



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Soufi Nedjwa**

Le : mardi 9 juillet 2019

## **Etude expérimentale du séchage solaire de l'argile de poterie (S.A.R.L Ben-Sdira, El- Kantara)**

---

### **Jury :**

M.	Ben Arfaoui Arfaoui	MAA	Université de Biskra	Président
Dr.	Labeled Adnane	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Belghar Nourddine	MCA	Université de Biskra	Examineur

## *Dédicace*

*À ma mère et mon père.*

*À mes frères.*

*À mes sœurs en particulier khadidja*

*À la femme de mon frère*

*À tous ma famille grande et petite.*

*Aux petits enfants « Mouad, Djouri, Ayat al Rahman».*

*À tous mes amis.*

*À tous les étudiants de la faculté au département de génie*

*Mécanique.*

*Nedjwa scoufi*

## **Remerciements**

*Je remercie Dieu Tout-Puissant avant tout de me donner le courage d'accomplir ce petit travail.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur le Docteur **Labeled Adnane** pour son suivi, ses directives et conseillée*

*Je remercie les membres de jury, Dr .Bbelghar Noureddine et M.arfaoui Ben arfaoui pour leur présence et pour l consacrer pour l'évaluation de ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres du hall technologiques du département de Génie Mécanique.*

*Je remercie aussi tous mes amies et mes camarades qui m'ont beaucoup soutenu, conseillé et aidé*

*Finalement, je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants du département de génie mécanique, et tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour accomplir ce travail*

# SOMMAIRE

---

## Sommaire

Dédicace

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

### **Introduction générale.**

Introduction .....	1
Référence.....	2

### **Chapitre. I. Etat de l'art sur le séchage solaire.**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Séchage solaire.....	3
I.3.Principe du séchage solaire .....	3
I.4.Quelques travaux sur le séchage solaire .....	4
I.5.Référence .....	11

### **Chapitre. II. Etude Théorique du séchage solaire.**

II.1.Introduction .....	13
II.2. Captures solaires.....	13
II.2.1. Caractéristiques techniques des composants du CSP à air .....	13
II.2.2.Fonctionnement d'un capteur solaire plan .....	14
II.3.Généralités sur le séchage.....	14
II.3.1. Définition .....	14
II.3.2. Différents types de séchoirs solaires.....	15
II.3.2.1. Les séchoirs solaires directs .....	16
II.3.2.2.Les séchoirs solaires indirects .....	17
II.3.2.3.Les séchoirs solaires mixtes .....	18
II.4. Notions fondamentales sur le séchage.....	18
II.4.1. Mode de séchage :.....	18
II.4.1.1. Séchage par convection .....	18
II.4.1.2. Séchage par conduction.....	18

# SOMMAIRE

---

II.4.1.3. Séchage par rayonnement.....	18
II.4.2. Activité de l'eau dans le produit.....	18
II.4.3. Caractéristiques de l'air de séchage.....	19
II.4.3.1. Humidité absolue.....	19
II.4.3.2. Humidité relative.....	19
II.4.3.3. Température sèche.....	19
II.4.3.4 Température humide du gaz.....	19
II.4.4. Caractéristiques des solides humides.....	20
II.4.4.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche).....	20
II.4.4.2. Humidité relative (teneur en eau):.....	20
II.4.4.3. Vitesse de séchage.....	20
II.4.4.5. Cinétique du séchage.....	20
II.5. Référence.....	21

## **Chapitre .III .Protocole expérimental.**

III.1. Introduction.....	23
III.2. Description du banc d'essais.....	23
III.2.1. Le capteur solaire.....	23
III.2.2. Chambre de séchage.....	25
III.3. Instruments de mesure.....	26
III.3.1. Mesure du rayonnement solaire.....	26
III.3.2. Pesage du produit.....	26
III.3.3. Mesure de la température de la chambre de séchage.....	27
III.3.4 Mesure de la température et de la vitesse de l'air.....	27
III.4. Produit à séché.....	28
III.4.1. Composition de l'argile.....	28
III.4.2. Source d'argile.....	28
III.4.3. Étapes de séchage dans l'usine.....	28
III.4.4. Étapes de séchage expérimental (de la présente étude).....	29
III.5. Références.....	30

## **Chapitre. IV. Résultats et discussion.**

IV.1. Introduction.....	31
IV.2. Résultats et discussion.....	31

# SOMMAIRE

---

IV.2.1. Conditions climatiques .....	31
IV.2.2. Variation des températures d'entrée et de la chambre de séchage .....	34
IV.2.3. Variation du rendement thermique en fonction du temps de séchage.....	35
IV.2.4. Variation de la perte de masse en fonction du temps de séchage.....	37
IV.2.5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.....	38
IV.2.6. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage.....	39
IV.3. Conclusion .....	41
CONCLUSION GENERALE.....	42

### **Chapitre. I. Etat de l'art sur le séchage solaire.**

Fig.I.1 : Principe du séchoir solaire.....	3
Fig.I.2 : Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 1).....	4
Fig.I.3 : Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 2).....	5
Fig. I.8. Dispositifs expérimentaux pour le séchage du henné; a) modèle I, b) modèle II.....	7
Fig.I.4. Séchoir hybride : (a) sans produit ; (b) pendant le processus de séchage de l'ananas ...	5
Fig.I.5. Teneur en humidité du gingembre sauvage pendant le processus de séchage .....	6
Fig.I.6. Diminution de la teneur en humidité et de la vitesse de séchage du gingembre sauvage au cours du processus de séchage (expérience 2).....	6
Fig.I.7. Teneur en humidité finale et rayonnement solaire moyen .....	7
Fig.I.9. Variations de l'efficacité du capteur en fonction du temps : (a) pour 78 échantillons de gingembre, (b) pour 48 échantillons de gingembre.....	8
Fig.I.14. Variation de la teneur en eau des fèves de cacao .....	10
Fig.I.12. Variation du rayonnement solaire, température de l'air à la sortie du capteur, température de l'air ambiant, température de l'air à la sortie du séchoir pour Sécheur solaire à convection pour des conditions sans charge .....	9
Fig.I.10. Variation de la teneur en humidité avec le temps de séchage .....	8
Fig.I.11. Variations de la température ambiante, de l'intensité du rayonnement solaire et des températures d'entrée et de sortie du séchoir pendant le séchage du gingembre .....	9
Fig.I.13. La variation d'humidité moyenne non dimensionnelle et de séchage temps avec des températures différentes .....	10
Fig.I.15. Courbes simulée et expérimentale .....	11
<b>Chapitre. II. Etude Théorique du séchage solaire</b>	
Fig. II.1 : Schématisation des échanges optiques à travers les couvertures transparentes d'un capteur solaire plan.....	13
Fig.II.2 : Séchoir solaire direct.....	15

## Liste des Figures

---

Fig. II.3 : Séchoir solaire indirect.....	16
Fig. II.4: Allure de séchage en fonction du temps .....	20
<b>Chapitre .III . Protocole expérimental.</b>	
Fig.III.1 : Photo du four utilisé pour le séchage de la poterie à l'usine. ....	21
Fig.III.2 : Séchoir solaire utilisé dans la présente étude. ....	22
Fig.III.3 :schéma du dispositif expérimental utilisé.....	23
Fig. III.4 : Chambre de séchage .....	23
Fig.III.5 : Pyromètre (Voltcraft-P1110SM). ....	24
Fig.III.6 : Balance numérique. ....	24
Fig.III.7 : Thermo-hygromètre .....	25
Fig.III.8 : Anémomètre.....	25
Fig.III.9 : Les cylindres de l'argile avant le formage.....	27
Fig.III.10 : Opération de séchage naturel du produit .....	27
Fig.III.11 : L'argile avant le séchage. ....	28
Fig.III.12: L'argile après séchage .....	28
<b>Chapitre. IV. Résultats et discussion.</b>	
Fig .IV.1 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps des différentes journées de séchage .....	30
Fig.IV.2 : Variation de la vitesse du vent durant les journées d'expériences .....	31
Fig. IV.3 : Variation des températures ambiante et de la chambre de séchage en fonction du temps de séchage durant les journées d'expériences.....	33
Fig. IV.4. Evolution du rendement thermique pour des débits fixes durant les journées d'expériences.....	34
Fig. IV.5. Variation du rendement thermique du séchoir en fonction du débit de l'air asséchant.....	35
Fig. IV.6 : Variation de la perte de masse en fonction du temps de séchage.....	36
Fig. IV.7 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.....	37

## Liste des Figures

---

<b>Fig. IV.8 :</b> Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage pour trois débits différents.....	38
---	----

**Tableau I.1** : Classification des systèmes de séchage.....14

## Nomenclature

---

Symboles	Désignations	Unités
Q	Le débit	Kg/s
$c_p$	Capacité calorifique	kJ/kg.K
T	Température	K
G	Rayonnement solaire	W/m <sup>2</sup>
S	Surface	m <sup>2</sup>
$\eta$	le rendement de capteur solaire	%
$H_a$	Humidité absolue	kg eau / Kg (as)
$M_a$	Masse du gaz	Kg
$M_e$	Masse de l'eau	Kg
$H_r$	Humidité relative	kg eau/Kg (as)
$P_v$	pression de vapeur	Pascal
$P_s$	Pression de saturation	Pascal
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / Kg (MS)
$M_h$	Masse humide du produit	Kg
$M_s$	Masse sèche du produit	Kg
$X_r$	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau / Kg (Mh)
dt	Le temps pris	h
dx	L'humidité du produit au début et à la fin de l'opération	Kg/ Kg <sub>as</sub>
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit	Kg /Kg <sub>s</sub> .h

# Introduction générale

# *Introduction*

L'exploitation des sources d'énergies renouvelables et essentiellement la conversion de l'énergie solaire a connu depuis les années 1970 un regain d'intérêt considérable suite à la crise énergétique. Ainsi, étant une source renouvelable et nationale, l'énergie solaire permet, d'une part de réduire la « dépendance énergétique » d'un pays. Etant une source peu polluante, elle permet d'éviter les atteintes à l'environnement occasionnées par le processus de production, de transport et de consommation des sources d'énergies conventionnelles d'autre part.[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/m<sup>2</sup> sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles [2].

La production et la consommation énergétique passe par un ensemble d'appareils qui sont conçus selon le type et la forme d'énergie envisagée. Ainsi l'énergie se trouve impliqué dans un système qui prédit la forme de sa production et la destination de son utilisation.

La présente étude est consacrée au séchage des produits rouges par air chaud ; première opération de transformation profonde de l'argile avant sa cuisson, le chauffage étant assuré par un capteur solaire plan à air à double passages d'air [3].

