

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Raffinage et technologie des hydrocarbures

Présenté par :

KANOUNE Brahim

TRITIBA Abdeslam

Thème

*Etude et amélioration de l'efficacité énergétique
d'un séchoir solaire direct à convection naturelle*

Soutenu publiquement le : 01/06/2017

Devant le jury : 11: 00 PM

Mr : A.BOUBEKRI	Professeur	Président	UKM-Ouargla
Mr : M.LATI	M.A.A	Examineur	UKM-Ouargla
Mr : R.LASSOUAD	M.A.A	Examineur	UKM-Ouargla
Mr : Dj. MENNOUCHE	M.C.B	Rapporteur	UKM-Ouargla
Mr : M.SANDALI	Ingénieure	Invité	UKM-Ouargla

Année Universitaire : 2016 / 2017

Dédicaces

A mes chers parents :

A qui je dois ce que je suis, A ma mère.

A mon père qui est mon modèle.

Que Dieu leur préserve longue vie et bonne santé.

A mes frère Farouk,

A mes sœurs Moufida, Fathia, Ilham, Bouthayna.

A mes oncles, mes tantes, et mes grands-parents (que Le Bon Dieu les accueille dans son paradis)

A mes amis surtout Hassan, Ibrahim, Mouataz, Hessam, fougou, Salman, Aicha...

À tous mes amis d'enfance et du parcours scolaire et universitaire.

A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.

A ceux qui ont cru en moi

Je dédie ce modeste ouvrage.

Brahim.

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

A ce qui est été toujours la source d'inspiration et de courage....merci mon Père.

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la responsabilité....merci ma Mère.

A mes chère frères et soeurs.

A toute ma famille TRITIBA .

A tous mes amis et mes proches.

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles.

ABDE SLAM.

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah tout puissant qui nous a offert le Courage, la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail.

*Tous Nos remerciements à notre encadreur Monsieur “**DJAMEL MENNOUCHE**” de sa collaboration et de sa patience avec nous.*

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux jurys qui ont accepté de juger notre travail

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance et gratitude particulièrement à **A.HOUTI**, **S. MESSOUD**, **D. Halassa***

Enfin, merci pour toutes nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles

Merci

TABLE DES MATIERES

✓ Dédicace	
✓ Remerciement	
✓ Table Des Matières	
✓ Liste Des Figures Est des Tableaux	
✓ Nomenclature	
Introduction générale	1
CHAPITRE I	
GENERALITES SUR LE SECHAGE	
I.1. Introduction	2
I.2. Principes de séchage	2
I.3. Mode de séchage	2
I.4.Le choix du procédé de séchage	4
I.5.Vitesse de séchage	4
I.6.La cinétique du séchage	5
I.7.Les différents type des séchoirs solaires	5
I.8.Les caractéristiques de l'air de séchage	9
I.9.Caractéristiques des solides humides	9
I.10.Conclusion	11

CHAPITRE II	
L'ÉNERGIE SOLAIRE ET PHENOMENE DE TRANSFERT	
II.1.Introduction	12
II.2. Notions générales sur l'énergie solaire	12
II.3.Le soleil	
II.4 Les capteurs solaires	13
II.5. Mode de transfert de chaleur et masse	14
II.6. Le chauffe-eau solaire	16
II.7.Généralité sur l'eau d'Albien	19
II.8.Conclusion	20
CHAPITRE III	
Partie Expérimentale Et Simulation	
III.1.Introduction	21
III.2.Description du système de séchage	21
III.3. Fonctionnement du système de séchage	24
III.4. Protocole expérimental et méthodologie de travail	24
III.5. Appareillages des mesures	25
III.6. Couplage du séchoir solaire avec les apports énergétiques	25
III.7. Validation des résultats expérimentale	38
Conclusion général	43
Bibliographie	44
✓ Annexe	
✓ Résumé	

Liste de figures

N°	Titre	Page
Figure (I.1)	Le taux d'humidité du produit X_s en fonction du temps.	5
Figure (I.2)	Différents types de séchoirs solaires.	6
Figure (I.3)	Séchoir solaire direct.	7
Figure (I.4)	Le séchoir solaire intégral.	8
Figure (I.5)	Le séchoir solaire coquillage à trois claies.	8
Figure (I.6)	Description du solide humide.	10
Figure (II.1)	Mode de transfert lors du séchage.	14
Figure (II.2)	Composition d'une installation d'eau chaude sanitaire.	17
Figure (II.3)	Principe de fonctionnement d'un panneau solaire.	18
Figure(II.4)	Chauffe-eau solaire thermosiphon de 220 litres produit à L'UDES.	19
Figure (III.1)	Schéma de séchoir solaire sous serre.	21
Figure (III.2)	Représentation de l'installation de l'appoint énergétique.	22
Figure (III.3)	Représentation du circuit du procédé.	23
Figure (III.4)	Emplacement de l'échangeur.	24
Figure (III.5)	Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 12/03/2017.	25
Figure (III.6)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 12/03/2017.	26
Figure (III.7)	Variation des températures d'entrée-sortie de l'eau chaude de l'échangeur en fonction de temps pour le débit 3 l/mi (12/03/2017).	27
Figure (III.8)	Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la journée de 14/03/2017	27
Figure (III.9)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 14/03/2017	28
Figure (III.10)	Variation des températures d'entrée - sortie de l'eau chaude dans l'é changeur en fonction de temps pour le débit 3 l/min (14/03/2017).	29
Figure (III.11)	Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.	29
Figure (III.12)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.	30
Figure (III.13)	Variation des températures d'entrée - sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps pour le débit 3 l/min.(09/04/2017).	31

Figure (III.14)	Variation du Rayonnement global en fonction du temps pour la journée de 04/04/2017.	31
Figure (III.15)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 04/04/2017.	32
Figure (III.16)	Variation des températures d'entrée-sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps pour le débit 3l/min.(04/04/2017).	33
Figure (III.17)	Variation du rayonnement global en fonction du temps au cours Période d'eau chauffage. (11/04/2017)	34
Figure (III.18)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 11/04/2017.	35
Figure (III.19)	Variation des températures d'entrée - sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps.	35
Figure (III.20)	Variation du rayonnement global en fonction du temps durant Période d'eau chauffage, et stockage de l'eau chaud.	36
Figure (III.21)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 10/04/2017.	37
Figure (III.22)	Ecart de température pour les deux sources d'appoint énergétique (Fonctionnement des procédés pour 13h).	37
Figure (III.23)	Ecart de température pour les deux sources d'appoint énergétique (Fonctionnement des procédés pour 8h)	37
Figure (III.24)	Compteur de la température à 13h00.	38
Figure (III.25)	Variation de la température en fonction du temps. dans la journée de 04/04/2017.	39
Figure (III.26)	Compteur de la température.	40
Figure (III.27)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée 04/04/2017.	41
Figure (III.28)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.	41
Figure (III.29)	Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.	42

Liste des tableaux

N°	Désignations	Pages
Tableau (I.1)	Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire et du séchage à l'air libre.	3
Tableau (I.2)	Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct.	7

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
$R = -dX / dt$	Vitesse de séchage du produit	kg eau / (kg) (MS).s)
Mv	Masse d'eau évapore	kg
Ms	Masse de produit sec	kg
Mh	Masse humide du produit	kg
Me	Masse de l'eau	kg
Ma	Masse du gaz	kg
Hr	Humidité relative	%
Ha	Humidité absolue	kg eau / kg (as)
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg (MS)
S	Surface de séchage	m ²
Ps	Pression de saturation	Pascal
Pv	Tension de vapeur	Pascal
λ	Conductivité thermique de la pellicule de produit	W/ (m.K)
Φ	La quantité de chaleur	W
S	Surface d'échange considérée	m ²
T	Température	°C
Ta	Température de l'air de séchage	K
Ts	Température superficielle du produit à sèche	K
A	Coefficient d'échange par convection	W/(m ² .K)
Q _{conv}	Quantité de chaleur transférée par unité du temps	W
ρ_f	Masse volumique	kg/m ³
μ_f	Viscosité cinématique	kg/ (m.s)
D _f	Coefficient de diffusion	m ² /s
C _m	Fraction massique	%
k _f	Perméabilité intrinsèque	m ²
N	Rendement d'échangeur.	%
D	Débet d'eau	L/min
V _r	Volume de réservoir	L
t	tempe pour remplir le réservoir	Min

V	Vitesse	m/s
R	Rayonnement Solaire	W/m ²
H	Humide	%

Indice

T.a	Température ambiante
Tm.séch1	Température milieu dans séchoir avec échangeur
Tm.séch2	Température milieu dans séchoir sans échangeur
Te.éch	Température l'eau entrée l'échangeur
Ts.éch	Température l'eau sortie l'échangeur
Tm.exp	Température milieu expérimentale
Tm.sim	Température milieu simulation

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie solaire présente une source d'énergie renouvelable. Elle est gratuite, inépuisable, non polluante et disponible en abondance dans la plupart des endroits du monde. [1] L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal. [2] Cette énergie est suffisante, particulièrement en été pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agroalimentaires [3].

Le séchage solaire qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage constitue un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basses températures [6]. Le séchage pendant plusieurs jours exige un stockage des produits pendant la nuit et les journées nuageuses, ce qui conduit à certains problèmes liés à la qualité des produits, d'où la nécessité de chercher un moyen pour assurer un séchage continu et qui peut améliorer la qualité des produits séchés.

L'objectif de ce travail est d'améliorer l'efficacité énergétique d'un séchoir solaire direct à convection naturelle par l'intégration de deux types d'appoints énergétiques. Le premier appoint présente une source d'eau chaude (eau géothermale) couplée à un échangeur de chaleur, ce dernier est installé dans la chambre de séchage. Le deuxième appoint présente une installation de production d'eau chaude (chauffe-eau solaire) couplée à l'échangeur précédent.

Notre travail est structuré en deux parties :

Dans la première partie, nous décrivons les notions théoriques sur le séchage, l'énergie solaire et la technologie des chauffe-eaux solaires.

La deuxième partie de travail est consacrée à la présentation du dispositif expérimental utilisé pour le séchage, les appareils de mesure ainsi que les résultats expérimentaux obtenus à partir d'une série d'expériences effectuées au niveau du laboratoire LENREZA, en plus une étude de simulation a été présentée dans cette partie.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités Sur Le Séchage

I.1 Introduction

Le séchage est défini comme étant l'opération unitaire qui consiste à éliminer totalement, ou partiellement le solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un matériau poreux. Dans cette opération ils interviennent deux phénomènes le transfert de chaleur et le transfert de matière. [10]

On peut distinguer divers procédés de séchage. [11]

- Les procédés mécaniques (décantation, filtration et compression centrifugation).
- Les procédés thermiques par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

I.2 Principes de séchage

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement.[12]

I.3 Mode de séchage

Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, il existe dans la pratique 6 types de séchage :

I.3.1 Séchage par convection

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.

I.3.2 Séchage par conduction

Dans ces procédés l'échange thermique est obtenu par contact entre le solide humide et une paroi métallique chauffé par un fluide caloporteur, à cause du bon transfert de chaleur dans ces procédés. Cette technique est utilisée pour le produit liquide tel que le solide pâteux et le solide en suspension (mélange liquide-solide).

I.3.3 Séchage par rayonnement

On peut aussi réaliser des séchages où la transmission de chaleur se fait par rayonnement. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus ou moins complète par le produit à sécher. [13]

I.3.4 Séchage par perte diélectrique

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, ces molécules se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée.

I.3.5 La lyophilisation

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit. [13]

I.3.6 Séchage à l'air libre

Méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Tableau (I.1): Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire et du séchage à l'air libre.

Séchage sous séchoir solaire	Séchage à l'air libre
<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Réduction du temps de séchage ❖ Maîtrise de la teneur en eau finale désirée. ❖ Protection du produit contre le rayonnement ultraviolet. ❖ A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons. ❖ Maîtrise de l'opération de séchage. ❖ Energie gratuite <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Consommation de l'énergie conventionnelle (électricité, gaz, bois....) si système hybride. ❖ Investissement relativement important. ❖ Main d'œuvre qualifiée. 	<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Procédé simple et non coûteux ❖ N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée ❖ Source d'énergie solaire gratuite et non polluante ❖ Pas de dépense d'énergie ❖ Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit ❖ Peu de changement de couleur <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure). ❖ Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire. ❖ l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles aux rayonnements ultraviolets, insectes, rongeurs, perte de vitamine...etc.).

I.4 Le choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné est basé sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur : [11]

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).

I.5 Vitesse de séchage [13]

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la masse de liquide évaporé par unité de temps et par unité de surface de séchage ($\text{kg d'eau/m}^2 \cdot \text{s}$) l'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors :

$$R = \frac{-dM_v}{s \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dx}{s \cdot dt} \quad (\text{I.1})$$

$$M_v = M_s \cdot dx \quad (\text{I.2})$$

$$dX = X_e - X_s \quad (\text{I.3})$$

Avec :

M_v :Masse d'eau évaporée.

M_s :Masse de produit sec.

dX :L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération.

S :Surface de séchage.

La vitesse de séchage est une grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert. Elle est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont.

La nature, la porosité, la forme et l'humidité de produit. La température, l'humidité et La vitesse du gaz sécheur.

I.6 Cinétiques du Séchage

Malgré la diversité des matériaux séchés, les cinétiques présentent généralement une allure qui peut être décomposée en trois périodes :

On distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) .
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) .
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD) .

✓ C: est le point critique du séchage.

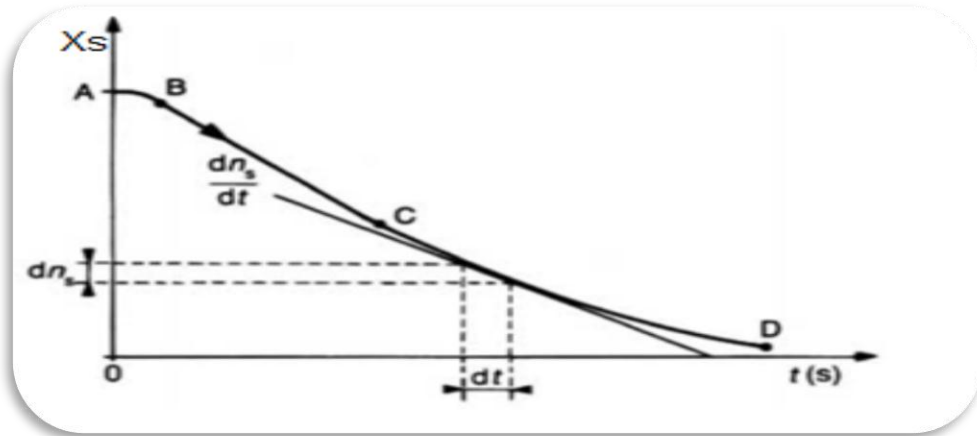


Figure I.1: le taux d'humidité du produit X_s en fonction du temps.

On note la présence unique de la phase à allure décroissante. Celle-ci est caractéristique de la majorité des produits alimentaires.

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître. La teneur en eau correspondant à la transition entre période BC et CD, est appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage [8].

