1.7&d=HASHc8f5989fb5ad8cd2b433af.7.2.7>=1>.
- [16] M. C. B.K.Bala, "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier," *Renewable Energy*, vol. 28, n°. (2), pp. 190-183, February 2003.
- [17] I.NSimate, «Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers,» *Renewable Energy*, vol. 28, n° (13), pp. 435-453.
- [18] D. Mennouche, "Valorisation Des Produits Agro-Alimentaires et des plantes Médicinales Par Les Procédés De Séchage Solaire", Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2006.
- [19] A. P.Dudez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : Expériences et procédés., Paris (FRA): Guide Pratique - GRET (FRA), 1996, p. 159.
- [20] R. Dilip R.Pangavhane, «Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer,» *Energy*, vol. 27, n° (16), pp. 579-590, June 2002.

- [21] F. A. RETERI Ahmed, Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP, -: Université Abou BekrBelkaid ,Tlemcen, 2013.
- [22] A. BAHADJ, "Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre," Mémoire de Magistère ,Université Kasdi Merbah,Ouargla, 2014.
- [23] «]<https://www.energiesdouce.com/content/16-conseils-faq-panneaux-capteurs-solaires-thermiques-a-eau>,» [En ligne].
- [24] "<https://www.cooltec.ch/page6.html>," .
- [25] Z. ILHEM, "Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire", Mémoire de Magistère, Université Mentouri,Constantine, 2005.
- [26] A. e. F. FERRIERE, "Gilles. Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration," .Centre du Four Solaire,, 2004.
- [27] D. M. E. Thibaud, CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE, mmoire de magésterDJIPSU MBANG Eric Thibaud,2013.
- [28] P. D. Neyer, "Energie solaire thermique,," *Guide des Energies Renouvelables*,, mai 2003..
- [29] K. R. B.Jennifer, « Parabolic solar cookers,,» *Campus Center ForAppropriate Technology Humboldt State University*,, 2012.
- [30] R. BENCHRIFA, «. Potentiel de l'introduction de la technologie Dish/Stirling au Maroc,» Forum international sur les énergies renouvelables, Tétouane-Maroc, 8-10 mai 2002.
- [31] W. B. S. Michael Geyer, Power From The Sun, yle Centre for Regenerative Studies, 2001.
- [32] U. H. J. P. KURZWEG, «so-intensity absorber configurations for parabolic concentrators,» *Solar energy*, vol. 29, pp. p. 195-199, 1982.

- [33] M. K. C. P. Srinivasan, "A simple technique of fabrication of paraboloidal concentrators,," *Solar Energy*,, pp. 463-465, 1979.
- [34] B. D. e. M. J. D. WOOD, «ADAPTIVE FULL-SPECTRUM SOLAR ENERGY SYSTEMS Cross-Cutting R&D on adaptive full-spectrum solar energy systems for more efficient and affordable use of solar energy in buildings and hybrid photobioreactors,» University of Nevada ,, us, 2002.
- [35] A. e. G. G. SFEIR, Gérard. Ingénierie des systèmes solaires: applications à l'habitat, Technique et documentation,, 1981.
- [36] Y. AOUN, "Conception et développement d'un four solaire pour l'élaboration des oxydes métalliques-caractérisation des oxydes", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra,2016..
- [37] J. PERCEBOIS, « L'énergie solaire.,» Éditions du Centre national de la recherche scientifique, 1975.
- [38] Z. ILHEM, "Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire", Mémoire de Magistère, Université Mentouri, Constantine, Constantine, 2005.
- [39] M. samir, «"Modélisation mathématique du oncentrateur cylindro-parabolique de la centrale hybride de Hassi R'mel",» Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra,2014.
- [40] H. I. IFFOUZAR Koussaila, "Etude et réalisation d'un mécanisme de poursuiveur solaire pour un concentrateur cylindro-parabolique avec carte de commande", Mémoire de fin cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia,2013.
- [41] C. R. Charreau A., "Séchage théorie et pratique," *Technique de l'Ingénieur, génie des procédés*,, pp. 2480-1; 2480-23, 1991.

- [42] "wiképidia l'encyclopédie libre. Séchage," 3 février 2015.
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Séchage..>

الملخص:

تقدم هذه الأطروحة دراسة تجريبية مقارنة بين المجفف الشمسي القطع المكافئ والمجفف الشمسي الأسطواناني المكافئ وتهدف هذه الدراسة إلى تحديد أي المجففين الأكثر كفاءة من حيث مدة التجفيف. وقد تم استعمال شرائح الطماطم كمنتج تجفيف، وقد كانت مدة تجفيف 400 غرام من طماطم 5 ساعات في المجفف الشمسي الأسطواناني المكافئ و 4 ساعات في المجفف الشمسي القطع المكافئ. الكلمات المفتاحية: المجفف الشمسي، المجمع القطع المكافئ، المجمع الاسطواناني. التجفيف.

Résumé

Cette thèse propose une étude comparative entre les deux séchoirs solaires parabolique et cylindro -parabolique, afin de déterminer quel moyen de séchage est le plus efficace en termes de durée de séchage.

On a utilisé des tranches de tomates comme produit de séchage: le temps de séchage de 400 g de tomates était de 5 heures dans un séchoir solaire cylindro -parabolique et de 4 heures dans un séchoir solaire parabolique.

Mot clés : séchoir solaire, collecteur parabolique, collecteur cylindro parabolique, séchage.

Abstract

This thesis proposes a comparative study between the two parabolic and cylindro-parabolic solar dryers, in order to determine which means of drying is most effective in terms of drying time.

Tomato slices were used as a drying product: the drying time of 400 g of tomatoes was 5 hours in a parabolic solar dryer and 4 hours in a parabolic solar dryer.

Key words: solar dryer, parabolic collector, cylindro-parabolic collector, drying.