L'objectif de ce travail, est d'étudier l'influence de certains paramètres sur la cinétique de séchage de l'Argile de El-Kantara (Fondation poterie Ben-Sdira) et en particulier l'étude de l'influence du couple température/ débit d'air sur le temps de séchage.

Par conséquent, c'est l'ensemble de toutes ces considérations qui nous a amené à entreprendre ce travail réparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique du processus de séchage ainsi que, quelques travaux de la littérature.

Dans le deuxième chapitre nous présentons quelques notions fondamentales sur la conversion thermique, le capteur solaire, le séchage solaire et les différentes équations régissant ce phénomène.

## Introduction générale

---

Le troisième chapitre est dédié à la présentation du protocole expérimentale, la préparation du banc d'essai, les instruments de mesure utilisés et le produit a séché.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des différents résultats expérimentaux issus de cette étude.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats les plus importantes de cette étude.

**Chapitre I :**  
**Etat de l'art**  
**sur le séchage**  
**solaire**

## I.1. Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire comme source de chauffage naturelle est un moyen rentable pour la déshydratation des produits à basses températures. Elle constitue une solution possible pour les pays non pourvus de richesses énergétiques conventionnelles.

Dans le cas le plus répandu du séchage naturel, le produit est exposé à la poussière, à la pluie, à la surchauffe et aussi au risque de développement de moisissures ou de bactéries. D'où le recours au séchage artificiel et dans ce domaine de traitement à température modérée ; c'est l'utilisation par excellence des capteurs solaires plans à air [1].

## I.2. Séchage solaire

Le séchage a pour but d'éliminer sous l'action de la chaleur le liquide qui accompagne un solide. Le départ de ce liquide s'effectue par évaporation, par vaporisation ou par sublimation. Le séchage est donc une opération de transfert simultané de matière et de chaleur. [4]

## I.3.Principe du séchage solaire

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. [5]

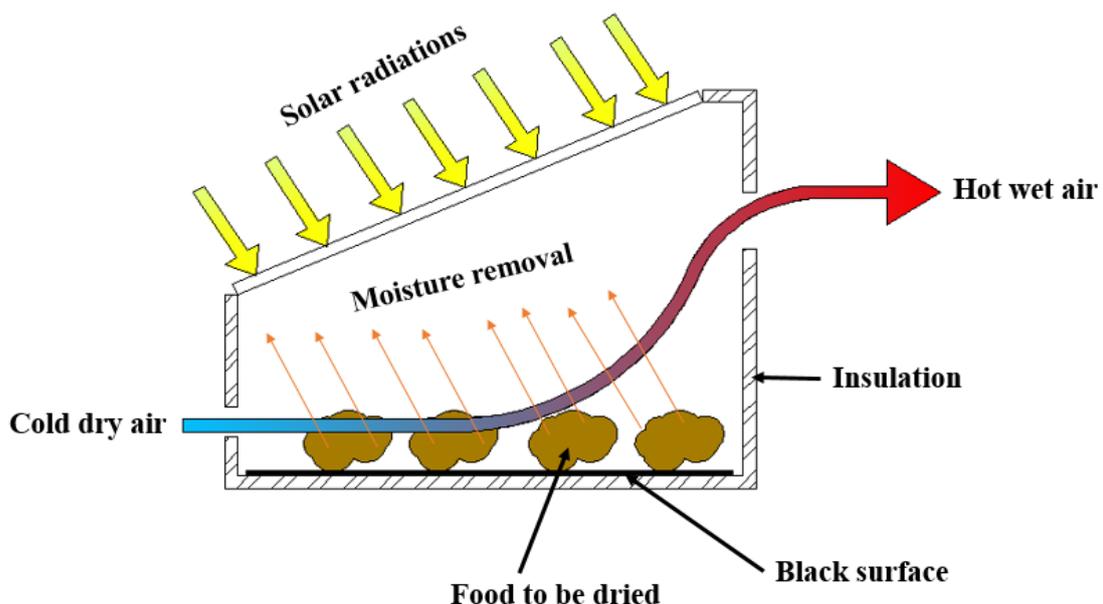


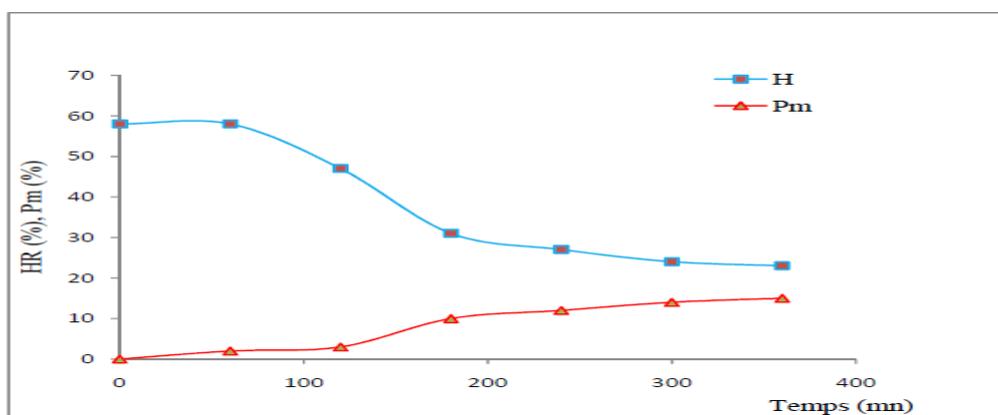
Fig.I.1 : Principe du séchoir solaire [6]

#### I.4. Quelques travaux sur le séchage solaire :

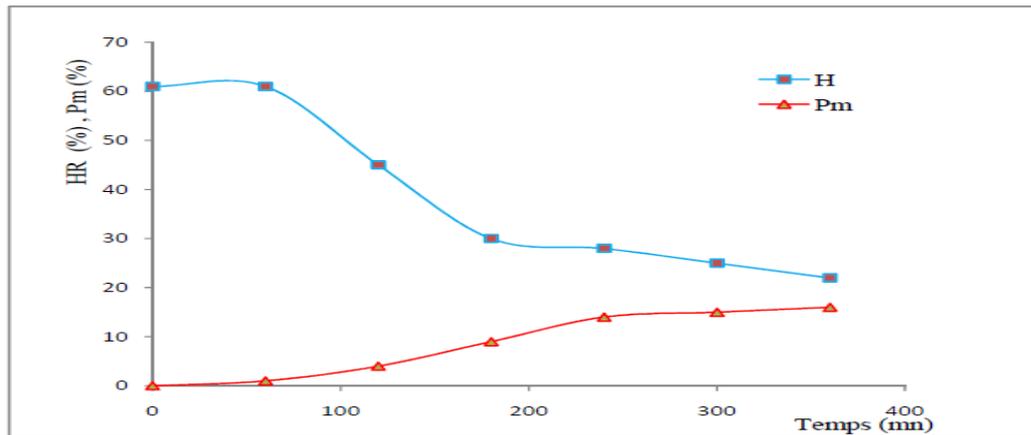
La technique de séchage a fait l'objet de nombreuses communications scientifiques depuis les premiers travaux sur le séchage, qui ont eu lieu avec les études de **W.K Lewis** et **T.K Sherwood**. Cette technique demeure encore de nos jours un domaine de recherche privilégié notamment dans les pays où l'utilisation des méthodes de séchage solaire s'imposent toujours.

Un nombre important de recherches ont été réalisées pour développer les séchoirs solaires pour le séchage du bois, de l'argile et des produits agricoles. Un grand nombre de configurations de séchoirs solaires avec les détails, de capacité et de coûts des produits secs ont été présentés [1].

BENLAHMIDI et al [3], ont étudié le séchage des produits rouges qui font partie du secteur des matériaux de construction. La production algérienne concerne essentiellement la fabrication de briques à 98% et en beaucoup plus faible quantité, les tuiles et produits divers. Cette production passe par l'étape du séchage qui nécessite une consommation d'énergie. C'est dans ce cadre que leur travail consiste à évaluer les performances des isolateurs plans pour une éventuelle utilisation pour le séchage de ces produits. L'implantation de tel système solaire pour satisfaire ce besoin bien déterminé ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement solaire local disponible réellement. La modélisation des paramètres intrinsèques et extrinsèques qui gouvernent le fonctionnement des isolateurs (température et rayonnement) constitue une étape incontournable. Des essais sur le séchage ont donné des résultats acceptables, la dernière partie du travail est réservée à l'étude statistique pour déterminer le rôle de la température et du temps sur l'humidité, la variation de la masse et la variation de la masse volumique.

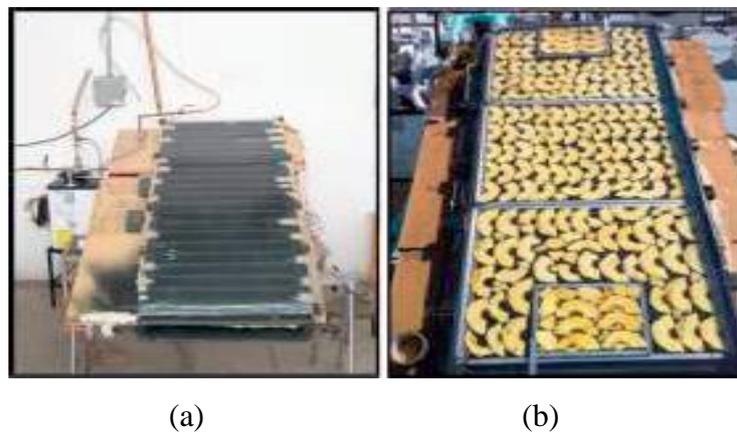


**Fig.I.2 : Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 1)**



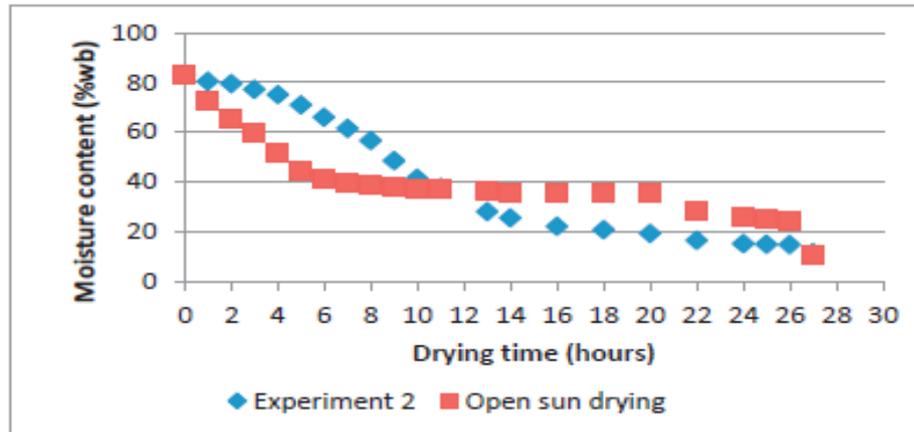
**Fig.I.3 : Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 2)**

Ayala et Topete [7], ont présenté les résultats d'une étude expérimentale sur le séchage de l'ananas (*Ananas comosus* L.) dans un séchoir solaire hybride. La sécheuse est de type direct intégré, avec un bac noir de 1,675 x 0,61 x 0,055 m (1,02 m<sup>2</sup>). Ils ont utilisé un tube hélicoïdal en cuivre qui conduit l'eau chaude à 80 ° C, générant une chaleur supplémentaire pour le processus de séchage ; le tube est situé au bas de la casserole noire.