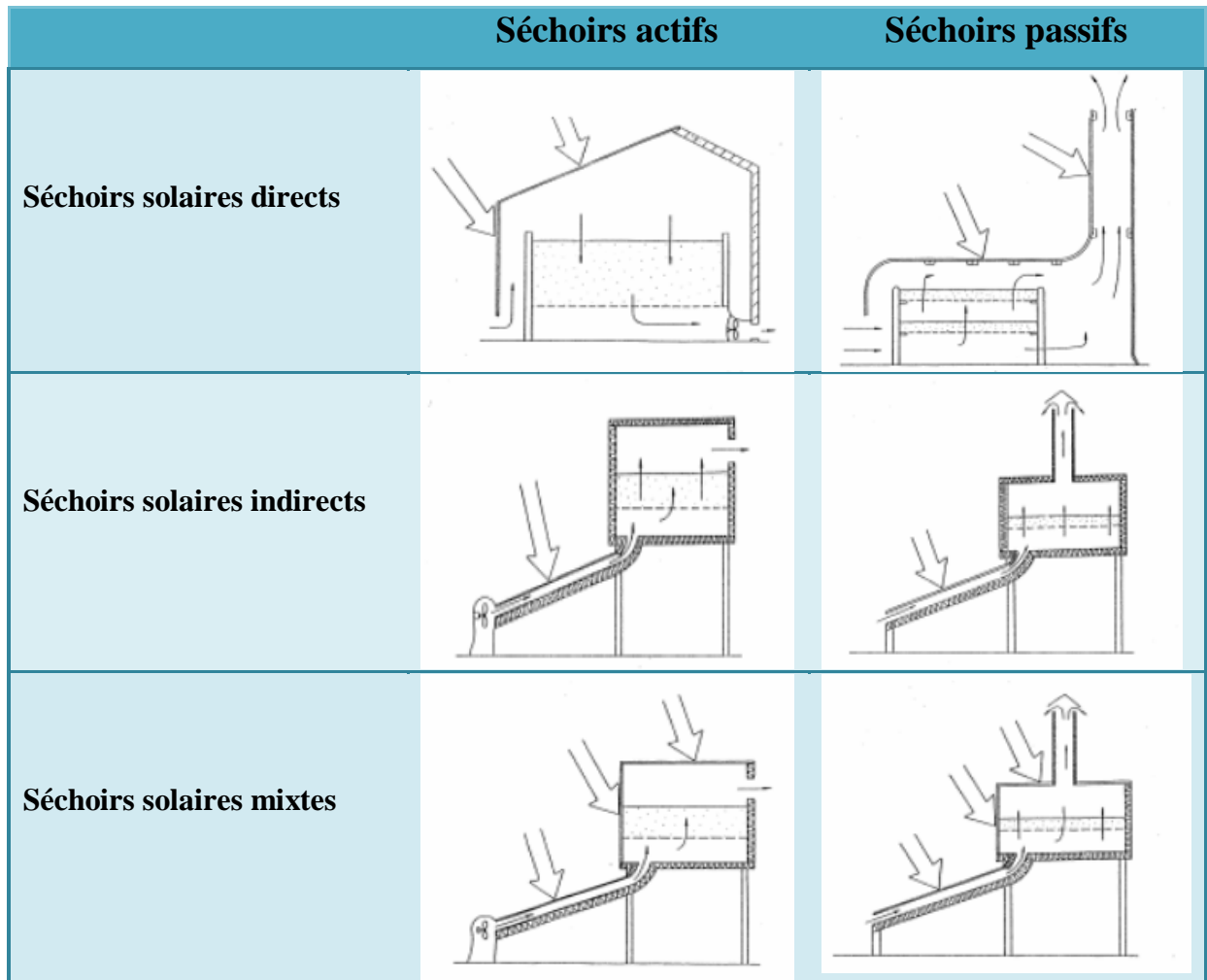
Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage.

Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit [14].

I.7 Les différents type des séchoirs solaires [15]

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs, aussi grande que la diversité des produits à sécher. Les débits de produit à sécher et leur temps de séjour dans le séchoir diffèrent d'un produit à un autre, de même l'opération de séchage peut prendre quelque minute jusqu'à plusieurs dizaines de jours.

On distingue différents classes de séchoir solaire pour produits agricoles : Figure (I.2)



- Rayonnement solaire
- Ecoulement de l'air caloporteur

Figure (I.2) Différents types de séchoirs solaires.

I.7.1 Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct Figure (I.3) 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). Néanmoins l'interaction directe rayonnement solaire – produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments.[16]



Figure (I.3): Séchoir solaire direct.

I.7.1.1 Type de séchoirs directs

- a. Le séchoir intégral à convection naturelle.
- b. La boîte de séchage ou séchoir coffre.
- c. Le séchoir solaire "coquillage".
- d. Le séchoir cabane.

Tableau (I.2): Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct.

Séchoir Solaire Direct	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. ❖ Pas besoin de main-d'œuvre qualifié. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Température élevée en fin de séchage ❖ Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil ❖ Jaunissement des légumes verts ❖ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure

a. Le séchoir intégral à convection naturelle :

Le séchoir intégral figure (I.4) est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu.

Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec [17].

Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.

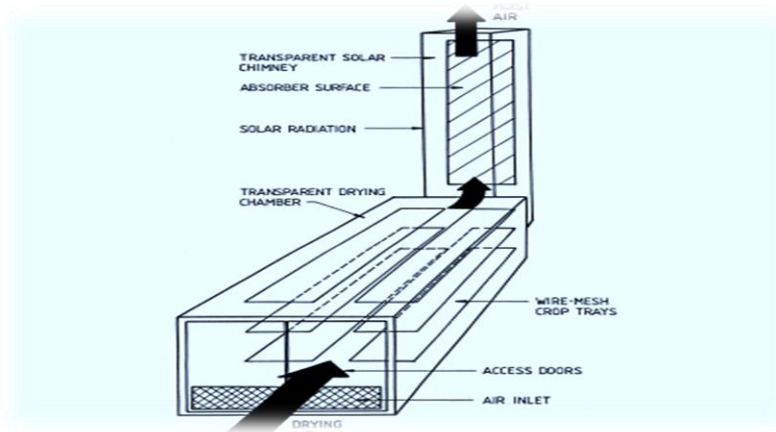


Figure (I.4): Le séchoir solaire intégral.

b. La boîte de séchage ou séchoir coffre

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande.[18].

c. Le séchoir solaire "coquillage" [19]

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes.

Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.

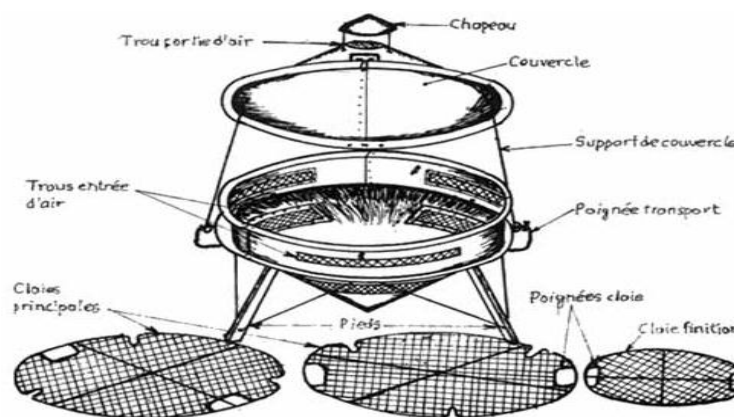


Figure (I.5): Le séchoir solaire coquillage à trois claies.

d. Le séchoir cabane

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7m².

I.8 Les caractéristiques de l'air de séchage**I.8.1 Humidité**

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

I.8.2 Humidité absolue

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (I.4).$$

I.8.3 Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.[19]

$$H_r = \frac{P_v}{P_{s,T}} \cdot 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad (I.5)$$

I.8.4 Température sèche

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

I.8.5 Température humide du gaz

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement.[9]

I.9 Caractéristiques des solides humides**I.9.1 Description du solide humide**

Avant le séchage, un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la Figure(I.6). Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces

superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.

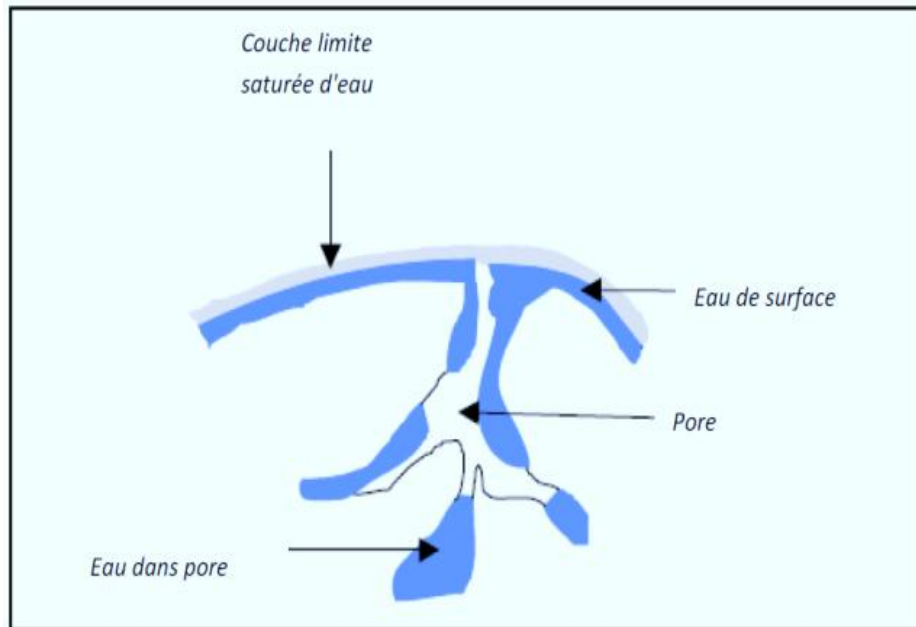


Figure (I.6): Description du solide humide.

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.9.2 Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)

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

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

I.9.3 Humidité relative (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.

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

Les deux grandeurs sont liées par les relations:

$$X_s = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (\text{I.9})$$

$$X_h = \frac{X_s}{1 + X_s} \quad (\text{I.10})$$

I.10 Conclusion

Le but du séchage est d'éliminer autant que possible l'eau. Parmi les modes de séchage, le plus simple et le plus accessible aux populations est le séchage solaire. On en distingue deux types:

- le séchage à l'air libre ou le séchage naturel.
- le séchage à l'air chaud ou le séchage artificiel qui s'effectue dans un appareil de séchage.

Pour obtenir un produit hygiénique et de bonne qualité, et pour diminuer le temps de séchage, on utilise le séchage artificiel (avec échangeur de chaleur).

Chapitre II

L'énergie Solaire Et

Phénomène De

Transfert

II.1.Introduction

L'énergie solaire est produite par le soleil à la suite de réaction de fusion thermonucléaire. Elle est la source de la plupart des énergies disponibles sur terre. L'énergie solaire se propage dans l'espace sous forme de quanta d'énergie, elle est sans cesse renouvelée.

Origine Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7(10) \text{ j/s}$.

II.2.Notions générales sur l'énergie solaire

Le rayonnement atteint le sol après avoir été diffusé, diffracté, absorbé et réfracté par des gaz de température et de densité croissante.

La constante solaire est égale à $1\,350 \text{ W/m}^2$ et fluctue d'environ 0,2 % tous les trente ans. L'intensité de l'énergie solaire réellement disponible à la surface de la terre est inférieure à la constante solaire en raison de l'absorption et de la dispersion de cette énergie, due à l'interaction des photons avec l'atmosphère, les nuages ou encore les fumées produites par la pollution.

La puissance solaire disponible en tout point de la terre dépend également du jour, de l'heure et de la latitude du point de réception. De plus, la quantité d'énergie solaire captée est fonction de l'orientation du récepteur.[22, 23]

II.2.1.Rayonnement solaire

La connaissance du rayonnement solaire dans tous ses aspects est nécessaire dans toute application de l'énergie solaire. Ce rayonnement est perturbés à la traversée de l'atmosphère (absorption, réflexion, réfraction), chose qu'on doit prendre en considération, ainsi que la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde car les récepteurs d'énergie sont généralement sélectifs et fonctionnent dans une bande de fréquence appropriée. Pour cela on a vu utile de définir ci-dessous quelques notions essentielles pour le rayonnement solaire. [24]

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

II.2.1.1. Le rayonnement direct (ID)

C'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

II.2.1.2. Le rayonnement diffus (Id)

C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée.

II.2.1.3. Le rayonnement global (IG)

C'est la somme du rayonnement direct et diffus, nous exposerons dans ce qui suit les Expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global :

II.2.3. Le gisement solaire

Le gisement solaire représente sous forme de rayonnement. L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources d'énergie naturel. Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en le soleil et l'énergie solaire.[20]

II.3. Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques.[20, 21]

II .4. Les capteurs solaires

Les capteurs solaires sont des systèmes, qui captent et transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation est obtenue à l'aide des collecteurs thermiques. Il existe deux principaux types de capteurs solaires:

- Les capteurs plans
- Les capteurs concentrateurs

II .4 1. Capteurs plans

Les capteurs plans (figures I.8.a et I.8.b) absorbent le rayonnement solaire à l'aide d'une plaque noire (absorbeur) et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduites, sa température (liquide ou air) augmente, en raison 19

de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Il est constitué d'une couverture transparente (polycarbonate, vitre), qui piège le rayonnement solaire thermique absorbé par la plaque noire qui chauffe les fluides caloporteurs à des températures inférieures à 100°C avec un rendement variant de 40% à 80 %.

II.4.2. Capteurs concentrateurs

Les capteurs solaires plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. C'est pour cela, il est possible d'utiliser des capteurs concentrateurs en demi-cercle (Paraboliques), qui concentrent le rayonnement solaire capté sur un tuyau où circule le fluide caloporteur. Cette concentration provoque une augmentation de la température qui peut atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius.

II.5. Mode de transfert de chaleur et de masse :

Le séchage est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse Figure (II.1) (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit-air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection.

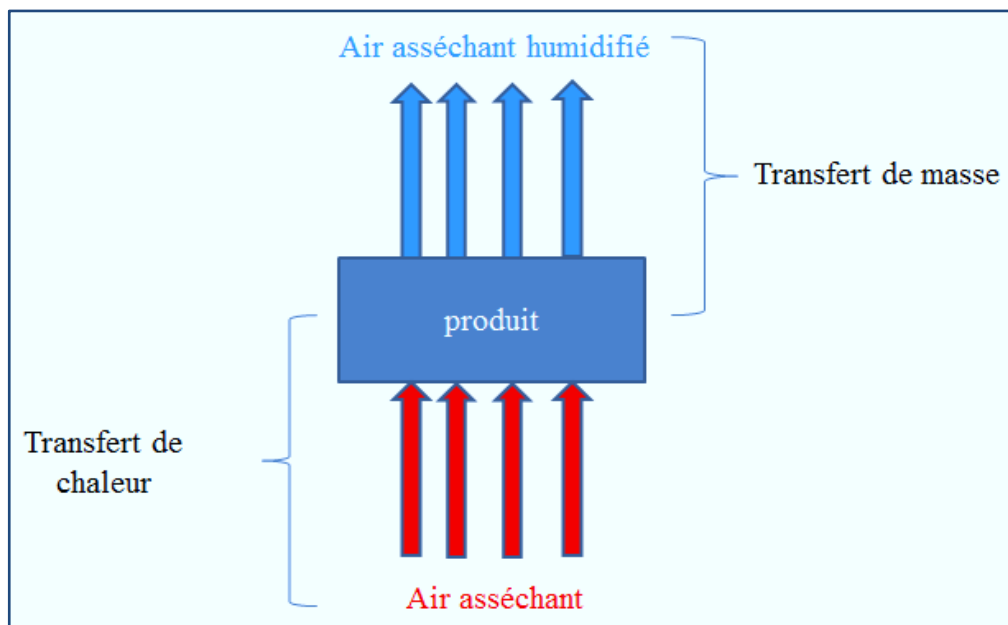


Figure (II.1) : Mode de transfert lors du séchage.

Ce transfert de chaleur se fait en deux étapes différentes :

II.5.1. Transfert par conduction: [25]

La surface du produit chauffée par l'air asséchant, cette chaleur énergie est transmise vers les couches internes du produit par conduction. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier:

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K).

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

II.5.2. Transfert par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du monde de séchage 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 fibre ou de plaques, pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide.

Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ». [26]

Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle ». [26]

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide 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. [27]

Ce type de transfert utilise l'équation suivante:

$$Q_{\text{conv}} = \alpha \cdot S \cdot (T_a - T_s) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Q_{conv} : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W)

S : La surface d'échange (m²)

$(T_a - T_s)$: l'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K)

α : Le coefficient d'échange par convection (W/m².K)

II.5.3. Transferts de métièrs ou transfert de masse

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment. [28]

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation. [28]

Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface. [7]

II.5.3.1. Loi de Fick

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D_f le coefficient de diffusion moléculaire : [29]

$$J_c = -\rho_f D_f \left(\frac{dC_m}{dX} \right) \quad (\text{II.3})$$

II.5.3.2. Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérise la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, Le paramètre pertinent du milieu est dans ce cas la perméabilité intrinsèque :

$$J_s = -\rho_f \left(\frac{k_f}{\mu_f} \right) \cdot \left(\frac{dp}{dX} \right) \quad (\text{II.4})$$

II.6. Le chauffe-eau solaire

Le chauffage de l'eau par simple exposition au rayonnement solaire est une pratique très ancienne. Aujourd'hui, la technique du chauffage par énergie solaire a atteint un degré de maturité et une maîtrise inégale. Le chauffe-eau solaire (CES) est produit dans des usines, en série, pour répondre à des besoins en eau chaude très variés. Le désigne et la taille des systèmes sont adaptés à toutes les régions et tous les niveaux de consommations.

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire comporte en

Général 5 sous-ensembles :

- un sous ensemble de captage.
- un sous-ensemble de transfert.
- un sous-ensemble de stockage.
- un sous-ensemble d'appoint.
- un sous-ensemble de distribution.

La réduction des consommations d'énergie par rapport à une installation classique, dépend du climat, du lieu d'implantation des capteurs solaires, du dimensionnement et de la conception du système, ainsi que du choix des composants et de leur maintenance. Il est donc nécessaire, lors de l'étude d'un projet, de rechercher le meilleur ajustement économique de la taille des équipements solaires aux besoins à satisfaire, ainsi qu'une conception optimale des sous-systèmes, de manière à :

- optimiser le captage et le stockage de l'énergie solaire.
- dissocier l'énergie solaire et l'énergie d'appoint.
- consommer en priorité l'énergie solaire.
- conserver à l'énergie d'appoint un caractère de stricte complémentarité.



Figure (II.2) les composant d'une installation de production d'eau chaude sanitaire.

Les températures de l'eau produite par un chauffe-eau solaire peuvent atteindre 60°C.

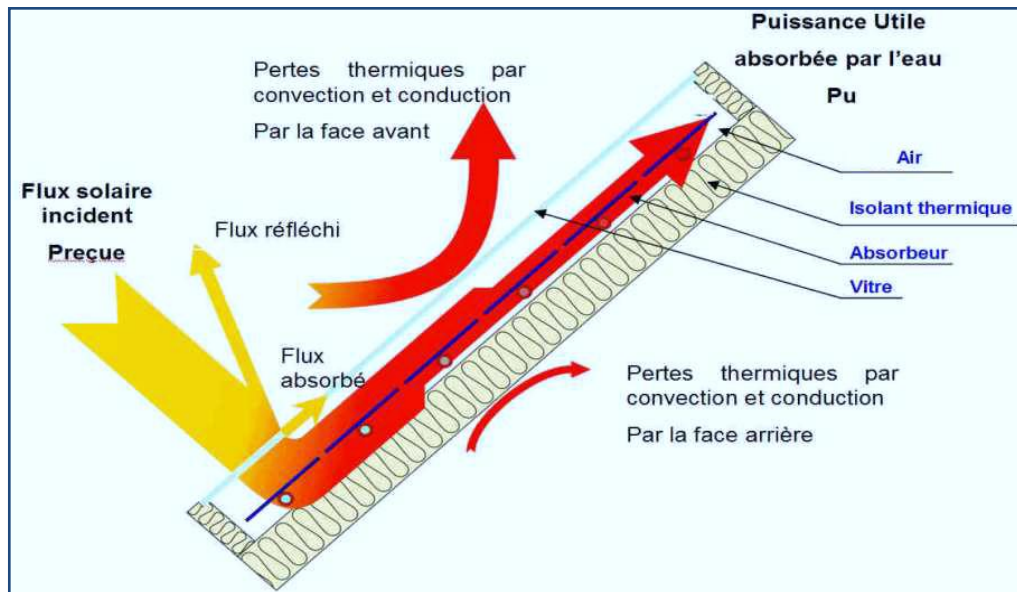
On distingue deux systèmes de circulations :

- Circulation forcée (pompe).
- Thermosiphon (Circulation par différence de densités en fonction de la température).

II.6.1.Principe de fonctionnement

Le capteur converti le rayonnement solaire en chaleur par effet de serre (assuré par le

vitrage). La chaleur absorbée par la plaque de couleur noire (absorbeur) est transférée à un fluide caloporteur qui la véhicule et le transfert, par la suite, à un ballon de stockage (cuve). L'ensemble du système doit être bien isolé pour assurer un rendement acceptable.



Figure(II.3) Principe de fonctionnement d'un panneau solaire pour le chauffage de l'eau.

II.6.2. Les types des chauffe-eau solaire

Il existe différentes catégories de chauffe-eau solaires individuels, qui dépendent essentiellement des conditions climatiques des régions dans lesquelles ils sont utilisés.

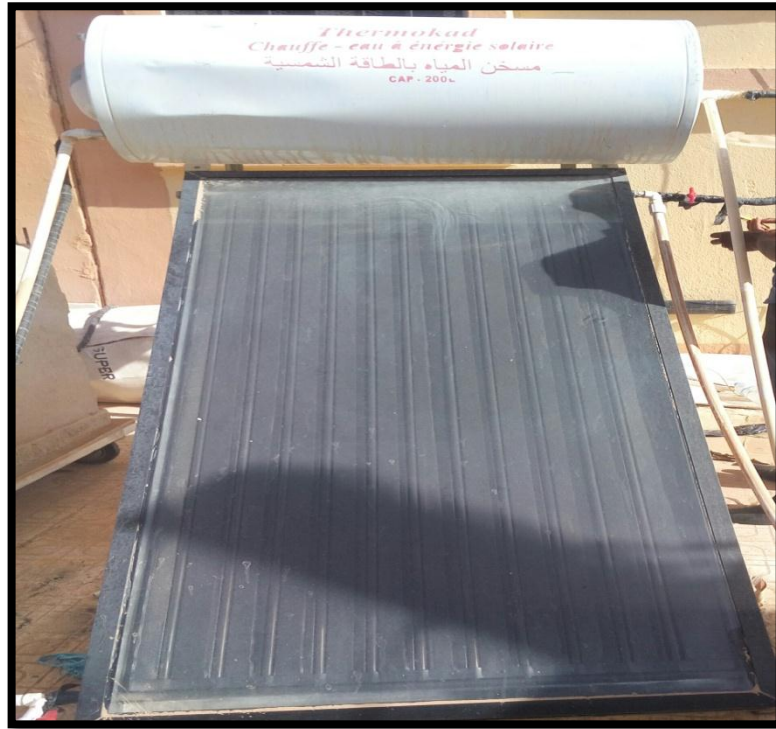
II.6.2.1. Chauffe-eau stockeur

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou auto stockeur) est très ancien. Il est constitué d'un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente. Pendant la période d'ensoleillement, la température du ballon, recouvert d'un revêtement absorbant noir, s'élève. Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type sélectif.

II.6.2.2. Chauffe-eau solaire à thermosiphon

Ce type, comme celui de L'UDES est constitué d'un capteur solaire et d'un ballon situé au-dessus de celui-ci. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau contenue dans le capteur s'échauffe et sa densité diminue, elle s'élève dans le circuit et est remplacée par de l'eau plus froide (et donc plus lourde) en provenance du ballon. C'est l'effet thermosiphon. Ce système présente de très nombreux avantages :

- Il ne comporte pas de pompes ni de régulation, et ne nécessite pas de raccordement au réseau électrique.
- Les risques de panne et de dysfonctionnement sont, par conséquent, très réduits.



Figure(II.4) Chauffe-eau solaire thermosiphon de 220 litres produit à L'UDES.

II.7. Généralité sur l'eau d'Albien

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe.

La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

- **Geysers** : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut.

Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;

- **Fumerolles** : Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère.

Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

- **Sources thermales** : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées.

Exemple : Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique.

II.7.1. La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 60°C et 150° C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m , dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions.

Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

II.7.2. La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 30 à 70°C. Elle est utilisée entre autre pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles.

II.8. Conclusion

On peut conclure que l'une des techniques utilisées pour augmenter le rendement du séchage solaire est le préchauffage par un chauffe-eau solaire. Cette technique est recommandée surtout pendant le climat nuageux ou en hiver, au début du printemps, ou à la fin d'automne quand l'ensoleillement solaire devient faible causant la chute de l'efficacité de ces appareils.

Chapitre III

Partie Expérimentale

III.1.Introduction

Cette partie présente les résultats expérimentaux de notre étude sur l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un prototype de séchoir solaire direct à convection naturelle. Ce séchoir a été installé au niveau du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) à l'université d'Ouargla.

Toutes les expériences de cette partie expérimentale ont été réalisées dans la période du 20 février au 11 Avril 2017. L'amélioration de l'efficacité énergétique est basée sur l'intégration de deux formes d'apport énergétique :

1. Un système de chauffage constitué d'un échangeur tubulaire alimenté par une source d'eau chaude (l'eau albien).
2. Un système de chauffage constitué d'un échangeur tubulaire alimenté par un chauffe-eau solaire.

L'objectif de notre nouveau procédé est d'assurer la continuité de l'opération de séchage pendant la nuit, ou pendant les journées nuageuses.

III.2.Description du système de séchage

Notre système de séchage est constitué de deux parties principales: un séchoir solaire et un système d'appoint énergétique (mentionné au-dessus).

III.2.1. Description du séchoir solaire

Le dispositif utilisé est schématisé sur la figure(II.1), c'est un séchoir solaire direct à convection naturelle qui se compose de deux parties ; La chambre de séchage et la cheminée :

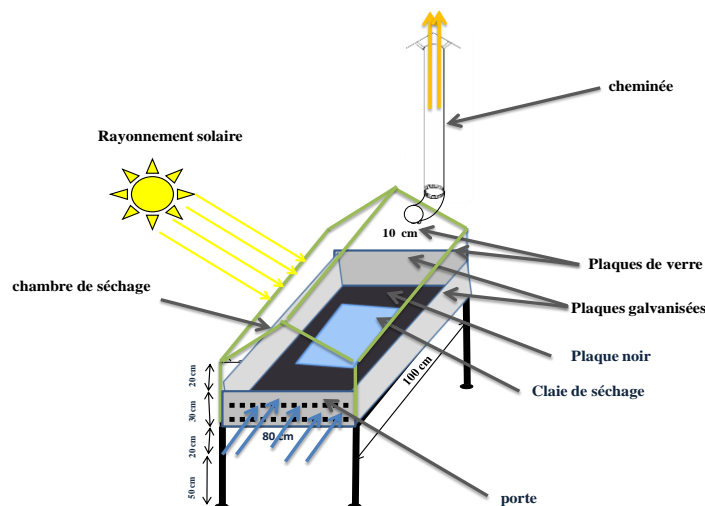


Figure (III.1) : Schéma de séchoir solaire sous serre

a- La chambre de séchage :

Elle est constituée de six plaques de verre (épaisseur = 4 mm), deux sont inclinés d'un angle de $31,57^\circ$, deux sont positionnées dans la partie avant et arrière du séchoir, et deux dans les parties latérales du séchoir. Les quatre dernière plaques de verre sont reposées sur des plaques en tôle galvanisés (épaisseur $e = 0,5$ mm) et qui sont isolées thermiquement avec le polystyrène. La plaque situer dans l'avant du séchoir représente la porte de la chambre, elle est perforée de deux rangées de trous dont le diamètre est de 1cm et la distance inter axiale égale à ($d= 5$ cm). La perforation est faite de sorte que les trous d'aération soient au même niveau que la claie comportant le produit.

La base de la chambre est composé de deux plaques en tôle galvanisés, séparées avec le polystyrène, l'une des plaques est peinte en noir et considéré comme absorbeur. La chambre de séchage est posée sur un support métallique.

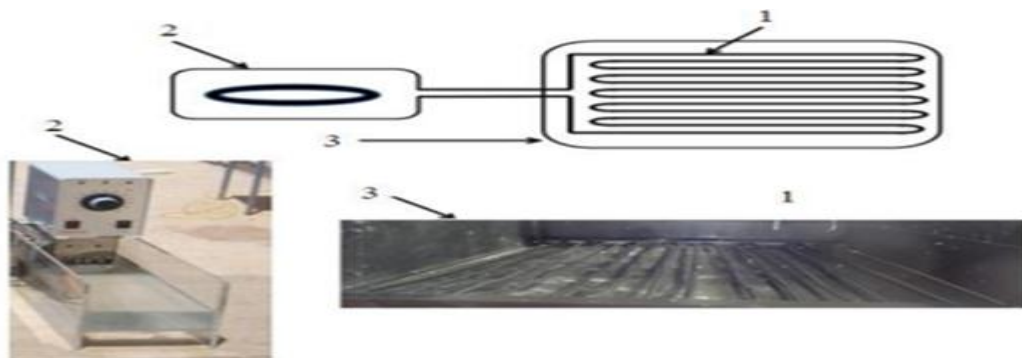
b- La cheminée

La cheminée du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisé de hauteur de 1 m et de diamètre de 10 cm. Cette cheminée joue le rôle d'un aspirateur de l'air circulant à l'intérieur de la chambre de séchoir solaire.

III.2.2 Description de système de chauffage (Appoint énergétique)

III.2.2.1: Système de chauffage avec échangeur de chaleur alimenté par une sources d'eau chaude

Cette installation est pour but d'assurer la continuité de l'opération de séchage pendant la nuit, ou pendant les journées nuageuses. C'est une combinaison d'un dispositif de simulation de l'eau Albien (l'eau géothermal) et un échangeur de chaleur Eau/Air figure(III.2).



1- Echangeur de chaleur. 2- source d'eau chaude. 3- chambre de séchage

Figure III.2: Représentation de l'installation de l'appoint énergétique.

a- Le dispositif de simulation de l'eau d'Albien

Il s'agit d'un appareil constitué de :

- Un bac de capacité de 10 l.
- Une résistance qui sert à chauffer l'eau contenue dans le bac.
- Un thermostat pour maintenir la température de l'eau fixé à 70°C.
- Une pompe intégrée qui donne un débit de 3 l/min.

III.2.2.2. Système de chauffage avec échangeur de chaleur alimenté par un chauffe-eau solaire.

Il s'agit d'un échangeur de chaleur couplé avec un chauffe-eau solaire de type monobloc (le capteur plan et le ballon sont assemblés en un seul composant). Où le ballon est placé plus haut que le capteur (FigureII-3).