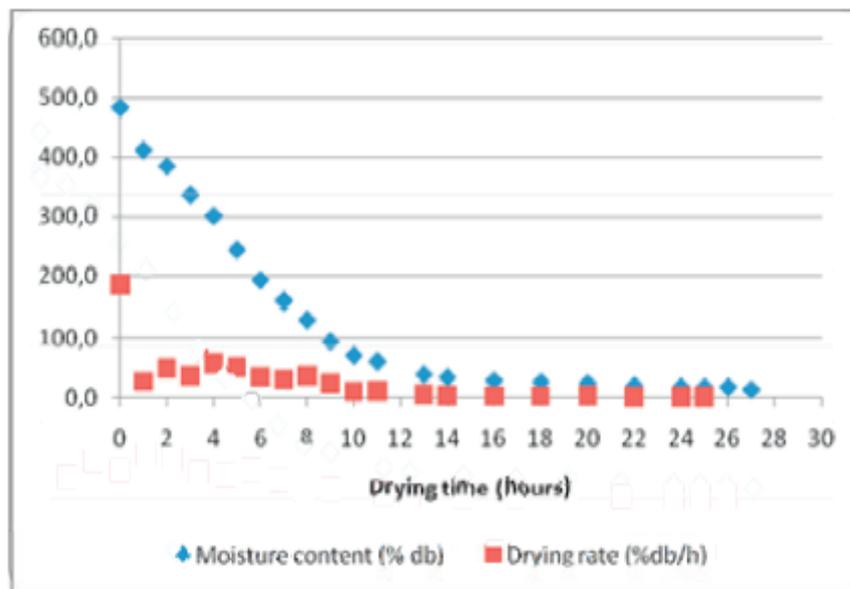


**Fig.I.4. Séchoir hybride : (a) sans produit ; (b) pendant le processus de séchage de l'ananas**

Aritestya et Wulandani [8] ont étudié l'effet de la quantité et la forme du produit sur les performances du séchoir solaire. Trois conditions d'expérience de séchage ont été réalisées pour obtenir la performance du séchoir ; sans produit et en utilisant le produit à deux capacités différentes. Le meilleur temps de séchage est atteint lors du séchage du gingembre sauvage en tranches de 60 kg à 47,2° C pendant 30 heures, représenté par une efficacité de séchage de 8% et une consommation d'énergie de 29 MJ / kg de vapeur. Le débit uniforme d'air chaud est obtenu à un écart type de température de 2,32 ° C.



**Fig.I.5. Teneur en humidité du gingembre sauvage pendant le processus de séchage**



**Fig.I.6. Diminution de la teneur en humidité et de la vitesse de séchage du gingembre sauvage au cours du processus de séchage (expérience 2).**

L'étude de Ferreira et al [9], visait à évaluer le séchage des déchets solides industriels à l'aide d'un séchoir solaire actif intégré. Les propriétés et l'efficacité thermique du dispositif dans différentes conditions de fonctionnement ont été étudiées. Des tests expérimentaux ont été développés pour évaluer le fonctionnement du séchoir solaire jusqu'à atteindre une teneur en humidité (base humide) de 30%. L'efficacité thermique instantanée du séchoir a varié de 9,7% à 29,5%. Dans les expériences de séchage, l'efficacité du séchage variait de 5,2% à 7,2%. Les rendements thermiques ont présenté des valeurs appropriées pour les aérothermes. Néanmoins, le rendement des séchoirs était faible, mais il peut être amélioré si on augmente la charge.

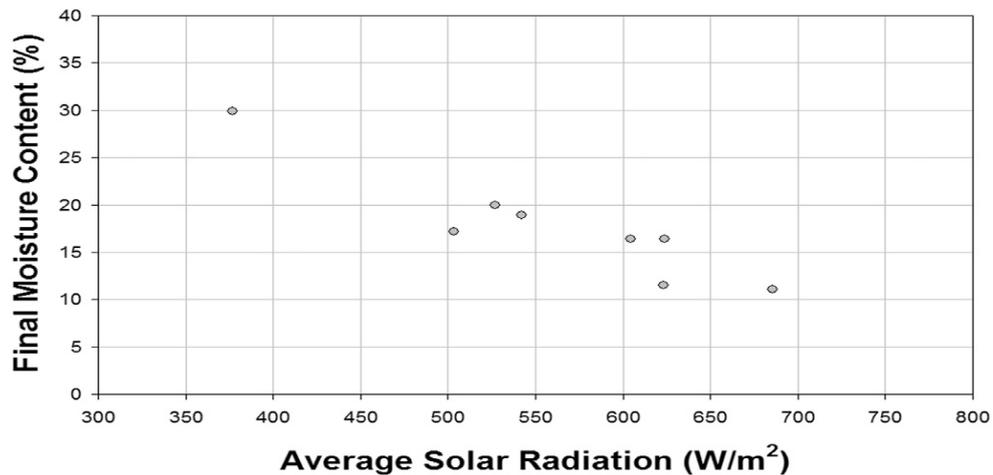


Fig.I.7. Teneur en humidité finale et rayonnement solaire moyen

L'étude pilote de **Labeled et al [10]** était présentée en deux parties : premièrement, le capteur solaire présentant les meilleures performances thermiques a été sélectionné. La deuxième partie examine la cinétique du séchage du henné (*Lawsonia alba*, syn. *Lawsonia inermis* Linn.) En utilisant le meilleur capteur solaire sélectionné. L'objectif de cette étude est d'obtenir un produit propre en temps réduit grâce à l'utilisation du séchoir solaires. Par conséquent, ils ont d'abord présenté les résultats de l'étude des performances thermiques et les pertes de charge de deux modèles de capteurs solaire pour des applications de séchage indirect : 1) capteur simple avec obstacles trapézoïdaux (modèle I) et ii) capteur à double passage avec obstacles trapézoïdales dans le canal de circulation d'air. Dans la deuxième partie, il ont comparé les différentes méthodes de séchage du henné avec le meilleur séchoir indirect (le deuxième modèle) pour sécher le henné dans des conditions climatiques Saharienne de Biskra, en Algérie.

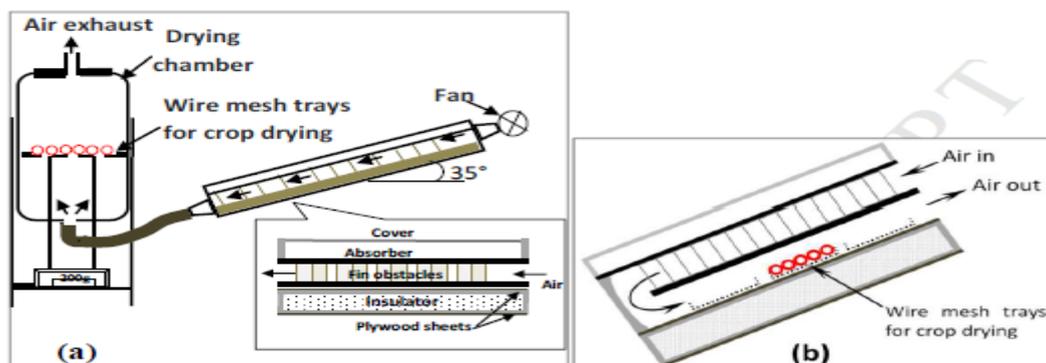
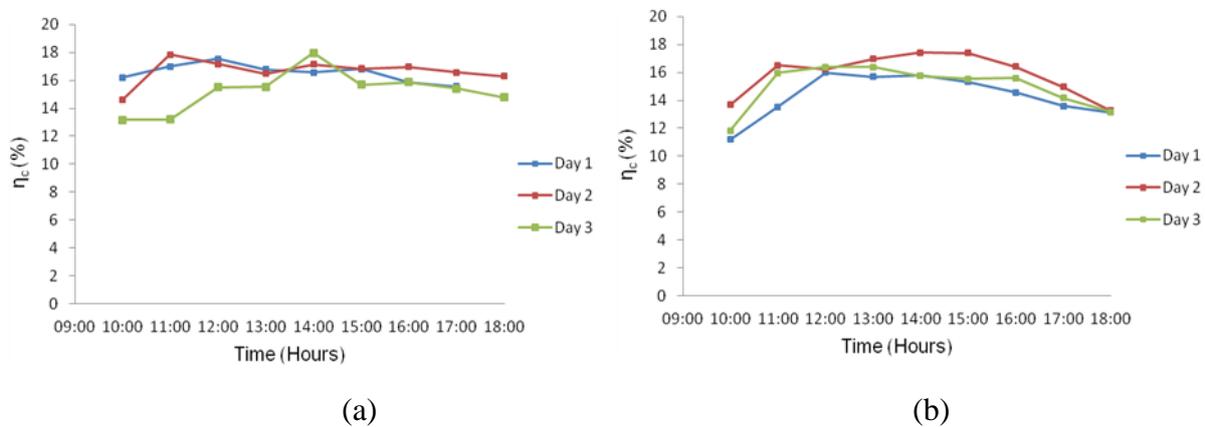


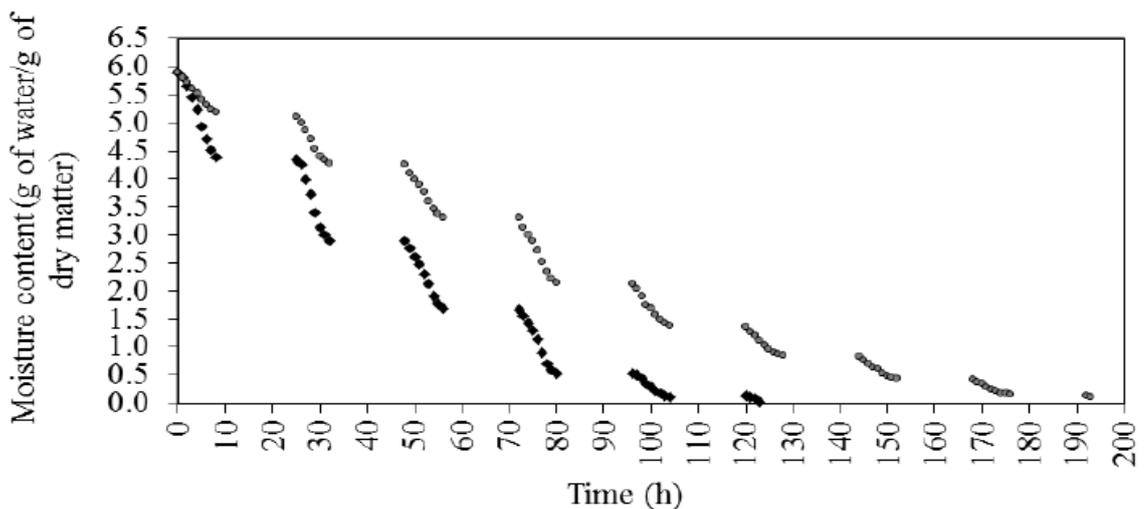
Fig. I.8. Dispositifs expérimentaux pour le séchage du henné; a) modèle I, b) modèle

Le travail de Sansaniwal et Kumar [11], a porté sur l'étude d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle. Le comportement des Rhizomes de Gingembre durant le séchage en termes de coefficient de transfert de chaleur par convection et de taux d'élimination de l'humidité (% db) ont été étudiés. Les données expérimentales obtenues ont été utilisées pour évaluer les constantes de Nusselt à l'aide de la méthode de régression linéaire. En tenant compte de ces constantes, la valeur moyenne du coefficient de transfert de chaleur par convection a été obtenue et ils ont observé qu'elle diminuait avec l'augmentation de la masse des échantillons de Gingembre et la progression des jours de séchage avec une variation de 0,59 à 5,42 W/m<sup>2</sup>°C pour différentes masses d'échantillons de Gingembre.



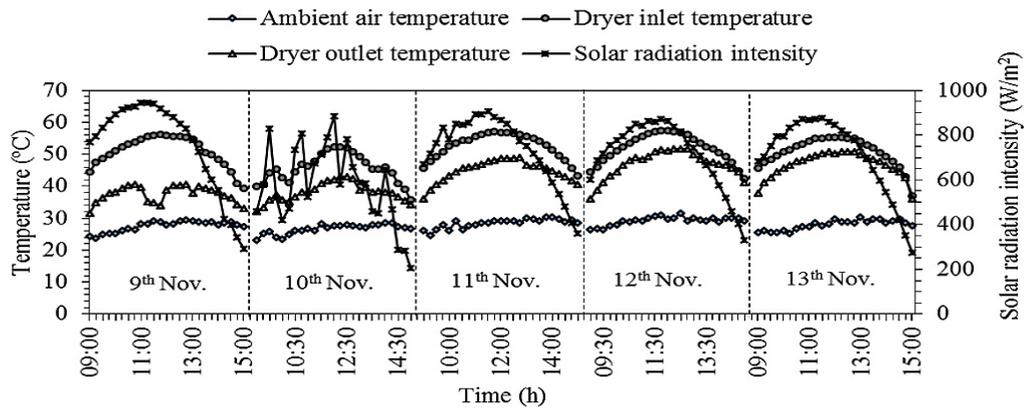
**Fig.I.9. Variations de l'efficacité du capteur en fonction du temps : (a) pour 78 échantillons de gingembre, (b) pour 48 échantillons de gingembre**

Rabha et al, [12] ont mené une étude comparative des caractéristiques de séchage de la couche mince de piment (Ghost Chilli), séchée dans un séchoir tunnel à convection forcée de type indirect et sous le soleil.



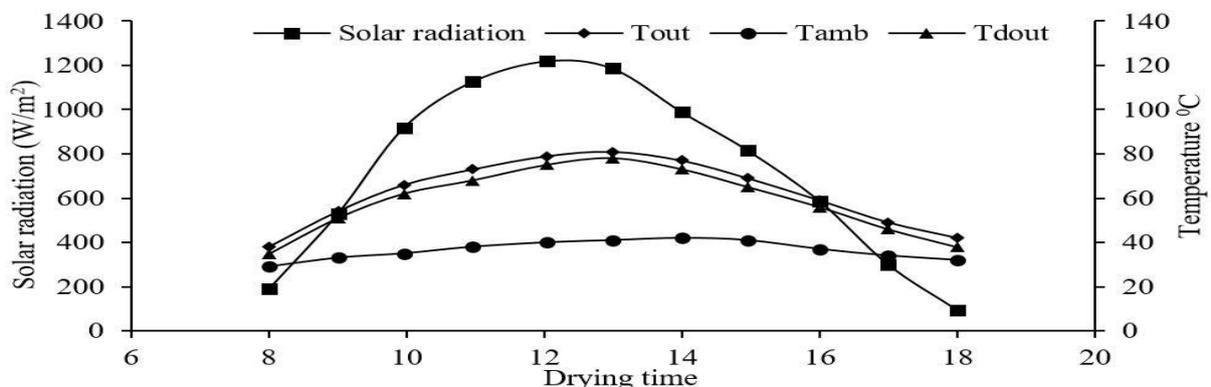
**Fig.I.10. Variation de la teneur en humidité avec le temps de séchage.**

Ensuite, ils ont intégré le même séchoir [13] à un module de stockage de chaleur latente basé sur une coque et des tubes. Le piment (Ghost) et le gingembre en tranches ont été séchés avec succès au séchoir en 42 h et 33 h dans la plage de température de l'air de séchage de 42 à 61 °C et de 37 à 57 C, respectivement. Des analyses d'énergie et d'exergie des processus de séchage des deux produits ont été effectuées. Les résultats ont montré que les rendements thermiques des premier et deuxième aérothermes solaires variaient entre 22.10% et 40.24% et 9.64% et 19.50%, respectivement.



**Fig.I.11. Variations de la température ambiante, de l'intensité du rayonnement solaire et des températures d'entrée et de sortie du séchoir pendant le séchage du gingembre.**

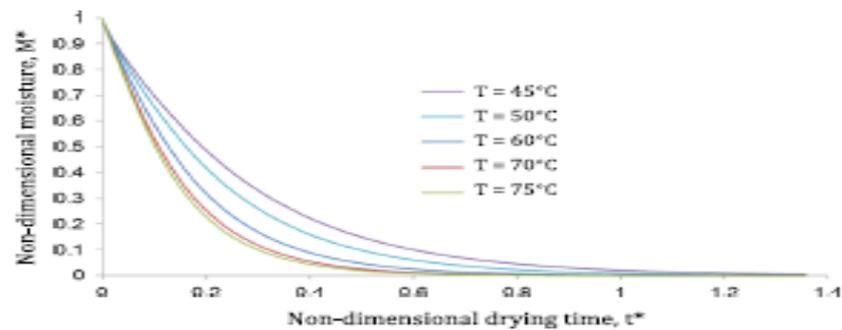
Lingayat et al, [14], ont mené une série d'expériences pour étudier les caractéristiques de séchage de la banane. L'analyse qualitative du séchage de la banane a montré que la teneur en humidité de la banane est passée de la valeur initiale de 356% (db) à une teneur en humidité finale de 16,3292%.



**Fig.I.12. Variation du rayonnement solaire, température de l'air à la sortie du capteur, température de l'air ambiant, température de l'air à la sortie du séchoir pour Sécheur solaire à convection pour des conditions sans charge.**

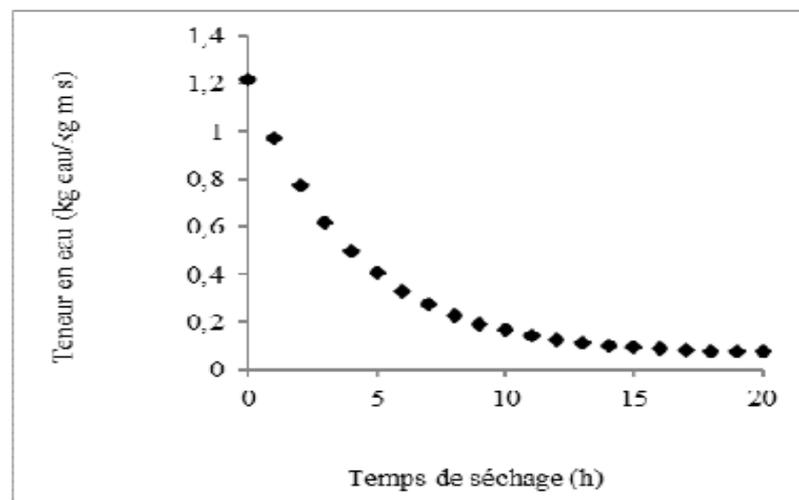
Godireddy et al. [15], ont développé un modèle mathématique pour le séchage solaire des Pois verts (nom botanique : *Pisum Sativum*).

Le problème est résolu en supposant que la forme des pois verts est sphérique. L'équation gouvernante de transfert de masse transitoire est discrétisée en un schéma de différences finies. La marche dans le temps est effectuée selon un schéma implicite. Les équations et les conditions aux limites sont non dimensionnelles pour obtenir les résultats génériques de la teneur en eau présentée sur la Fig.I.13.



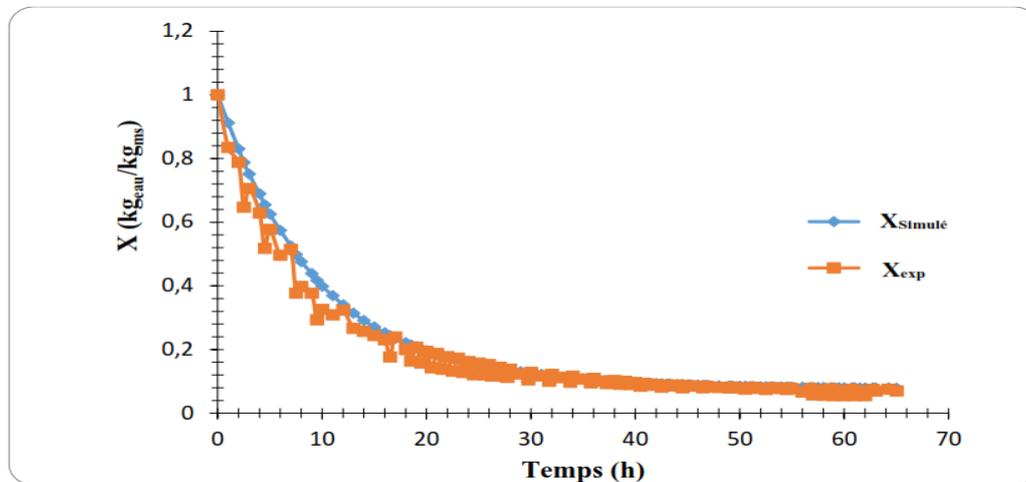
**Fig.I.13. La variation d'humidité moyenne non dimensionnelle et de séchage temps avec des températures différentes**

Koua, et al. [16], ont estimé au cours du séchage solaire indirect, les coefficients de retrait volumique, de diffusivité effective d'humidité ainsi que la cinétique de séchage des Fèves de Cacao. Ils ont déduit que les isothermes de désorption expérimentales des fèves de cacao, pour différentes températures (30, 45 et 60 °C) ont une allure sigmoïdale. La cinétique de séchage a montré que le processus de séchage des fèves de cacao se déroule pendant la phase de séchage décroissante.