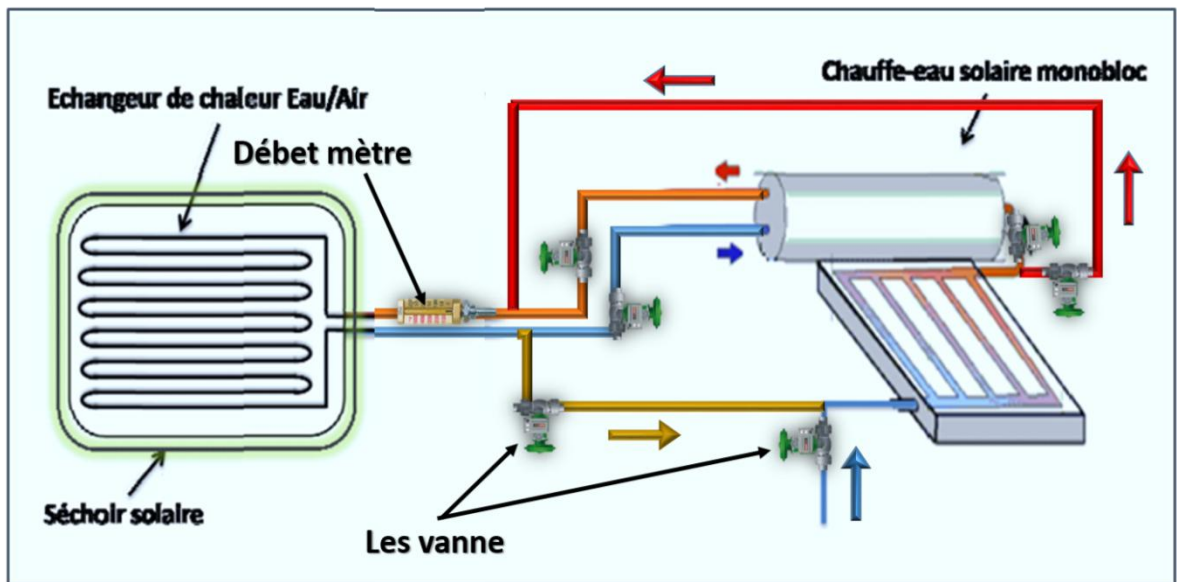


Figure III.3: Représentation du circuit du procédé.

III.2.2.3. Description de l'échangeur de chaleur

C'est le dispositif qui permet de transférer de l'énergie thermique de l'eau vers la claie de séchage par conduction et vers l'air de séchage par convection. Il s'agit d'un échangeur de chaleur tubulaire construit à partir d'un tube de cuivre double étage, de diamètre (1/0.9 cm) on 24 tubes, dont la longueur de chaque un est de 85cm. et de longueur totale 25 m, les parois extérieures de l'échangeur sont peintes en noir et elles sont considérées comme absorbeur. Cet échangeur est placé sur l'absorbeur dans la chambre de séchage du séchoir solaire.



Figure III.4 : Emplacement de l'échangeur

III.3. Fonctionnement du système de séchage

III.3.1. Pendant la journée

Les rayons solaires frappent directement la plaque noire et l'échangeur. L'air frais arrivé de l'extérieur passe par les trous perforés du séchoir solaire, il traverse la surface de l'échangeur, sa température augmente sous l'effet de serre et l'effet de la source d'eau chaude, enfin l'air chaud est évacué à l'extérieur à travers la cheminée

III.3.2. Pendant la nuit

Généralement pendant la nuit, notre procédé de séchage est fonctionné uniquement par le système de chauffage (apport énergétique).

III.4. Protocole expérimental et méthodologie de travail

La méthodologie de travail consiste :

- Préparations des installations de chauffage.
- L'installation d'appareils de mesure.
- L'expérimentation.

III.4.2. La réalisation de l'installation de l'eau chaude

Consiste à réaliser le circuit schématisé dans la figure (III-2), et aussi à vérifier les tuyaux et l'isolation thermique, afin d'éviter toutes les pertes et les fuites pendant le fonctionnement du procédé.

III.4.3. La préparation du séchoir

Afin d'assurer un bon fonctionnement de séchoir solaire, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes:

- Nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noire du capteur solaire.
- Vérification de toutes les fuites dans la chambre de séchage.
- L'installation de différents appareils de mesure.

III.5.Appareillages des mesures

III.5.1.Mesure du rayonnement solaire

L'étude sur le rayonnement global ne considère que les heures comprises entre 8 et 18 h généralement. En dehors de cette plage horaire, le rayonnement est trop faible pour une utilisation énergétique.

Le rayonnement global est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un Solari mètre (type Mod. DS 120)(voir Annexe). Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.

III.5.2.Mesures des températures

Les mesures des températures ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$, T_a) s'effectuent à l'aide des thermocouples de type K. Les résultats sont affichés sur le système d'acquisition.

III.5.3.Mesure de débit

La mesure de débit de l'eau chaud est effectuée à l'aide d'un débit mètre (rota mètre).

III.6. Couplage du séchoir solaire avec les apports énergétiques

III.6.1. Cas N°1: Echangeur de chaleur alimenté par la source de l'eau albien

III.6.1.1. Fonctionnement du procédé pour une journée ensoleillée.

Pour bien savoir l'effet de l'apport énergétique, nous avons effectués nos expériences à la présence d'un autre prototype de séchoir sans appoint.

III.6.1.1.1. Variation du rayonnement solaire global

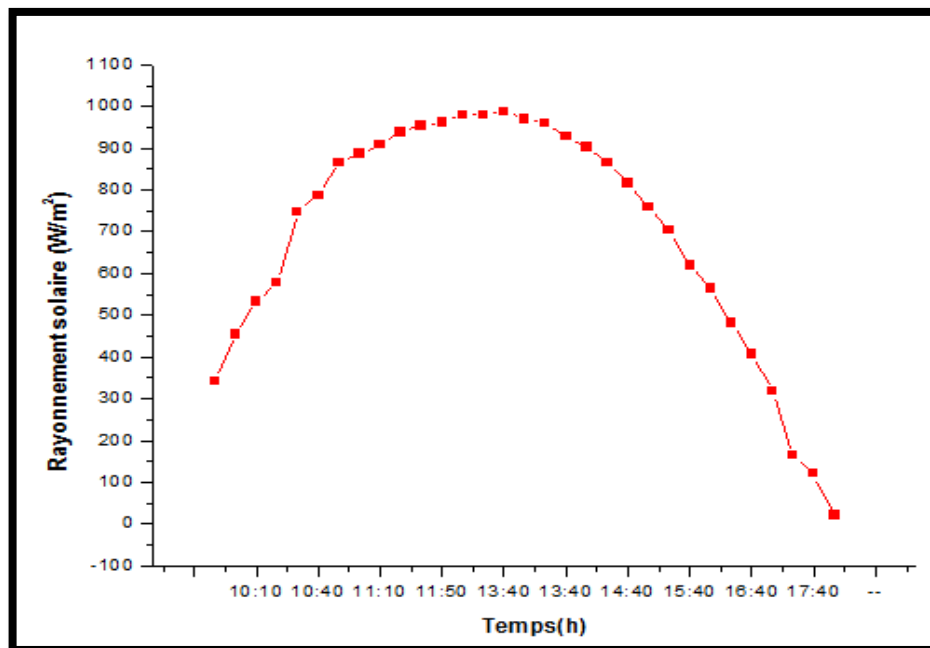


Figure III-5 : Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 12/03/2017.

La figure (III-5) montre la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la journée (à partir de 10h00 jusqu'au 18 h). On remarque que la courbe présente une forme gaussienne, dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ 988 (W/m^2) à 13:30min.

III.6.1.1.2. Variation des températures

La figure (III-6) présente les variations des températures ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$, T_a) en fonction du temps, pendant la période de fonctionnement de notre procédé. Nous avons constaté que la température de l'air ambiante (T_a) est comprise entre 23 et 25°C. La température de l'air au milieu du séchoir solaire 1 (avec appoint) est varié dans l'intervalle de 40°C à 65°C, elle est plus élevée que la température de l'air dans le séchoir solaire 2 (sans appoint), cette dernière est varié dans l'intervalle de 30 °C à 50 °C.

Ce résultat montre que l'intégration d'un appoint énergétique dans le séchoir solaire (pendant la journée), permet d'augmenter l'efficacité énergétique du séchoir et de rendre notre procédé plus efficace que celle d'un procédé sans appoint énergétiques.

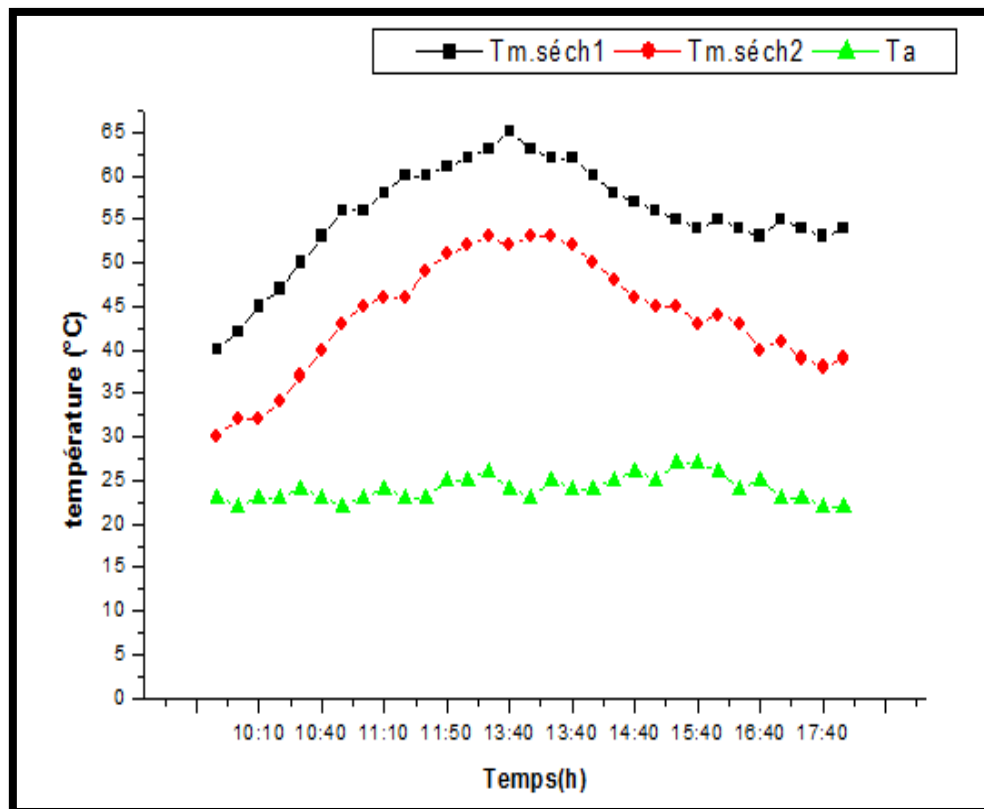


figure III-6 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 12/03/2017.

III.6.1.1.3. Variation des températures de l'eau chaude dans l'échangeur

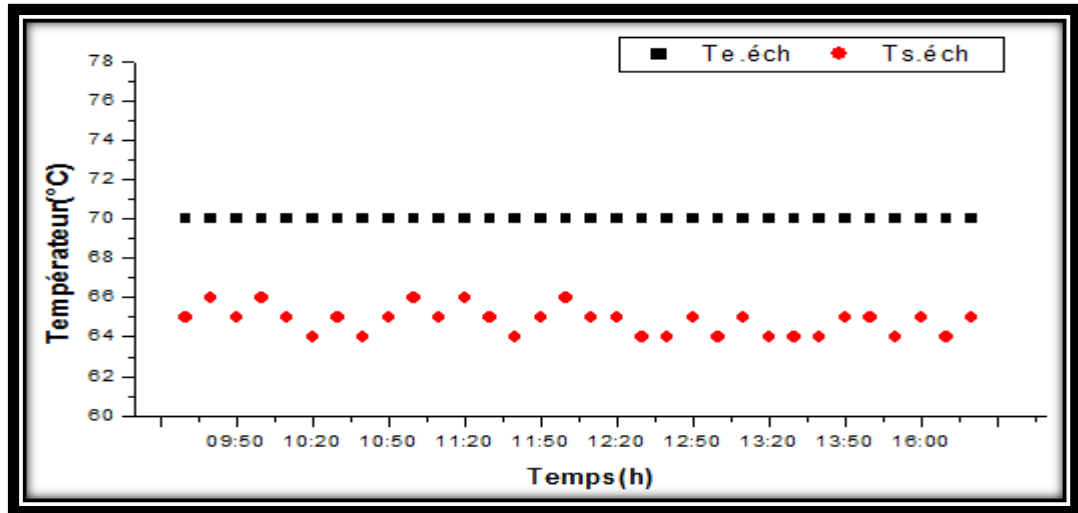


Figure. III-7 : Variation des températures d'entrée-sortie de l'eau chaude de l'échangeur en fonction du temps pour un débit de 3 l/min (12/03/2017).

La figure (III-7) présente la variation des températures d'entrée- sortie de l'eau chaude dans l'échangeur au cours de la période de séchage pour un débit fixé à 3 l/min. Cette figure montre que l'écart de température d'entrée - sortie de l'échangeur (Te.éch, Ts.éch) est de l'ordre de 6°C

III.6.1.2. Fonctionnement du procédé pour une journée nuageuse.

III.6.1.2.1. Variation du rayonnement solaire

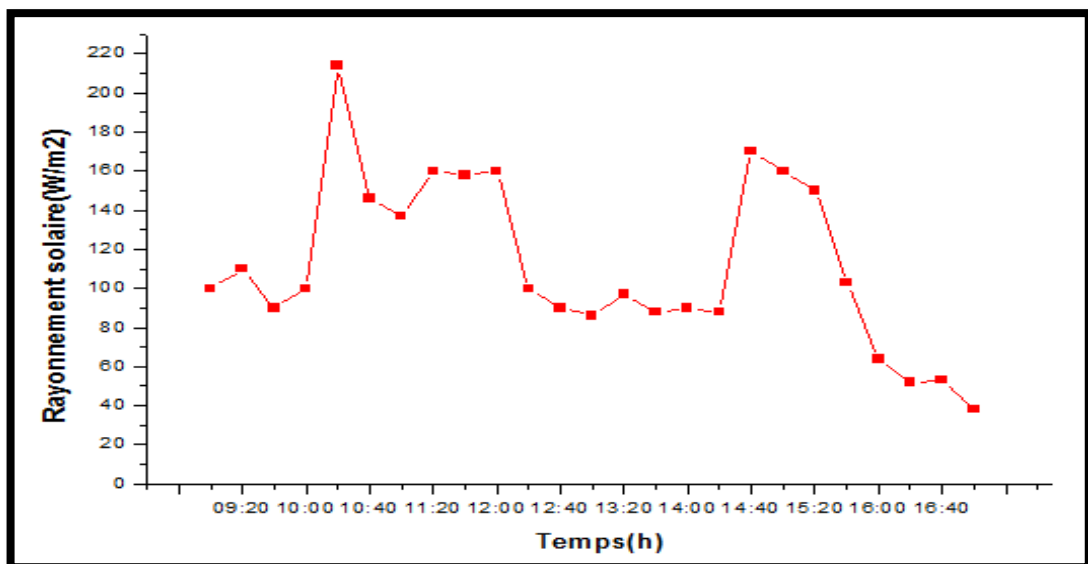


Figure III-8 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la journée de 14/03/2017.

La figure (III-8) montre la variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour une journée nuageuse. On remarque que la courbe présente des fluctuations entre 40 et 212 W/m^2 pendant le fonctionnement de notre procédé.

III.6.1.2.2. Variation des températures

Figure (III-9) illustre la variation des températures (T_m . séch1, T_m . séch2, T_a) en fonction du temps. On remarque que la température de l'air ambiante (T_a) est variée entre 17 et 23 °C. L'entrée de l'air dans la chambre de séchoir avec appoint favorise une augmentation de la température qui variée dans l'intervalle de 33 °C à 50 °C, par contre dans le séchoir sans appoint, elle varie dans l'intervalle de 23 °C à 37 °C.

L'effet de l'intégration de l'apport énergétique dans ce cas (journée nuageuse) est bien remarquable car il maintient la température du séchoir solaire avec appoint plus élevé que celle du séchoir sans appoint.