**Fig.I.14. Variation de la teneur en eau des fèves de cacao**

KARIDIOULA et al. [17], ont élaboré un modèle mathématique pour l'étude de l'évolution de la teneur en eau des fèves de cacao à l'aide d'un réseau de neurones artificiel. Le réseau de neurones le mieux adapté est le perceptron multicouche avec deux neurones sur la couche d'entrée, deux neurones sur la couche cachée et un neurone sur la couche de sortie.



**Fig.I.15. Courbes simulée et expérimentale**

Elhage et al, [6] ont présenté une revue sur le séchage solaire. L'examen comprend les principaux composants, les classifications et les paramètres affectants. Avantages, inconvénients et limites d'une telle la technologie sont également étudiés. Cela dit, les séchoirs solaires sont évalués en fonction de trois éléments clés : circulation de l'air (passive et active), mode de transfert de chaleur (direct et indirect, hybride et mixte) et type de chambre de séchage (armoire, serre et tente).

**Chapitre II :**  
**Etude**  
**Théorique du**  
**séchage**  
**solaire**

## II.1.Introduction

Le séchage solaire est devenu très faisable en Algérie pour certaines récoltes telles que les plantes médicinales, les plante aromatiques ainsi que les fruits et légumes. Cependant son application demeure toujours à l'état expérimental malgré l'étude, la modélisation et le dimensionnement de plusieurs modèles et installations de séchage solaire. [1]

Certaines industries nécessitent une ou plusieurs opération de séchage lors du processus de production telles que ; la briqueterie, la poterie et la production pharmaceutique... ces industries sont toujours dépendantes aux énergies conventionnelles. Ceci est due au fait que le lâche capital se comporte avec prudence avec les recommandations des recherches scientifiques.

## II.2. Captures solaires :

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire. [18]

### II.2.1. Caractéristiques techniques des composants du CSP à air

**Absorbeur :** c'est une tôle d'acier galvanisé peinte en noir mat.

- Coefficient de conductivité thermique  $K_c = 180\text{W/mK}^\circ$ .
- Coefficient d'absorption  $\alpha_c = 95\%$  ; coefficient d'émission  $\varepsilon_c = 90\%$ .

**Couverture :** verre ordinaire

- Epaisseur : 0.005m ;
- Coefficient de transmission  $\tau_v = 85\%$  ;
- Coefficient d'émission  $\varepsilon_v = 86\%$ .

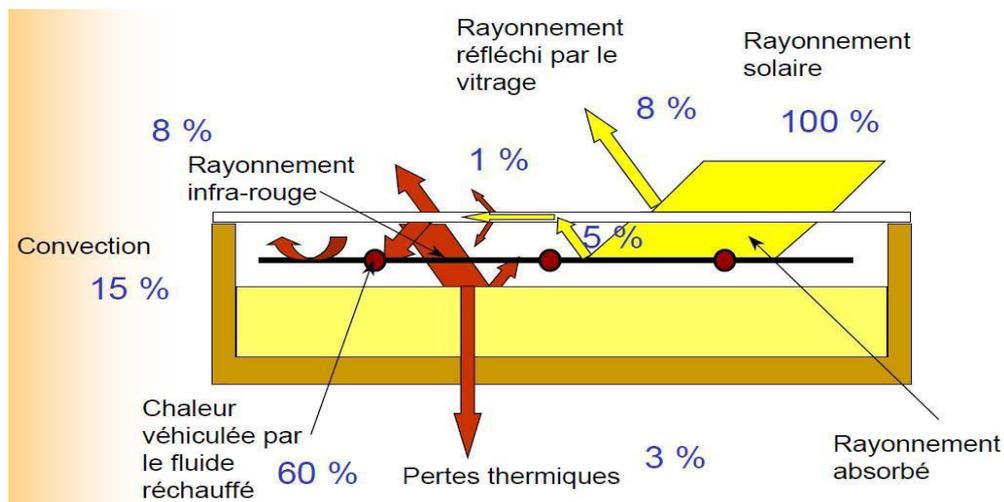
**L'isolant :** en polystyrène léger, de conductivité égale à  $0.04\text{ W/m.K}^\circ$ , d'épaisseur  $e = 0.04\text{m}$ . [1]

### II.2.2. Fonctionnement d'un capteur solaire plan :

Tout corps exposé au soleil s'échauffe par transformation de l'énergie du rayonnement reçue en énergie calorifique qui va à son tour être transférée au fluide caloporteur. Donc la captation de l'énergie s'effectue par la couverture transparente puis elle est transmise à la surface de l'absorbeur qui s'échauffe, celle-ci à son tour transmet l'énergie au fluide caloporteur. La chaleur qui n'est pas absorbée reste emprisonnée entre la couverture et l'absorbeur, ainsi le verre qui s'échauffe par les deux côtés, rayonne à son tour une partie de la chaleur vers la surface absorbante c'est-à-dire la plaque noircie, et une autre partie vers le milieu extérieur. Les calories apportées par le soleil sont donc enfermées entre la surface réceptrice et la couverture de verre, de sorte que la plaque noire exposée au soleil atteignait 60 °C environ, puis véhicule son énergie calorifique au fluide caloporteur. [19]

Nous calculons le rendement de capteur solaire en utilisant la loi suivante :

$$\eta = Q \cdot c_p * \frac{T_s - T_e}{G \cdot S_C} \quad (\text{éq.II.1})$$



**Fig. II.1 :** Schématisation des échanges optiques à travers les couvertures transparentes d'un capteur solaire plan

## II.3. Généralités sur le séchage

### II.3.1. Définition

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide afin de le conserver à une température ambiante ou de réduire son poids. Alors le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau, ou autre solvant, qu'il contient. [20]

**II.3.2. Différents types de séchoirs solaires**

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés, d'après leurs modes de chauffage et la manière dans laquelle l'énergie solaire est utilisée, en deux groupes majeurs à savoir :

- Les systèmes de séchage solaire actifs (souvent appelés les séchoirs hybrides).
- Les systèmes de séchage solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires à circulation naturelle de l'air de séchage).

Trois sous classes distinctes peuvent être identifiées pour les deux systèmes de séchage (actif et passif), selon le type du séchoir et le mode d'utilisation de l'énergie solaire), à savoir [1] :

- ✓ Les séchoirs solaires de type direct,
- ✓ Les séchoirs solaires de type indirect,
- ✓ Les séchoirs solaires de mode mixte.

	Les séchoirs actifs	Les séchoirs passifs
Type direct		
Type indirect		
Type mixte		

Tableau 1 : Classification des systèmes de séchage

### II.3.2.1. Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception des séchoirs coffre à plateau adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités. [2]

➤ **Avantage : [5]**

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.

➤ **Inconvénients : [21]**

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments.



Fig.II.2 : Séchoir solaire direct. [5]

### II.3.2.2. Les séchoirs solaires indirects

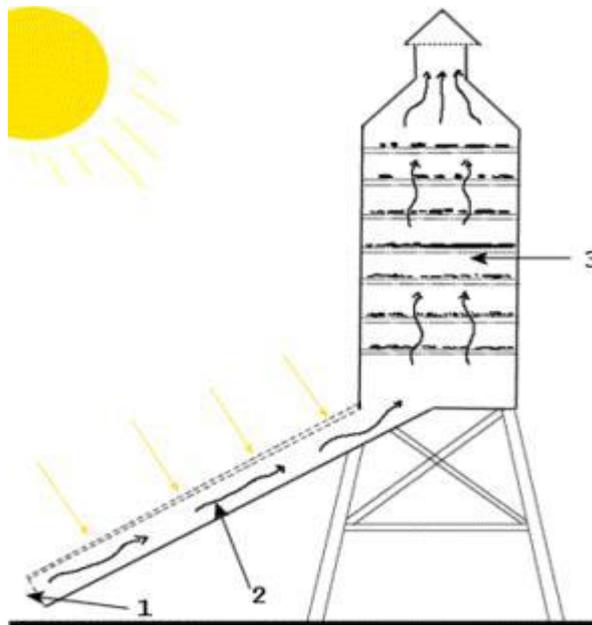
Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui les réchauffent en fonction du débit utilisé. [20]

➤ **Avantage :** [21]

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

➤ **Inconvénients :** [21]

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène.



**Fig. II.3 :** Séchoir solaire indirect

1. Entrée d'air
2. Partie exposée aux rayons du soleil, Sous une vitre
3. claie.
4. cheminée

### II.3.2.3. Les séchoirs solaires mixtes

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Les transferts de chaleur et de vapeur d'eau y sont complexes et assez mal connus. [20]

## II.4. Notions fondamentales sur le séchage :

### II.4.1. Mode de séchage :

#### II.4.1.1. 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. [5]

#### II.4.1.2. Séchage par conduction :

Dans ces procédés l'échange thermique est obtenu par contact entre le solide humide et une paroi métallique chauffée 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). [5]

#### II.4.1.3. 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. [5]

### II.4.2. Activité de l'eau dans le produit :

L'activité de l'eau dans le produit ( $a_w$ ) est une grandeur liée à l'humidité du produit. On définit l'activité de l'eau  $a_w$  dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit ( $P_{vp}$ ) à la pression de vapeur de l'air saturé ( $P_{vs}$ ).