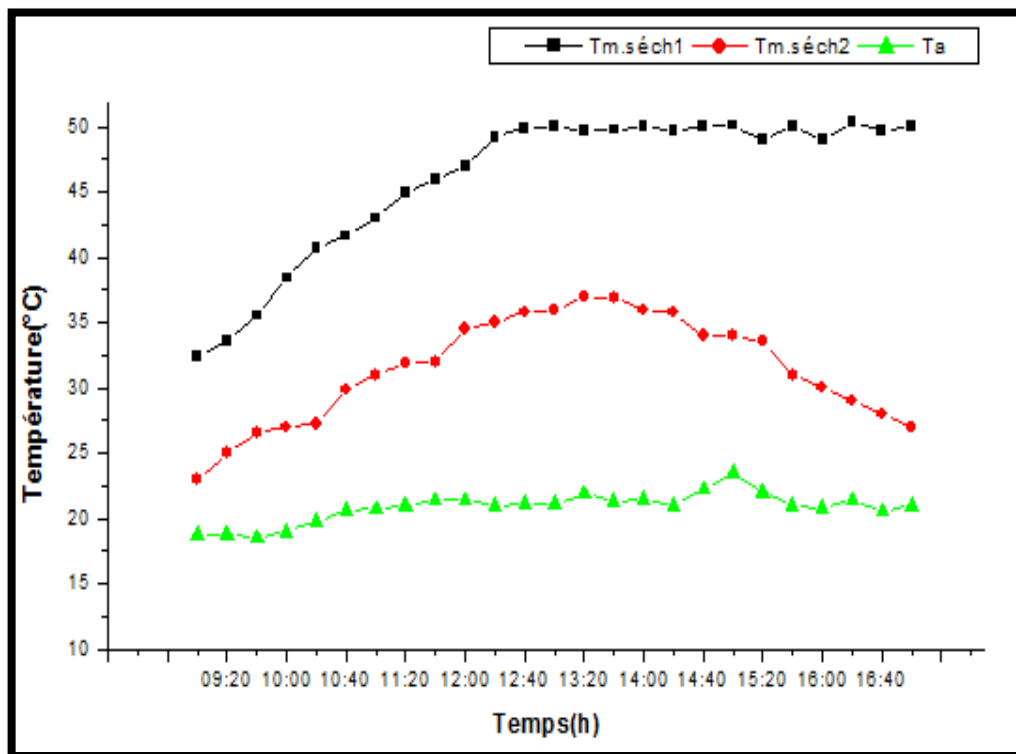


Figure III-9 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 14/03/2017

III.6.1.2.3. Variation des températures de l'eau chaude dans l'échangeur

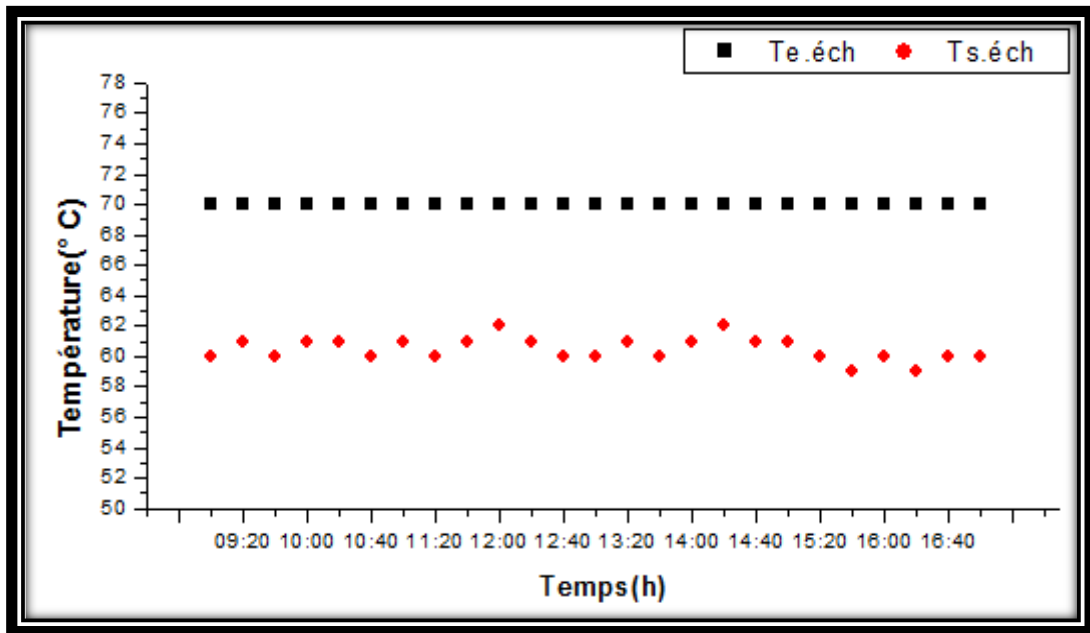


Figure III-10 : Variation des températures d'entrée - sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction du temps pour un débit de 3 l/min (14/03/2017).

La figure (III-10) présente la variation des températures d'entrée- sortie de l'eau de l'échangeur en fonction du temps. La figure montre que l'écart de la température entre l'entrée et la sortie d'échangeur (Te.éch, Ts.éch) est d'environ 8 à 10°C.

III.6.1.3. Fonctionnement du procédé pour une période nuageuse.de 24 heures

III.6.1.3.1. Variation du rayonnement solaire global

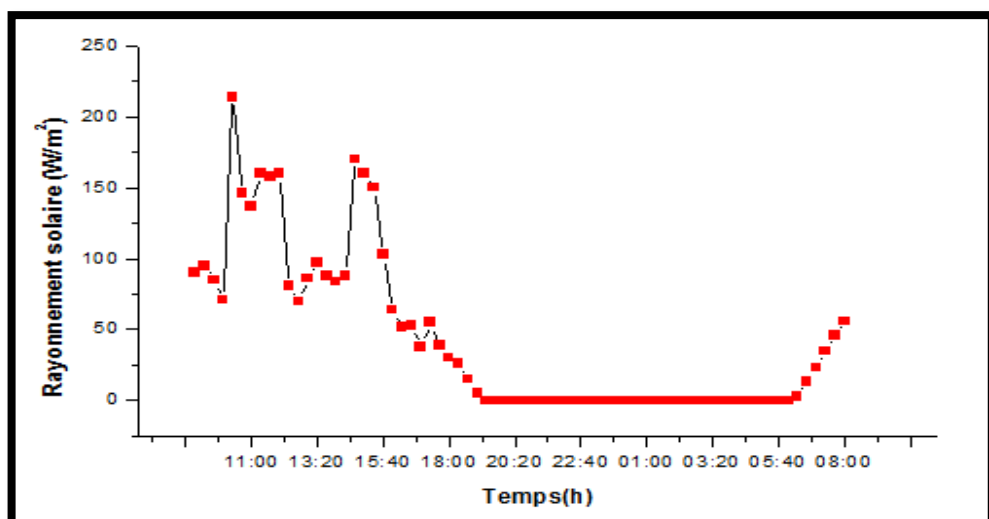


Figure III-11 : Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.

La figure (III-11) montre la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant une période de 24 heures. On remarque, que durant la période (nuageuse) de 10h jusqu'à 19h, le rayonnement présente des fluctuations de l'ordre de 90 w/m^2 jusqu'à 240 w/m^2 . Pendant la nuit, le rayonnement est nul, et enfin pour la période du 6h jusqu'à 8h le rayonnement commence à augmenter.

III.6.1.3.2. Variation des températures

La figure(III-12) montre les variations des températures ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$) en fonction du temps pendant la période de fonctionnement du procédé. On remarque que la température de l'air dans le séchoir solaire avec appoint ($T_{m.séch1}$) est presque stable pendant la période du fonctionnement du procédé, elle est de l'ordre de 50°C . Par contre, la température de l'air dans le séchoir sans appoint ($T_{m.séch2}$) est variée entre 19°C et 27°C pendant la journée et 8 et 13°C pendant la nuit. La remarque importante dans le cas de l'intégration de l'apport énergétique dans une journée nuageuse, est l'écart de température qui atteint un maximum de 36°C pendant la période de la nuit.

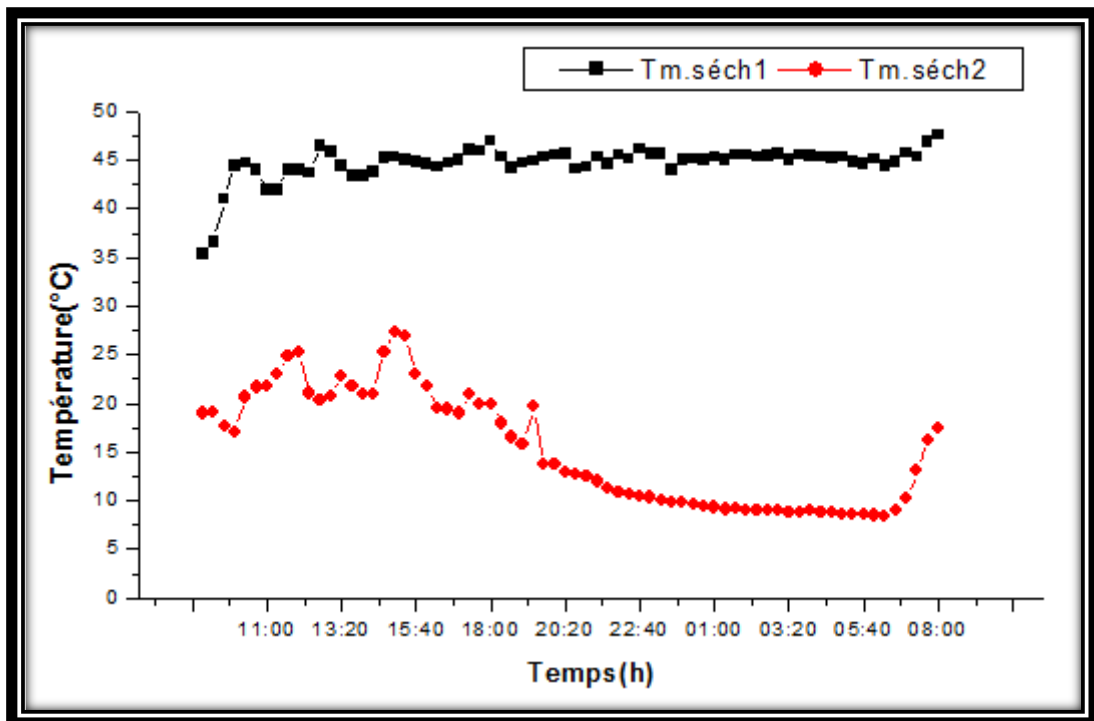


Figure III-12 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.

III.6.1.3.3. Variation des températures de l'eau chaude dans l'échangeur.

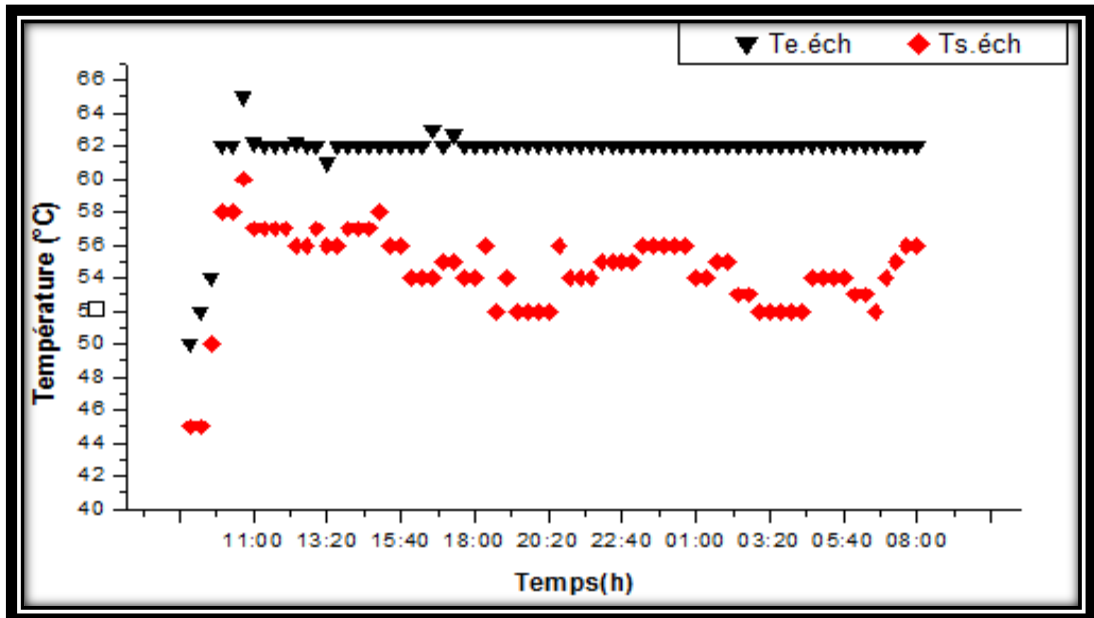


Figure III.13 : Variation des températures d'entrée et sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps pour le débit 3 l/min.(09/04/2017).

La Figure (III.13) présente la variation des températures d'entrée -sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction du temps. Cette figure montre que la différence entre la température d'entrée-sortie d'échangeur ($T_{e.éch1}$, $T_{s.éch2}$) est d'environ 5 °C.

III.6.1.4. Fonctionnement du procédé pour une journée ensoleillée. à 24 heures

III.6.1.4.1. Variation du rayonnement solaire global

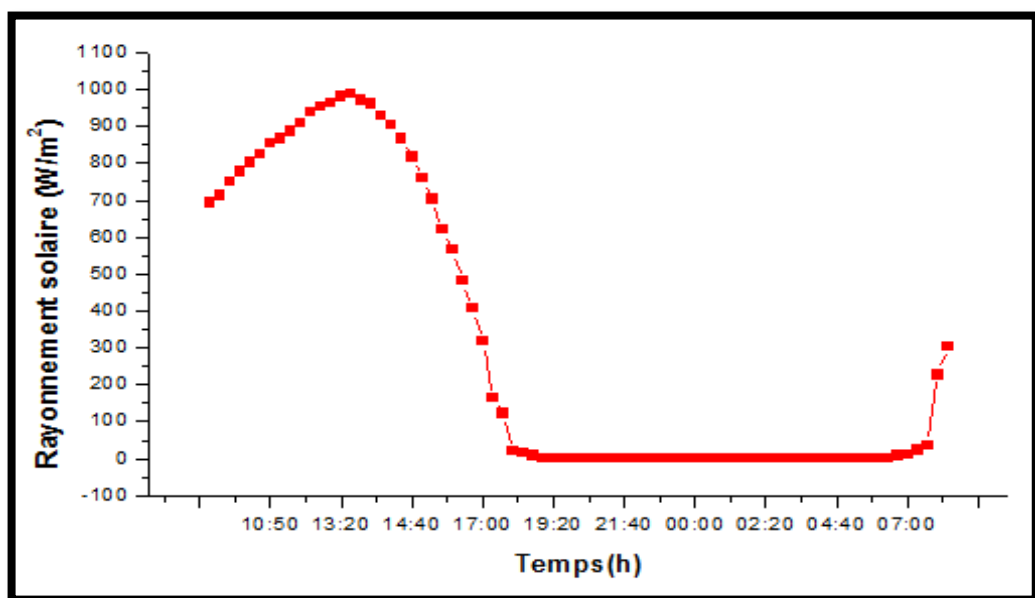


Figure III-14 : Variation du Rayonnement global en fonction du temps pour la journée de 04/04/2017.

La figure (III.14) présente la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période du fonctionnement du procédé de séchage.(24heures).

On remarque que la courbe du rayonnement présente une forme gaussienne, dont la valeur maximale est d'environ 988 (W/m^2) à 13h30min. Pendant la nuit le rayonnement devient nul et à partir du 6h il commence à augmenter.