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (\text{éq.II.2})$$

Avec :

$p_{vp}$  : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit,

$p_{vs}$  : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé. [22]

### II.4.3. Caractéristiques de l'air de séchage :

#### II.4.3.1. Humidité absolue :

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 : [2]

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (\text{éq. II.3})$$

#### II.4.3.2. 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. [4]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} * 100 \quad (\text{éq. II.4})$$

$$0\% \leq H_r \leq 100\%$$

#### II.4.3.3. 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. [5]

#### II.4.3.4 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. [5]

#### II.4.4. Caractéristiques des solides humides.

##### II.4.4.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche) :

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche. [4]

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{éq.II.5})$$

##### II.4.4.2. Humidité relative (teneur en eau):

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.[4]

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{éq.II.6})$$

##### II.4.4.3. Vitesse de séchage :

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors : [10]

$$R = \frac{M_s \cdot dx}{dt} \quad (\text{éq.II.7})$$

##### II.4.4.5. Cinétique du séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Tous les travaux de séchage montrent que les courbes de la vitesse de séchage en fonction du temps se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on remarque que l'allure de séchage se décompose en trois périodes principales : [23]

- phase 0 : Période transitoire (a).
- phase I : Période à vitesse de séchage constante (b).

- Phase II : Période à vitesse de séchage décroissante(c).

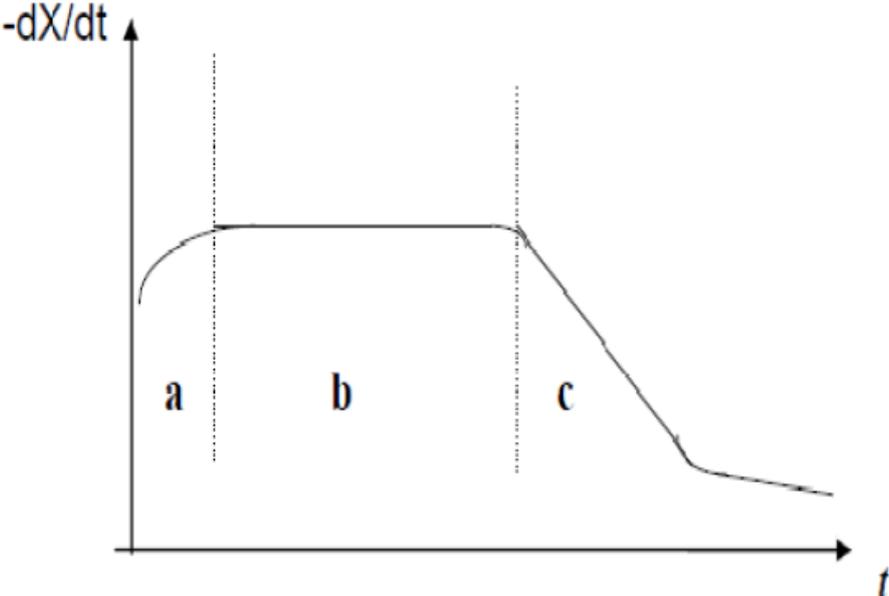


Fig. II.4: Allure de séchage en fonction du temps

Chapitre III :

**Protocole  
expérimental**

### III.1.Introduction

Cette deuxième partie a pour objectif la mise au point d'un système solaire à convection forcée d'un produit jugé importants dans notre culture Algérienne qui est la poterie. L'étude de l'influence de certains paramètres sur la cinétique du séchage est indispensable. Dans le cas le plus répandu du séchage naturel, le produit est séché naturellement et cela prend beaucoup de temps (de 1 à 4 jours), à savoir le volume et l'épaisseur du produit.

Le recours au séchage artificiel dans ce domaine de production industrielle est devenu une nécessité extrême, d'où l'utilisation par excellence des capteurs solaires plans à air.



Fig.III.1 : Photo du four utilisé pour le séchage de la poterie à l'usine.

### III.2. Description du banc d'essais :

#### III.2.1. Le capteur solaire

Le capteur solaire étudié est un capteur plan à air à double passe, d'une longueur  $L_c=1.96m$  et d'une largeur  $l_c=0.9m$ ,  $A=1,76m^2$  (Fig. III.2.).

Ses principaux composants sont :

- Une couverture transparente de verre d'épaisseur 5mm.
- Une plaque absorbante mince en acier galvanisé peinte en noir mat avec une épaisseur de 0.4mm.
- La hauteur passive(couverture transparente-plaque absorbante) est égale à 25mm.
- La veine d'air dynamique d'une hauteur de 25mm comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et la plaque inférieure en acier galvanisé placée sur l'isolant.
- L'enceinte de séchage placée en dessous de la plaque inférieure est constituée de trois (03) coffres en bois.
- L'isolation arrière et latérale est assurée grâce à une feuille de polystyrène d'épaisseur 40mm insérée entre deux feuilles en contreplaqué de 5mm d'épaisseur. L'ensemble est contenu dans un boîtier en bois.



Fig.III.2 : Séchoir solaire utilisé dans la présente étude.

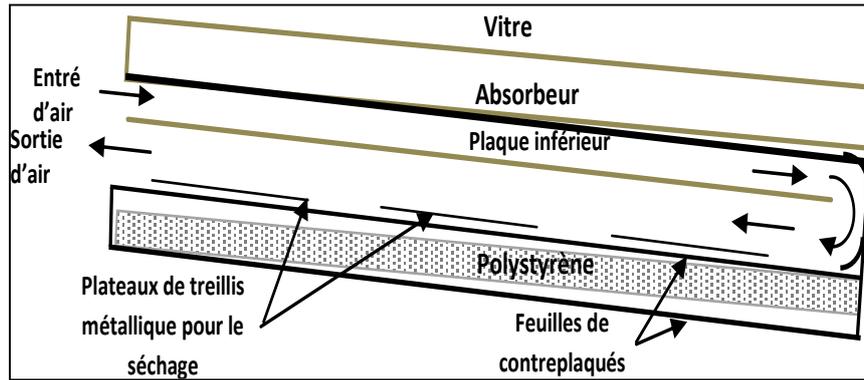


Fig.III.3 : schéma du dispositif expérimental utilisé

### III.2.2. Chambre de séchage

L'enceinte de séchage placée en dessous de la plaque inférieure est constituée de trois (03) coffres en bois dont la section est rectangulaire. Afin de supporter le produit dans la chambre de séchage, nous avons utilisé une grille d'acier galvanisé dont les mailles sont à faibles sections. Les tiroirs qui constituent les claies s'ouvrent vers les côtés latéraux pour commodité d'utilisation (Fig. III.4).

Les dimensions de l'enceinte de séchage sont :  $L_{ch}=1.90$  m,  $l_{ch}= 0.90$ m et  $H_{ch}=0.12$ m



Fig. III.4 : Chambre de séchage.

### III.3. Instruments de mesure

#### III.3.1. Mesure du rayonnement solaire :

Pour mesurer le rayonnement solaire global, nous avons utilisé un pyromètre (Voltcraft-L110SM) installé sur le capteur solaire avec le même angle d'inclinaison et dans la même direction.



Fig.III.5: Pyromètre (Voltcraft-PL110SM).

#### III.3.2. Pesage du produit :

Une balance numérique de précision de 1g est utilisée pour le pesage du produit testé. Le pesage s'effectue chaque une (01) heure.



Fig.III.6 : Balance numérique.

### III.3.3. Mesure de la température de la chambre de séchage

La température de la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'un Thermo-hygromètre avec une précision de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Il est utilisé également pour mesurer l'humidité, mais nous avons rencontré des problèmes lors de la mesure de cette dernière lorsque la température commence à s'élever.



Fig.III.6 : Thermo-hygromètre.

### III.3.4 Mesure de la température et de la vitesse de l'air :

La vitesse du vent, ainsi que celle de l'air à l'entrée du capteur est mesurée à l'aide d'un Anémomètre. Il est utilisé également pour mesurer la température ambiante.



Fig.III.7 : Anémomètre.

### III.4. Produit à séché :

Nous avons choisi un produit considéré comme important en Algérie, la poterie qui Propagation son industrie depuis l'Antiquité.

#### III.4.1. Composition de l'argile :

L'argile utilisée pour la briqueterie et la poterie est en général un mélange naturel de trois constituants principaux.

L'argile pure : Kaolinitique [alumine ( $Al_2O_3$ ), silice ( $2SiO_2$ ), eau ( $2H_2O$ )]

- Un flux (le feldspath) apportant les atomes de sodium (Na) ou de potassium (K) qui entrent dans la composition de la phase vitreuse,
- Une charge comme du sable (quartz) qui réduit le retrait, mais n'intervient pas lors des réactions de cuisson.

Plus une argile est plastique, plus elle nécessitera d'eau pour former une pâte de consistance dite « normale ». Elle peut donc supporter des corps inertes (dégraissants) tout en conservant une aptitude appréciable au toucher et une résistance mécanique au modelage. [3]

#### III.4.2. Source d'argile :

Nous avons apporté l'argile sous forme pâteuse d'une usine de poterie (S.A.R.L Ben-Sdira, El-Kantara) située dans la municipalité d'El-Kantara– Biskra.

#### III.4.3. Étapes de séchage dans l'usine :

- L'argile est mélangée avec de l'eau ensuite elle est pétrée. Un bloc d'argile sous forme cylindrique est placé dans la machine de recyclage, puis formée selon le souhait. Après l'achèvement de l'observation, la combinaison des pièces est nécessaire.
- La pièce est posée dans l'abri pour qu'elle soit séchée naturellement. La durée du séchage est en fonction de la taille et la forme de la pièce (entre un jour et quatre jours).
- L'usine est conçue de telle façon que le séchage se fait dans les fours présentés dans la (Fig.III.1). En réalité le séchage à l'usine se fait naturellement à l'abri ; à cause du non maîtrise de la technique du séchage au four, vu que ce dernier provoque des fissures des pièces séchées.



Fig.III.8 : Les cylindres de l'argile avant le formage.



Fig.III.9 : Opération de séchage naturel du produit.

#### III.4.4. Étapes de séchage expérimental (de la présente étude) :

Après avoir apporté de l'argile de l'usine de poterie, les étapes suivies pour réaliser les expériences de séchage de l'argile sont les suivantes :

- ✓ Formation de l'argile sous forme parallélépipédique
- ✓ Pesage de l'argile avant le séchage
- ✓ Dépôt de l'argile dans la chambre de séchage
- ✓ Pesage du produit chaque une (01) heure



Fig.III.9 : L'argile avant le séchage.



Fig.III.10 : L'argile après séchage

# Chapitre IV :

# **Résultats et**

# **discussion**

### IV.1. Introduction :

Afin de comparer entre les différents résultats de cette étude, et déterminer l'influence des différents paramètres étudiés sur le rendement du capteur et la cinétique de séchage ; nous présentons les résultats issus d'une série d'expériences effectuées durant des journées caractérisées par un ciel clair et faible vitesse de vent (5 et 6 mars et 15 avril).

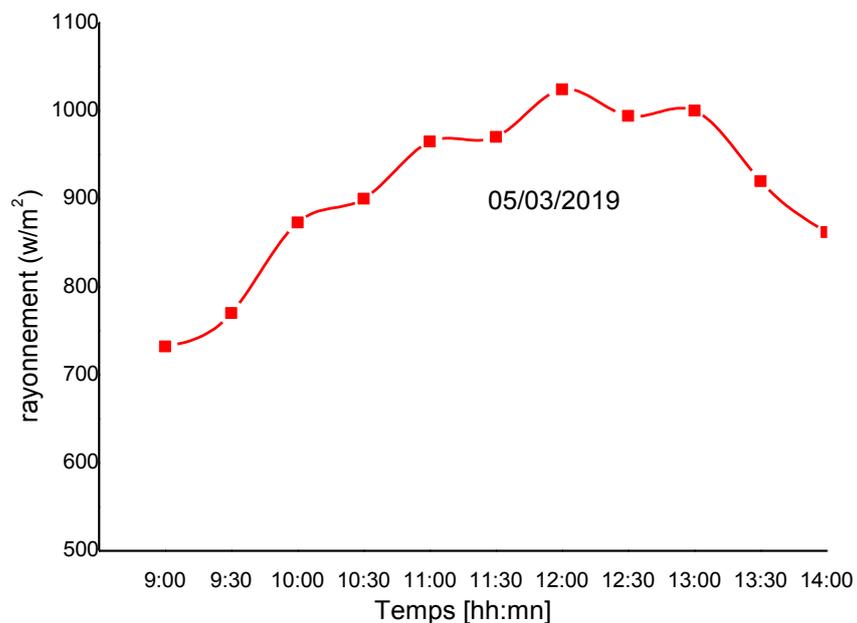
### IV.2. Résultats et discussion :

#### IV.2.1. Conditions climatiques :

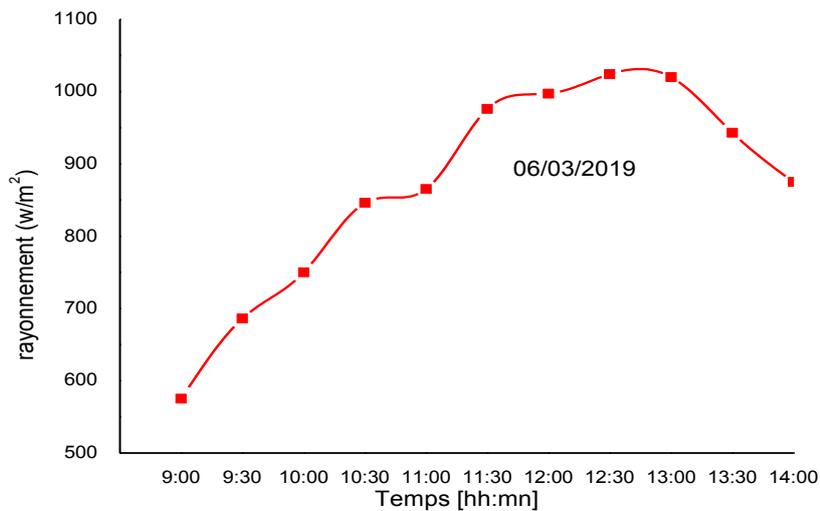
Les figures 1 et 2 montrent l'évolution des différents paramètres climatiques (rayonnement solaire et vitesse du vent) du fait que les perturbations de l'ensoleillement ainsi que la vitesse du vent ont une influence importante sur le comportement du capteur solaire plan à air.

##### ➤ Variation du rayonnement solaire :

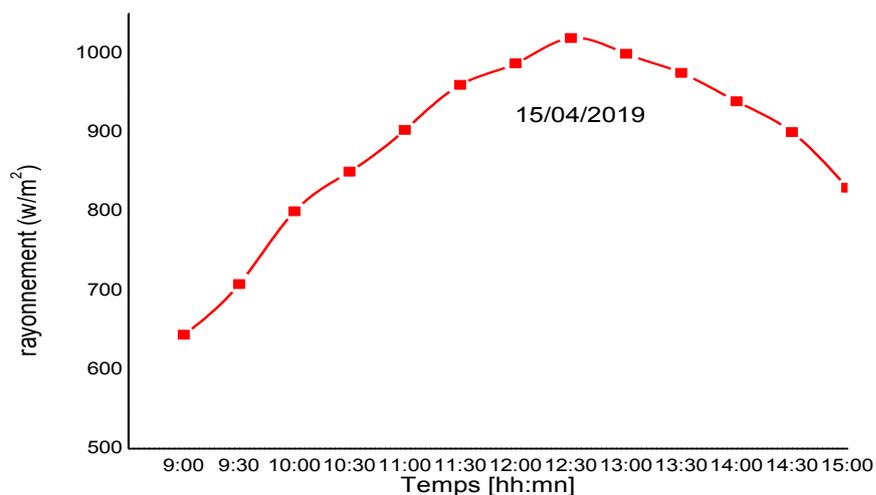
Les figures IV.1-a, b et c montrent la variation du rayonnement solaire durant les journées d'expériences. On remarque que les courbes présentant les valeurs du rayonnement ont des allures semblables est presque les mêmes valeurs maximales au midi solaire.



(a)-  $Q=0.0061\text{kg/s}$



(b)-  $Q=0.0078\text{kg/s}$

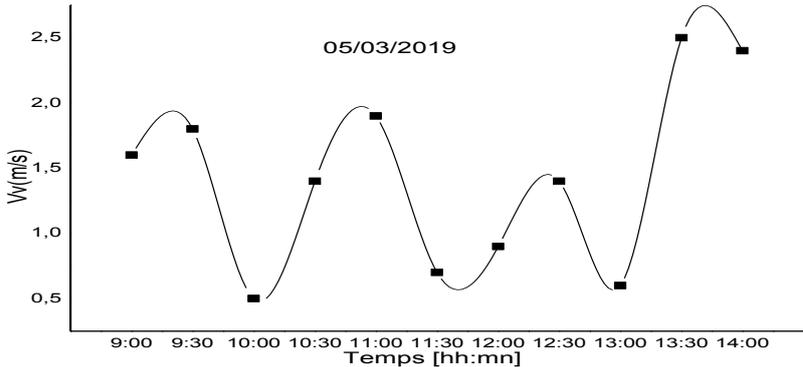


(c)-  $Q=0.011\text{kg/s}$

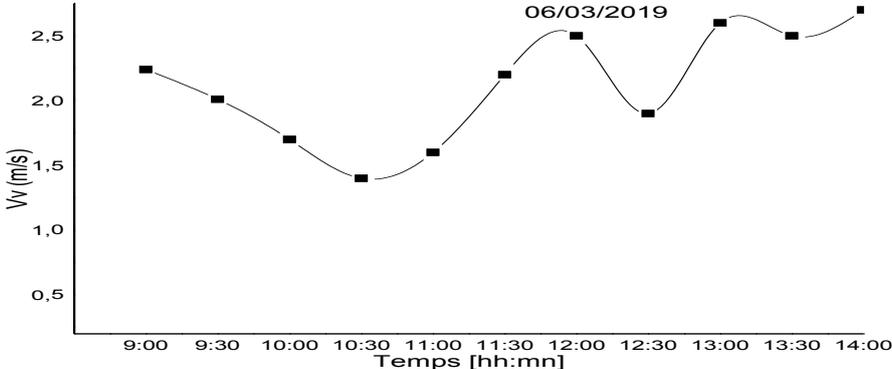
**Fig .IV.1** : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps des différentes journées de séchage

➤ **Variation de la vitesse du vent :**

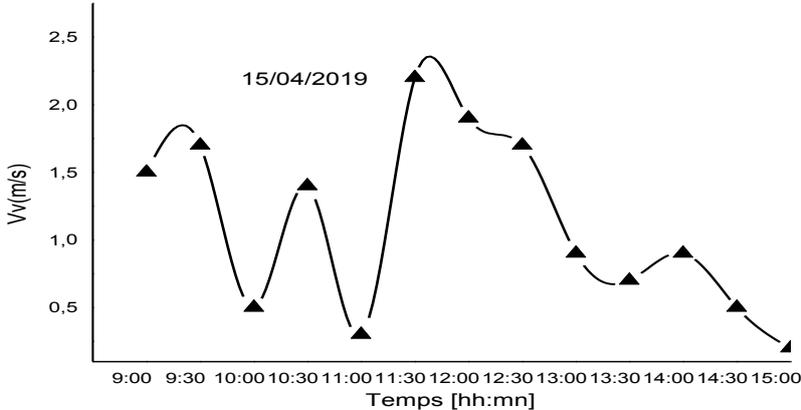
Les figures IV.2-a, b et c montrent la variation de la vitesse du vent durant les journées d'expériences. On remarque que les courbes présentant les valeurs de vitesse n'ont pas dépassés 3m/s durant ces journées et que ces courbes ont des allures oscillatoires.