III.6.1.4.2.Variation des températures

La figure(III-15) montre la distribution de la température ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$, T_a) en fonction du temps. On remarque que la température de l'air ambiant (T_a) est variée entre 20 et 27°C pendant la journée, et entre 10 et 20° C pendant la nuit. Concernant les températures ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$), on observe clairement que le comportement des courbes de la température (pendant la journée) est le même que celle du rayonnement, c.-à-d. que lorsque la température augmente le rayonnement augmente et vice-versa. On peut noter aussi l'existence d'un écart important entre les deux températures, cet écart est de l'ordre de 21°C pendant la journée et de l'ordre de 33°C pendant la nuit. Les résultats expérimentales de cette partie, montre que l'intégration d'un apport énergétique reste importante même pour les journées ensoleillé

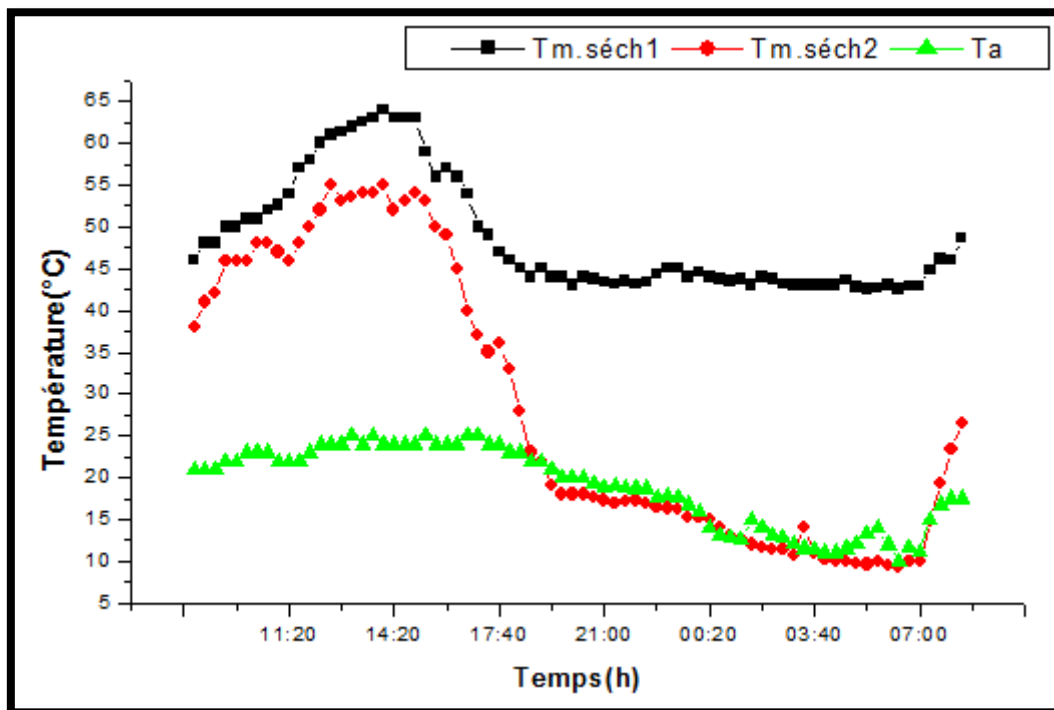


Figure III-15 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 04/04/2017.

III.6.1.4.3. Variation des températures de l'eau chaude dans l'échangeur

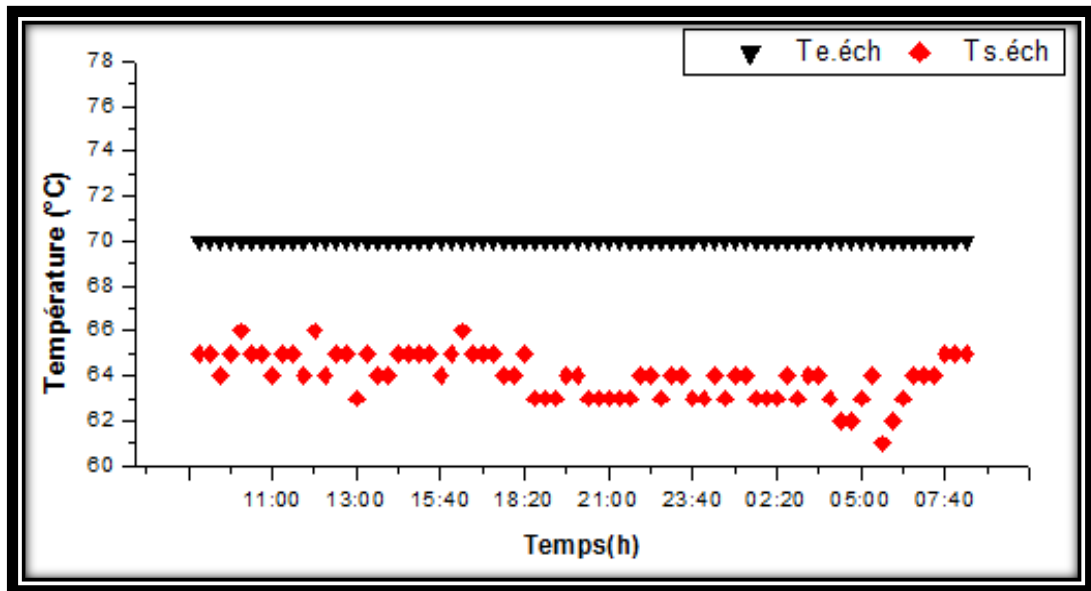


Figure III.16 : Variation des températures d'entrée - sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps pour le débit 3 l/min (04/04/2017).

La figure (III.16) présente la variation des températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction du temps. Cette figure montre que la différence entre la température d'entrée et de sortie d'échangeur ($T_{e.éch}$, $T_{s.éch}$) est d'environ 5°C.

III.6.2. Cas N°2: Echangeur de chaleur alimenté par le chauffe-eau solaire

L'objectif de cette partie est d'améliorer l'efficacité énergétique du séchoir solaire avec une deuxième source de chaleur qui est le chauffe-eau solaire.

III.6.2.1. Fonctionnement du procédé pour une journée ensoleillée (alimentation direct sans stockage).

Notre chauffe-eau solaire est alimenté par une source d'eau froide, dont la sortie du capteur à eau est directement connectée avec l'échangeur de chaleur. Le débit volumique de l'écoulement de l'eau dans l'échangeur est de l'ordre de 3 l/min.

III.6.2.1.1. Variation du rayonnement solaire global

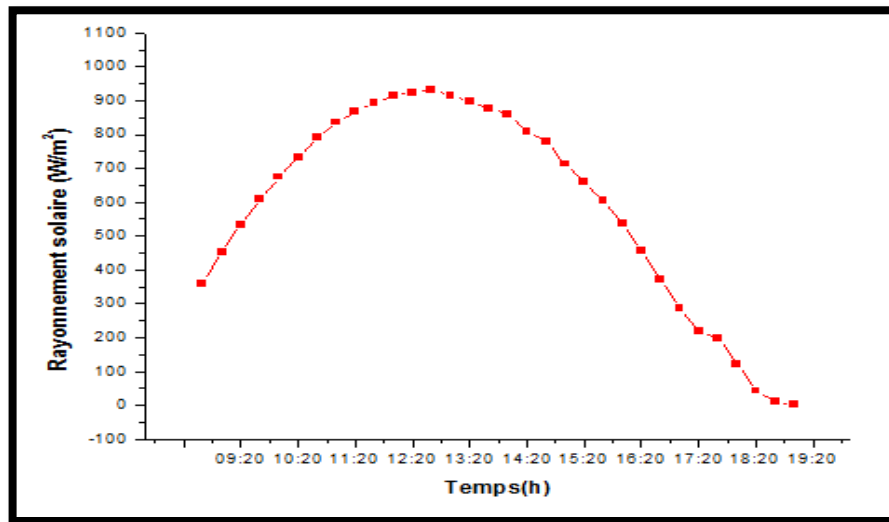


Figure III.17 : Variation du rayonnement global en fonction du temps au cours période d'eau chauffage.(11/04/2017)

La figure (III.17) présente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour une journée ensoleillée. Il convient de noter que la courbe est de forme gaussienne avec la valeur maximale du rayonnement est de $995 W/m^2$ à 12h 30min.

III.6.2.1.2. Variation des températures

La figure (III-18) présente la variation des ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$, T_a) en fonction du temps durant la période du fonctionnement. Nous avons constaté que la température de l'air ambiante (T_a) est comprise entre 21 et 30°C. La variation de la température de l'air dans le séchoir solaire (avec appoint) est variée dans l'intervalle de 40 °C à 64 °C, par contre dans le séchoir sans appoint, elle variée dans l'intervalle de 28 °C à 54 °C.

L'écart de température entre les séchoirs avec et sans apport énergétique qui est dans l'intervalle de 3 à 13°C, montre que l'intégration de la source de chauffe-eau solaire comme apport énergétique, permet d'améliorer l'efficacité énergétique de notre séchoir.

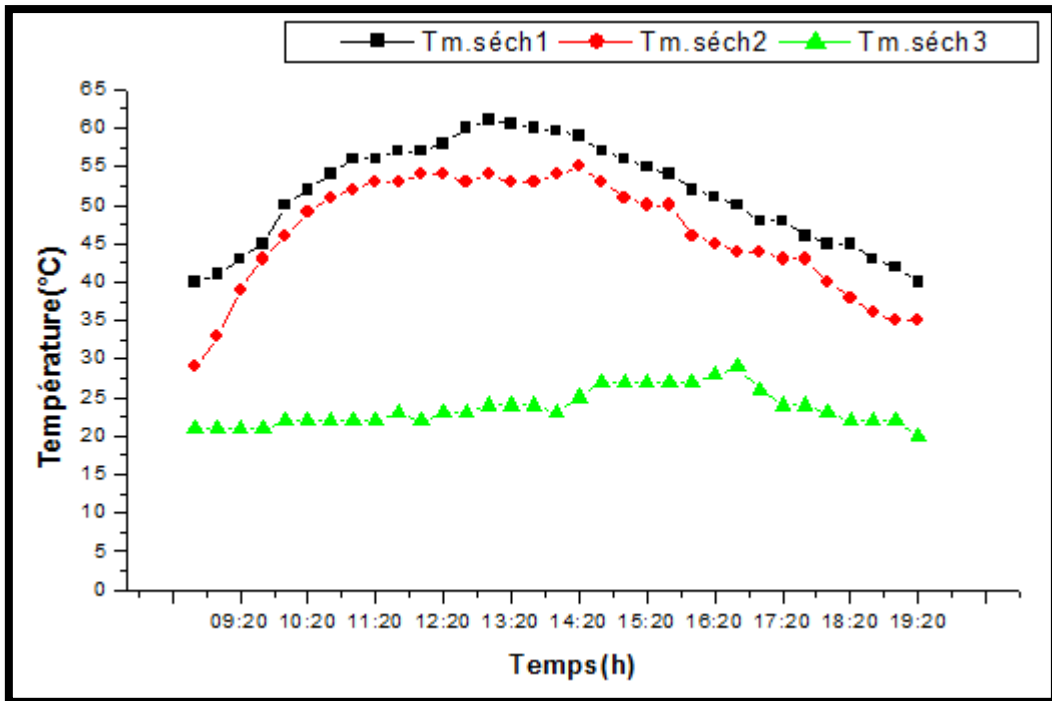


Figure III-18 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 11/04/2017

III.6.2.1.3. Variation des températures de l'eau chaude dans l'échangeur

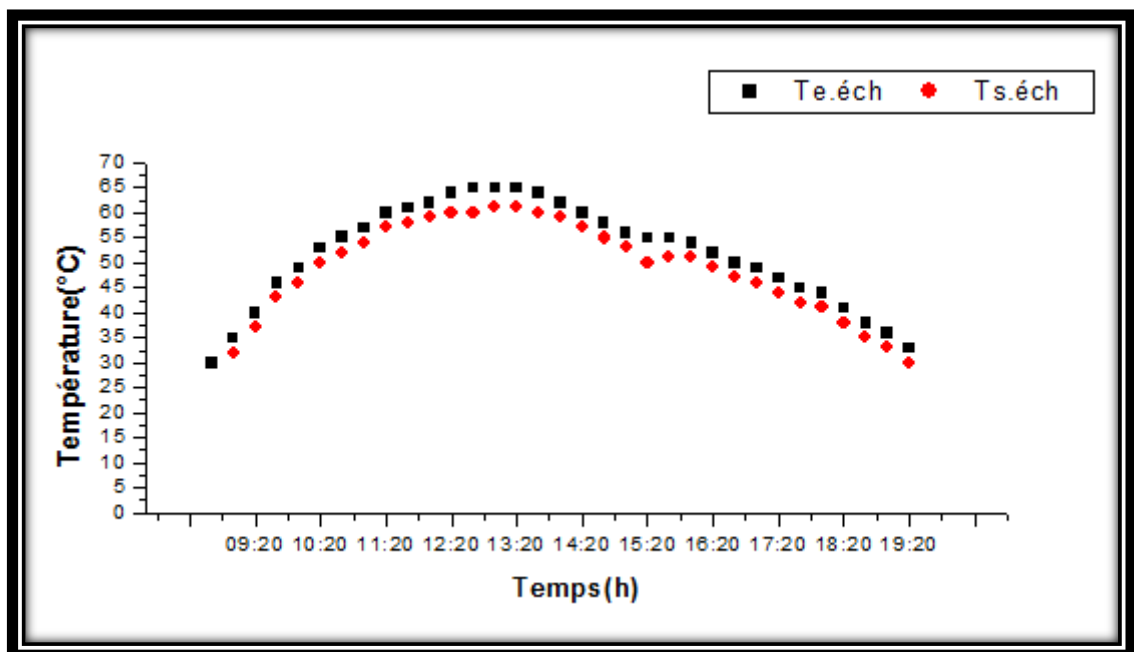


Figure III-19 : Variation des températures d'entrée- sortie de l'eau chaude dans l'échangeur en fonction de temps.

La figure (III. 19) présente la variation des températures d'entrée - sortie d'eau chaude dans l'échangeur en fonction du temps. Il est bien noté sur cette figure que les températures (Te.éch, Ts.éch) présentent le même comportement que celle du rayonnement solaire, dont la

température d'entrée est variée dans l'intervalle de 20 à 62°C et la température de sortie est variée dans l'intervalle de 18°C à 58°C.

III.6.2.2 Fonctionnement du procédé pour une journée ensoleillée (alimentation direct avec stockage) à 13h

Dans ce cas, le chauffe-eau solaire est alimenté par une source d'eau froide, dont la sortie du capteur à eau, est connectée d'une part avec l'échangeur (connexion direct) de chaleur et d'autre part, elle est connectée avec le ballon de stockage. Vers 18h ; ou le rayonnement solaire est égale 50 W/m² ; on arrête l'alimentation de chauffe-eau solaire avec l'eau froid et on remplace la connexion direct avec l'échangeur par une alimentation à partir du ballon de stockage (connexion ballon).

III.6.2.2.1. Variation du rayonnement solaire global

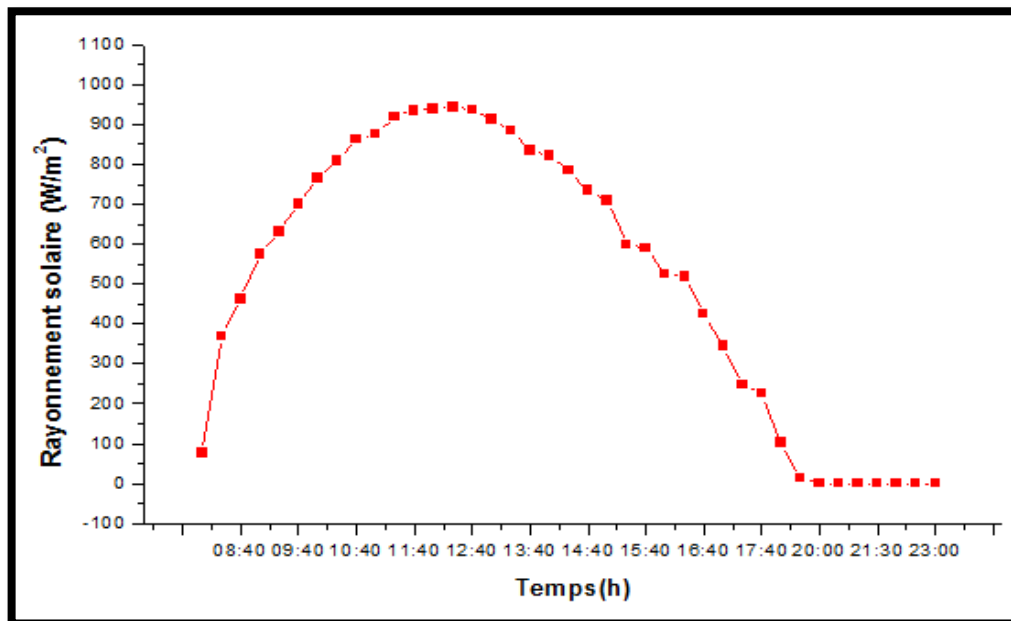


Figure III.20 :Variation du rayonnement global en fonction du temps durant Période d'eau chauffage, et stockage de l'eau chaud.

La figure (III.20) présente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps, on remarque qu'à partir du 8h jusqu'à 19h00, la courbe du rayonnement est le même comportement que celle des courbes précédente pour les journées ensoleillées. Pour le reste de la période de fonctionnement de notre procédé, le rayonnement est nul.

III.6.2.2.2. Variation des températures

La figure (III-21) présente la variation de la température ($T_{m.séch1}$, $T_{m.séch2}$, T_a) en fonction du temps. On remarque que pour la période de connexion direct, Les variations des températures de l'air dans les séchoirs avec et sans appoint sont variées dans l'intervalle de 40

°C à 60 °C et de 30°C à 45°C respectivement, par contre pour la période de connexion ballon, la température (Tm.séch1) reste proche de 45°C et (Tm.séch2) variée dans l'intervalle de à 20°C à 30°C. Concernent (T.a), on constate une variation de 19°C à 22°C.

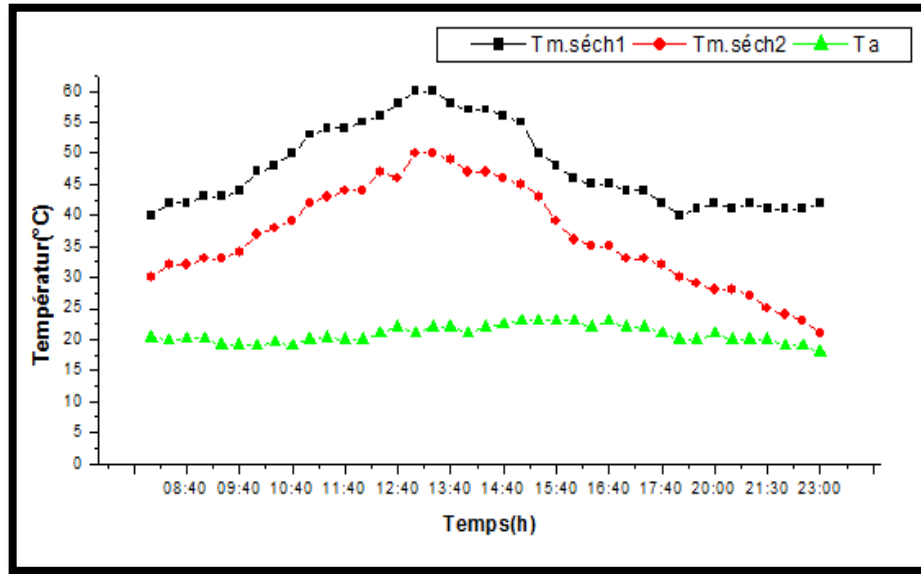


Figure III-21 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 10/04/2017.

III.6.3.L'écart de température entre les différents cas des fonctionnements des procédés

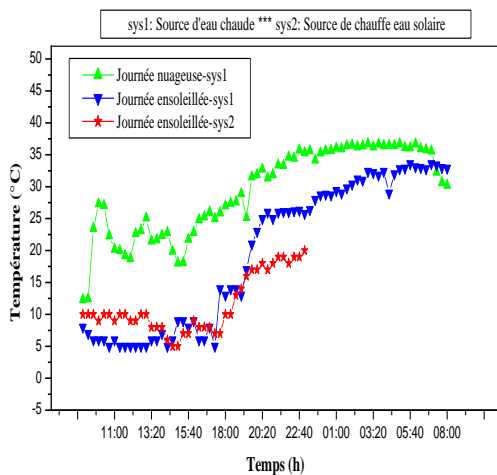


Figure III-22: Ecart de température pour les deux sources d'appoint énergétique (Fonctionnement des procédés pour 13h).

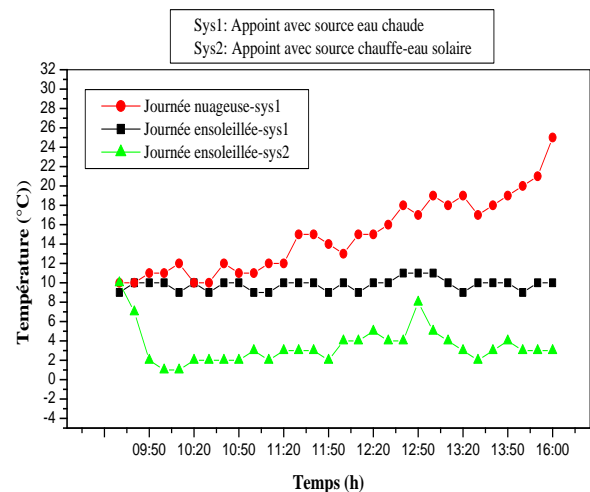


Figure III-23: Ecart de température pour les deux sources d'appoint énergétique (Fonctionnement des procédés pour 8h).

La figure (III.22) présente les différents écarts de température pour les deux systèmes (sys 1, sys 2) d'appoints utilisés dans ce travail. On remarque que le meilleur écart de température entre les séchoirs sans et avec appoints est présenté dans le cas d'une journée nuageuse (13 h), dont l'intervalle de variation est de 12 à 36°C durant la période du fonctionnement des procédés (jour et nuit). La même remarque à été vérifié sur la figure (III.23) (8 h de fonctionnement) où l'intervalle de variation est de 10 à 26°C. Ces résultats montrent que l'efficacité énergétique de notre séchoir solaire est meilleur pour l'utilisation d'un appoint fonctionne avec une source d'eau chaude (eau géothermal) et pour les cas des journées nuageuses, soit on travail durant la journée ou bien jour et nuit.

III.7. Validation des résultats expérimentale

III.7.1.Introduction

Pour confirmer l'exactitude de notre travail expérimentale, on a utilisé la simulation par le logiciel fluent, les résultats donnés par ce programme ont été présentée par les figures ci-dessous.

III.7.2. Fonctionnement du procédé pour une journée ensoleillée 24h

III.7.2.1.Conteurs de la température du séchoir sans échangeur

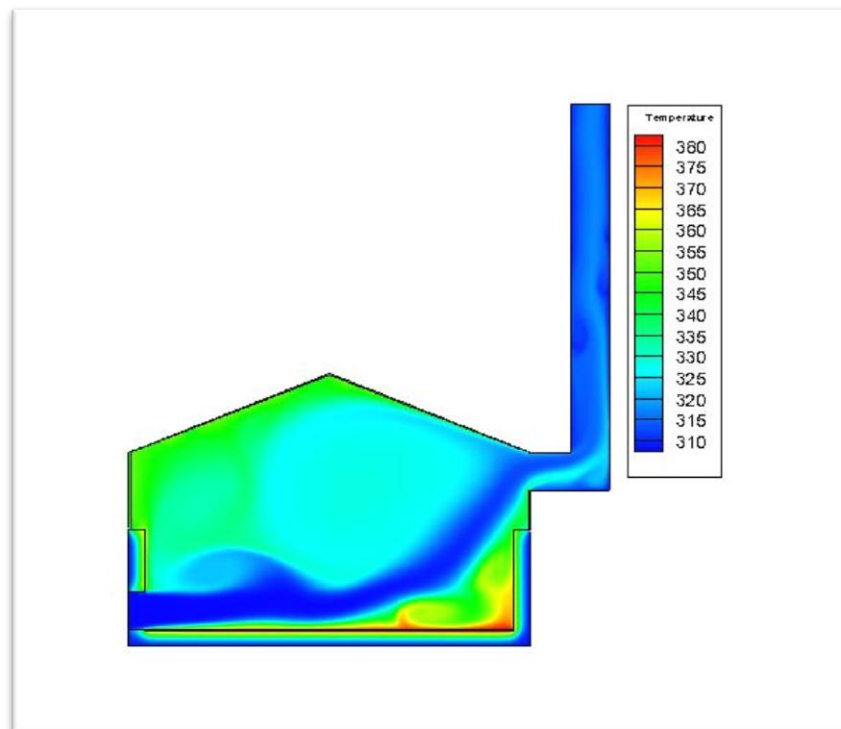


Figure III.24 : contours de la température à 13h00.

La figure (III.24) présente la distribution de la température de l'air dans le séchoir à 13h00, où le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale, ce qui permet d'augmenter la température de la plaque absorbeur, et la température de l'air de séchage dans le séchoir solaire

III.7.2.2. Variation des températures dans le séchoir solaire sans échangeur

D'après la figure (III.25) on remarque que $T_{m.sim}$ et $T_{m.exp}$ varient de 27 à 58°C et de 30 à 57°C respectivement. La figure montre aussi qu'il existe une différence de température d'environ 2-5°C entre $T_{m.exp}$ et $T_{m.sim}$, mais malgré cet écart on peut prouver l'exactitude de notre calcul de simulation.

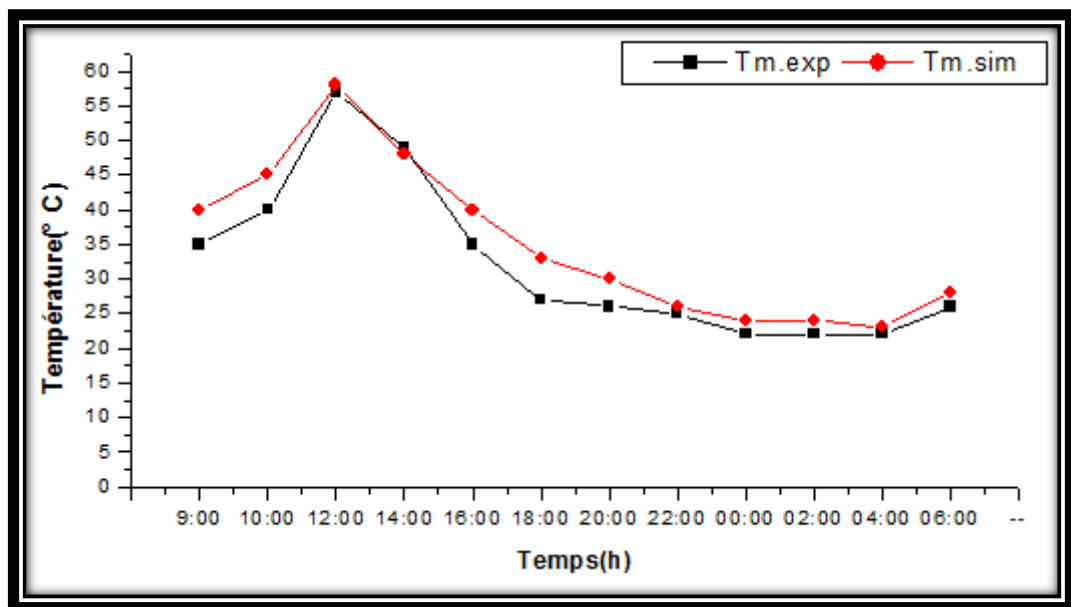


Figure III.25 : Variation de la température en fonction du temps pour dans la journée de 04/04/2017

III.7.2.3. Contour de la température du séchoir avec échangeur

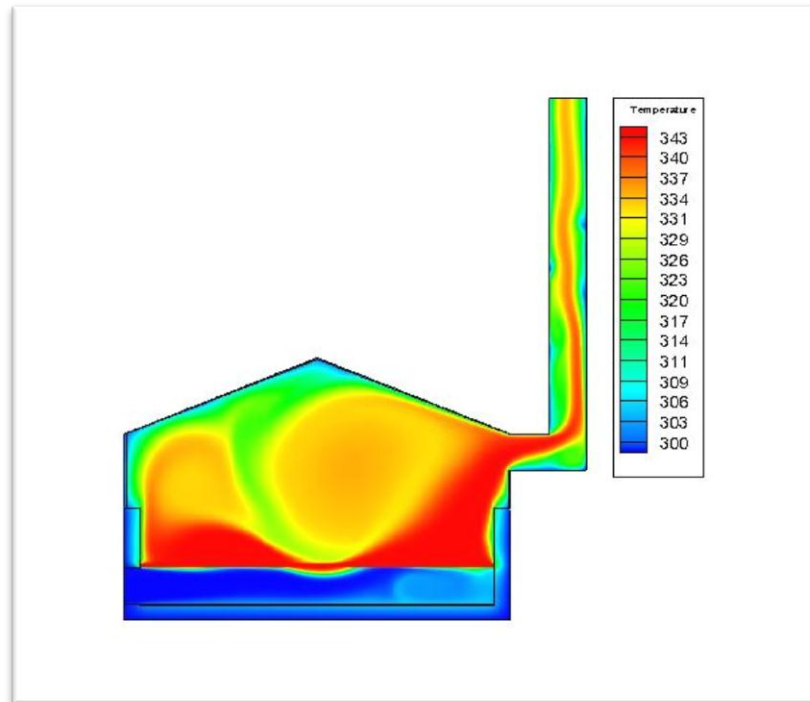


Figure III.26 : Contours de la température

La figure (III.26) présente le contour de température du séchoir avec appoint à 13h00, où le rayonnement solaire et la plaque absorbante prennent des valeurs maximales de température. La présence des deux sources de chaleur dans le séchoir solaire; échangeur de chaleur et plaque d'absorption; Permettent d'obtenir des températures de l'air plus élevées.

III.7.2.4. Variation des températures séchoir solaire avec échangeur:

La figure (III.27) montre la variation de $T_{m.sim}$ et $T_{m.exp}$ en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir de 23h. On remarque que $T_{m.exp}$ et $T_{m.sim}$ varient de 54 à 59°C et de 72 à 74°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 5°C entre $T_{m.exp}$ et $T_{m.sim}$, mais malgré cet écart on peut prouver l'exactitude de notre calcul de simulation.

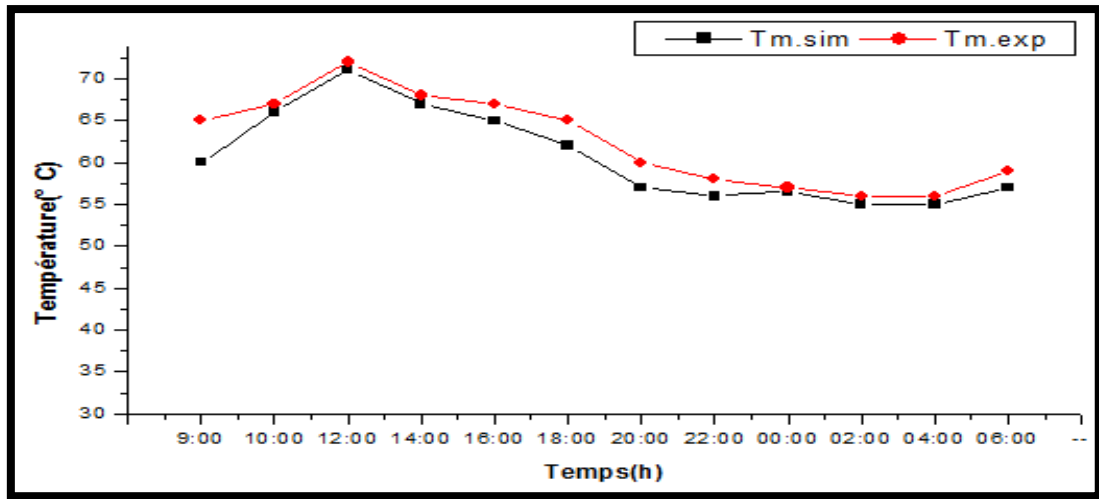


Figure III.27 : Variation de la température en fonction du temps pour la journée 04/04/2017

III.7.3. Fonctionnement du procédé pour une journée nuageuse 23h

L'étude de simulation est basé sur les résultats du rayonnement solaire très faible ($I = 200W / m^2$)

III.7.3.1. Variation des températures du séchoir solaire sans échangeur

La figure (III.28) montre la variation de Tm.sim et Tm.exp en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir de 23h. On remarque que Tm.exp et Tm.sim varient de 9 à 24°C et de 12 à 28°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 2°C entre Tm.exp et Tm.sim, mais malgré cet écart on peut prouver l'exactitude de notre calcul de simulation.

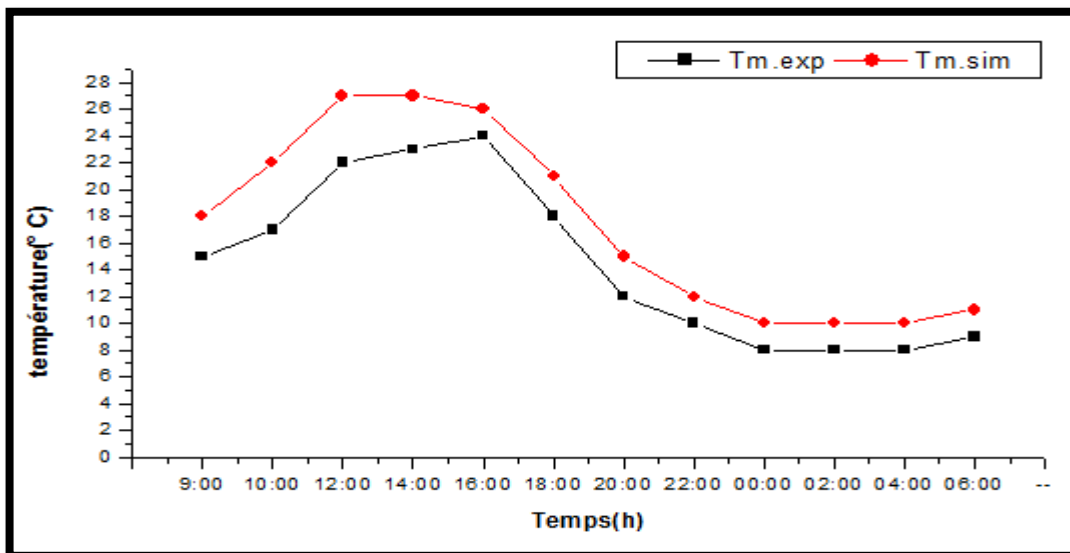


Figure (III.28) Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.

III.7.3.2. Variation des températures séchoir solaire avec échangeur

La figure (III.29) montre la variation de $T_{m.sim}$ et $T_{m.exp}$ en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir de 23h. On remarque que $T_{m.sim}$ et $T_{m.exp}$ varient de 60 à 65°C et de 51 à 60°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 5°C entre $T_{m.exp}$ et $T_{m.sim}$, mais malgré cet écart on peut prouver l'exactitude de notre calcul de simulation.

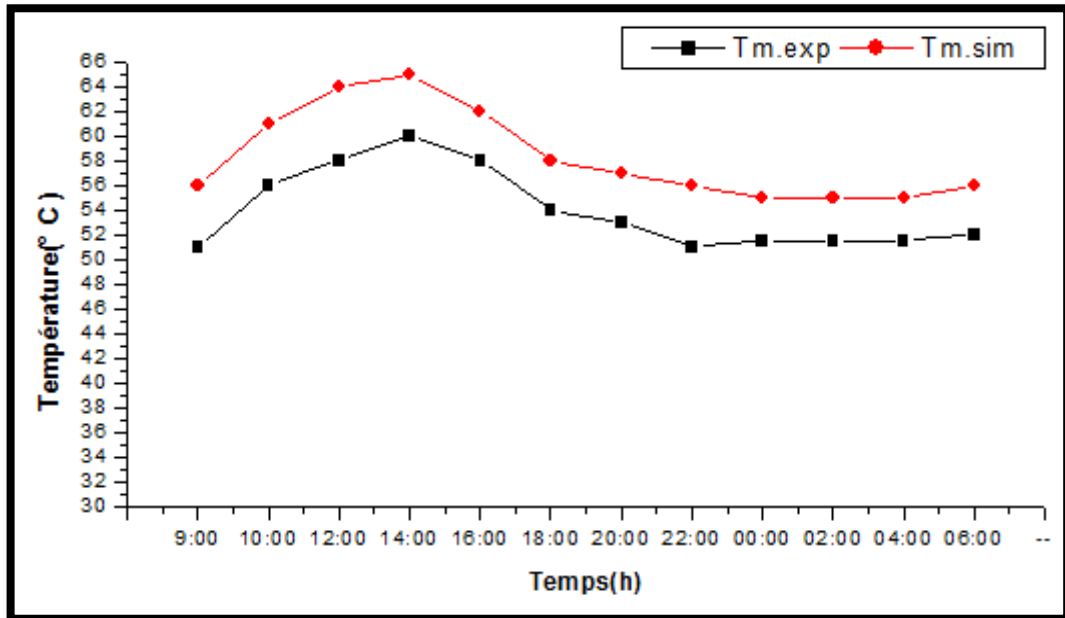


Figure III.29: Variation de la température en fonction du temps pour la journée de 09/04/2017.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'amélioration de l'efficacité énergétique des séchoirs solaires nécessite l'intégration d'un appoint énergétique au niveau de la chambre de séchage, ce qui favorise une augmentation de la température de séchage, assurer une continuité dans les procédés de séchage, et amélioré la qualité des produits agro-alimentaires.

Notre travail présente une étude expérimentale basée sur l'intégration de deux types d'appoints énergétiques dans un séchoir solaire direct à convection naturelle installé au niveau du laboratoire des énergies nouvelle et renouvelables dans les zones arides. Le premier appoint présente une source d'eau chaude (eau géothermal) couplé à un échangeur de chaleur, ce dernier est installé dans la chambre de séchage. Le deuxième appoint présente une installation de production d'eau chaude (chauffe-eau solaire) couplé à l'échangeur précédent.

Pour bien savoir l'effet des appoints énergétiques, nous avons appliquées les deux techniques d'appoints pour des journées bien ensoleillées, nuageuses, et pendant la nuit, en plus nos résultats expérimentaux sont effectués à la base d'une comparaison avec un deuxième séchoir sans appoint qui à le même dimensionnement que celle du séchoir avec appoint.

L'ensemble des résultats montre que l'intégration des appoints énergétiques dans le séchoir solaire direct, pendant les journées ensoleillés et nuageuses et pendant la nuit permet d'augmenter l'efficacité énergétique du séchoir et de rendre notre procédé plus efficace que celle d'un procédé sans appoint énergétiques.

L'écart de température entre les séchoirs sans et avec appoints peut atteindre une variation de l'ordre de 12 à 36°C durant les journées nuageuses et pour une période de fonctionnement de 23h.

L'efficacité énergétique de notre séchoir solaire est meilleur pour l'utilisation d'un appoint fonctionne avec une source d'eau chaude (eau géothermal) et pour les cas des journées nuageuses, soit on travaille durant la journée ou bien jour et nuit.

Les résultats de simulation montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Panna Lal Singh. "Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. *Journal of Applied Energy*", 88, 1720-1726. V.P.S., (2006).
- [2] Bennamoun, L., A. Belhamri, "Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles." *Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda*: 201-204 (2007).
- [3] Farhat, A., S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, A. Belghith, "Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse." *International Journal of Thermal Science* **43**: 53-58 (2004).
- [4] W. Belachi. "Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires", Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2009).
- [5] J.P Nadeau, Puiggali J.R., "Séchage: des processus physiques aux procédés industriels". Tec & Doc- Lavoisier, (1995).
- [6] M. Kouhila, A. Belghit, M.Kaoua et M.Daguenet, "Etude expérimentale du séchage convective de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire", *Rev.energ.ren : Physique énergétique* (1998).
- [7] I. T. Togrul, D. Pehlivan, "Mathematical modeling of solar drying of apricots in the layers", *Journal of food engineering* 55 (209-216) (2002).
- [8] Ertekin, C., Yaldiz, O.. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model". *Journal of Food Engineering* 63,349-359 (2004).
- [9] Giovannucci, E., Ascherio, A., Rimm, E. B., Stampfer, M. J., Golditz, G. A., & Willett, W. C. "Intake of carotenoids and retinol in relation to risk of prostate cancer". *Journal of the National Cancer Institute*, 87(23), 1767-1776. (1995).
- [10] A. Mouafki, " Modélisation. Simulation du procédés de séchage solaire des feuilles de menthe", Mémoire de Magistère, Ouargla (2004).
- [11] W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).
- [12] André charreau et Roland Technique de l'ingénieur-génie des procédés séchage . cavallé,j 2480-2 ;2480-22.
- [13] D.Schnell , "Technique de séchage, Traduit de l'allemand", GMBH, Eschborn, (1983).
- [14] A. Boussalia, Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, mémoire magister, université Mentouri, Constantine (2010).
- [15] Robin Alexandre Sécheur solaire 2003.

- [16] An overview of solar drying technology", *Energy Conversion and Management*, 40 (615 - 655) - (1999).
- [17] O. V. Ekechukwu, B. Norton, "Review of solar energy systems II
- [18] D. R. Pangavhane, R. L. Sawhney, "Review of research and development work on solar dryers for grape drying", *Energy Conversion and Management*, 43(45 - 61) - (2002).
- [19] D. Mennouche "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire", mémoire de Magistère, Ouargla (2006).
- [20] J. Bernard. *Energie solaire calculs et optimisation*, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [21] A. H. Khedim. *Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque*, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [22] Microsoft Encarta 2006.
- [23] R. Bernard *Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ;* 2e édition, 1980.
- [24] J.R. Vaillant *utilisation et promesses de l'énergie solaire*, 1970.
- [25] Yves Jannot, *Isothermes de sorption : Modèles et détermination*
- [25] LEPT-ENSAM, (1-5), (2003).
- [26] P. Mafart, (1991) *Les procédés physiques de conservation* Edition Lavoisier Tec et Doc, série Apria, pp295.
- [27] A. Charreau, R. Cavaille, *Séchage théorie et pratique* *Technique de l'Ingénieur*, génie des procédés, 2480-1; 2480-23. (1991).
- [28] D. Saravacos George, (1995) *Mass transfer properties of foods* *Engineering properties of foods*, INC 2ème édition, pp531.
- [29] J. Castaing Lavignottes, *Air humide: propriétés thermodynamiques, opération unitaires et technologie associées son emploi*, Université de Pau des Pays de l'Adour, France, (2003).

1. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL :



Les deux séchoirs solaires



**Placement de l'eau albien et thermos
avec l'échangeur.**



Chauffe-eau solaire

2. Les appareils des mesures



Solari- mètre.



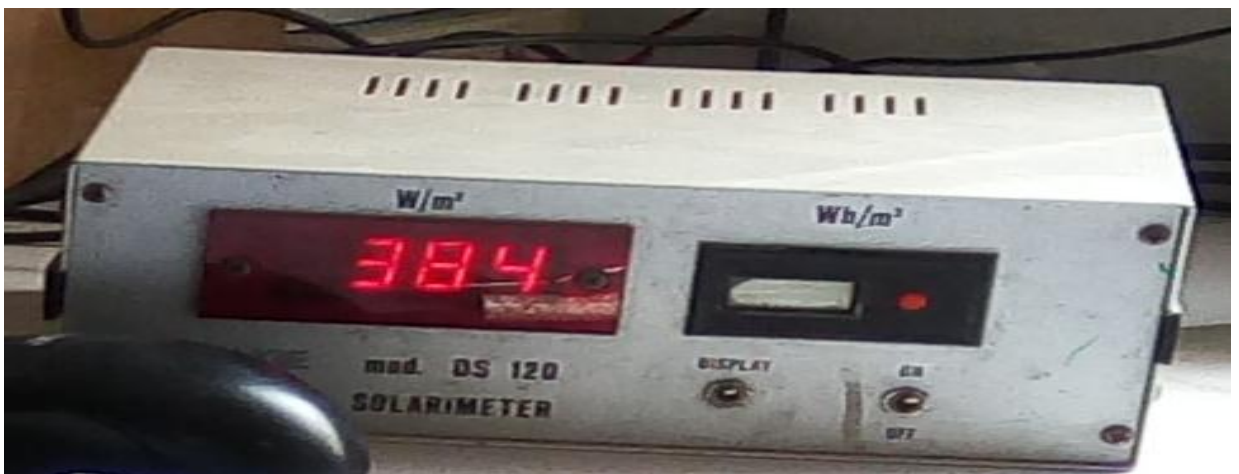
Débit mètre.



Température mètre.



Solari mètre.



Appareil d'affichage

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تحسين الفعالية الطاقوية لمجفف شمسي مباشر يعمل بالحمل الطبيعي وذلك من خلال دمج نوعين من الطاقة الإضافية ، النوع الأول يتمثل في مصدر للماء الساخن (المياه الجوفية) متصل بمبادل حراري، والنوع الثاني عبارة عن سخان مائي شمسي متصل بالمبادل الحراري السابق. نتائج هذا العمل بينت بأن :

دمج الطاقة الإضافية في المجفف الشمسي المباشر، خلال الأيام المشمسة والغائمة أو أثناء الليل يسمح بزيادة الفعالية الطاقوية للمجفف.

أحسن فعالية طاقوية كانت باستعمال المجفف الشمسي الذي يمتلك النوع الأول من الطاقة الإضافية.

الكلمات المفتاحية: المبادل الحراري – التجفيف – كفاءة الطاقة – المجفف الشمسي .

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'améliorer l'efficacité énergétique d'un séchoir solaire direct à convection naturelle par l'intégration de deux types d'appoints énergétiques. Le premier appoint présente une source d'eau chaude (eau géothermal) couplé à un échangeur de chaleur, ce dernier est installé dans la chambre de séchage. Le deuxième appoint présente une installation de production d'eau chaude (chauffe-eau solaire) couplé à l'échangeur précédent.

Les résultats de notre travail montre que ;

L'intégration des appoints énergétiques dans le séchoir solaire direct, pendant les journées ensoleillés et nuageuses et pendant la nuit permet de augmenter l'efficacité énergétique du séchoir et de rendre notre procédé plus efficace que celle d'un procédé sans appoints énergétiques.

La meilleure efficacité énergétique de notre séchoir solaire est présentée dans le cas d'un appoint énergétique couplée à une source d'eau chaude.

Mots-clés: échangeur de chaleur- séchage – efficacité énergétique - séchoir solaire

Abstract :

The objective of this work is to improve the energy efficiency of a direct solar dryer with natural convection by integrating of two types of energy supply. The first has a source of hot water (geothermal water) coupled to a heat exchanger and the second has a hot water production system (solar water heater) coupled to the previous exchanger.

The results of our work show that:

The integration of energy supply in the direct solar dryer during sunny and cloudy days and during the night allows to increase the energy efficiency of the dryer and to make our process more efficient than that of a process without energy supplement.

The best energy efficiency of our solar dryer is presented in the case of an energy supplement coupled with a hot water source.