(a)- $Q=0.061\text{kg/s}$



(b)- $Q=0.0078\text{kg/s}$

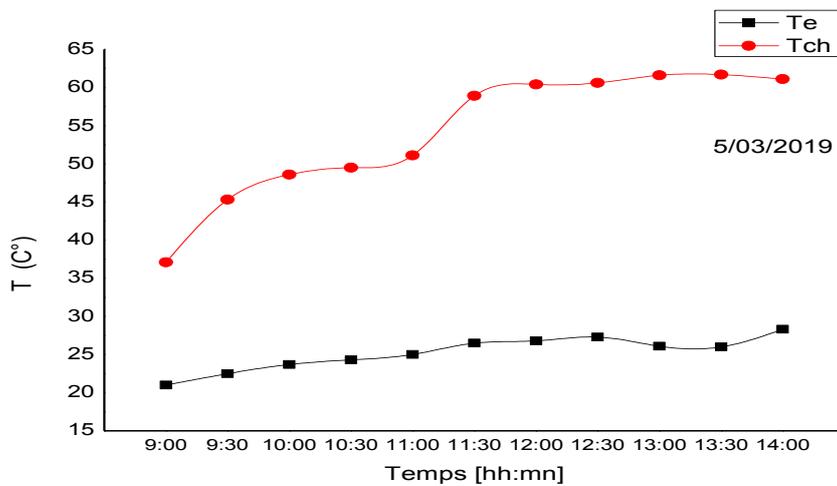


(c) - $Q=0.011\text{kg/s}$

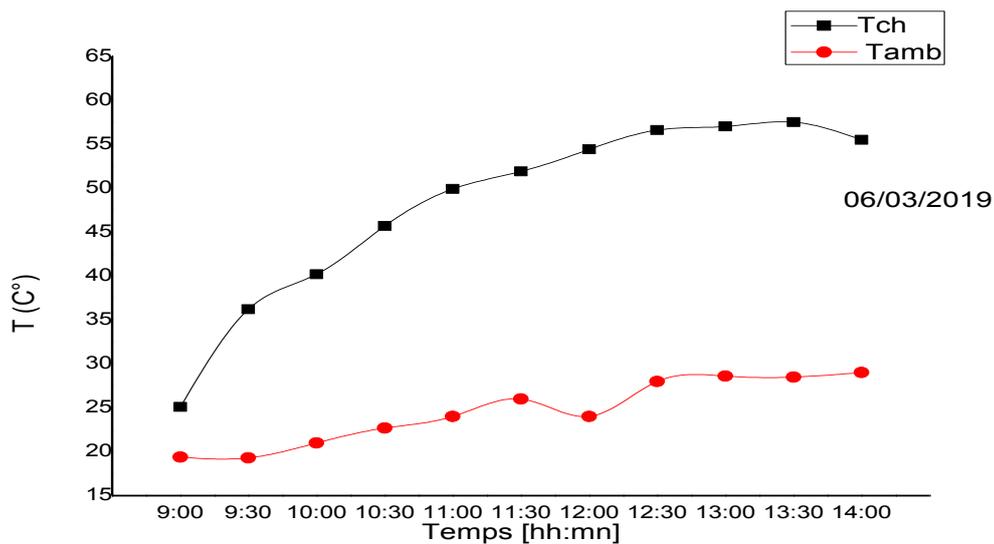
Fig.IV.2 : Variation de la vitesse du vent durant les journées d'expériences

IV.2.2. Variation des températures d'entrée et de la chambre de séchage :

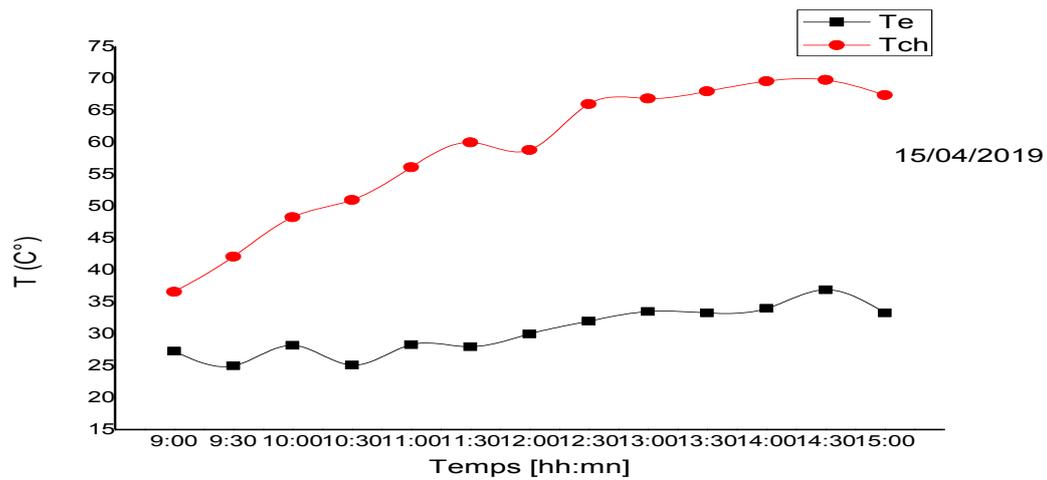
Les figures IV.3-a, b et c montrent les variations des températures d'entrée et de la chambre de séchage durant les journées d'expériences. On remarque d'après les courbes présentant les valeurs des températures de la chambre que ces valeurs ont diminuées légèrement avec l'augmentation du débit d'air de 0.0061 à 0.0078kg/s. par contre, ces valeurs ont augmentés durant la troisième expérience bien que le débit été plus élevé. Ceci est peut être due aux conditions climatiques et surtout la température ambiante qui a été légèrement élevée.



(a)-Q=0.0061kg/s



(b)-Q=0.0078kg/s

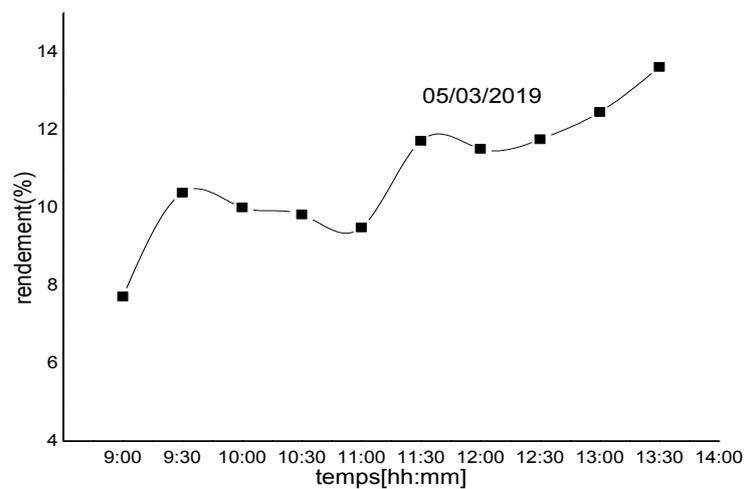


(c)-Q=0.011kg/s

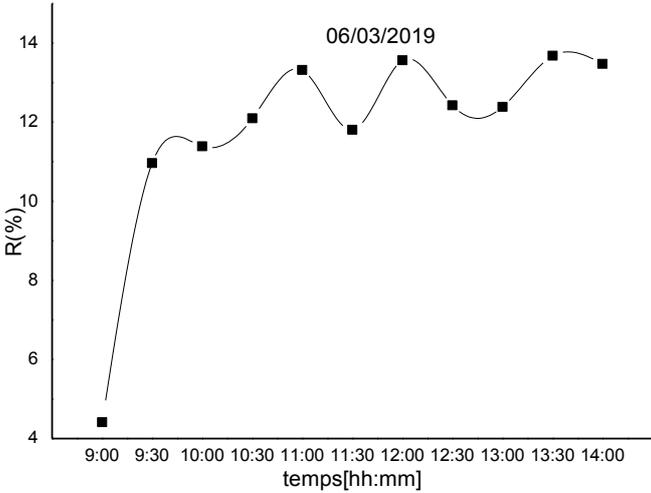
Fig. IV.3 : Variation des températures ambiante et de la chambre de séchage en fonction du temps de séchage durant les journées d'expériences.

### IV.2.3. Variation du rendement thermique en fonction du temps de séchage

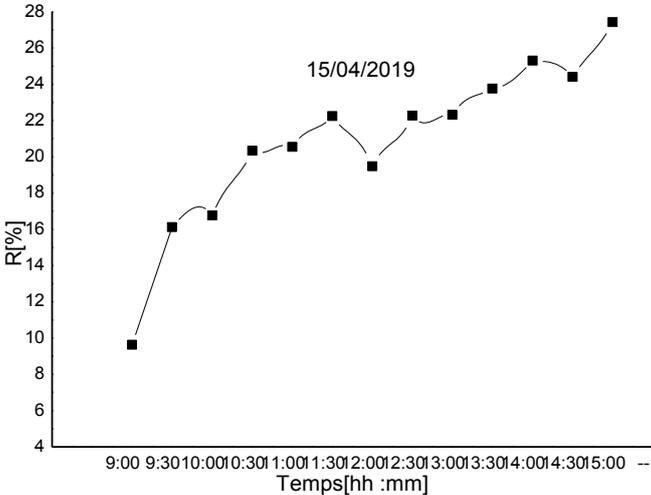
En comparant les figures IV.4-a, b et c ; nous remarquons pour ces trois valeurs de débit que le rendement a une faible valeur au début de l'expérience, et il augmente progressivement jusqu'à la fin de l'expérience. Il s'avère à travers les courbes des trois figures que les valeurs du rendement à grand débit (0.011kg/s) sont plus élevées à celles du débit moyen (0.0078kg/s) et que ces dernières sont à leur tour plus élevées que celles à faible débit (0.0061kg/s).



(a)-Q=0.0061kg/s



(b)-Q=0.0078kg/s



(c) -Q=0.011kg/s

Fig. IV.4. Evolution du rendement thermique pour des débits fixes durant les journées d'expériences.

La figure (IV.5), traduit la variation du rendement thermique en fonction du débit. Nous remarquons que le rendement thermique augmente avec l'augmentation du débit d'air ; ceci confirme les constatations soulevées précédemment.

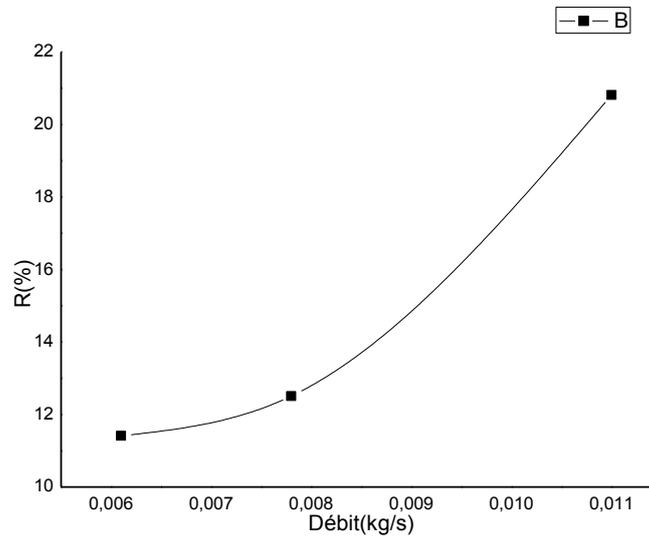
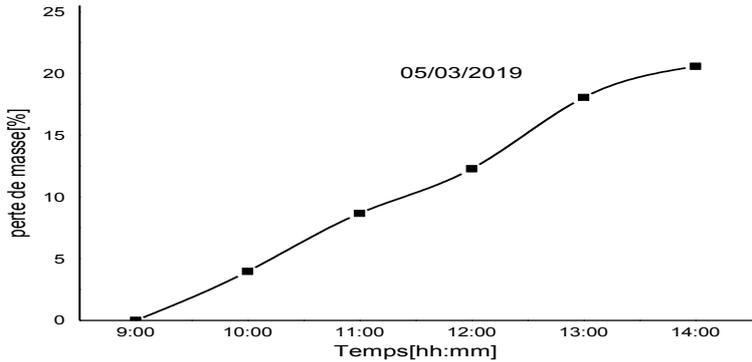


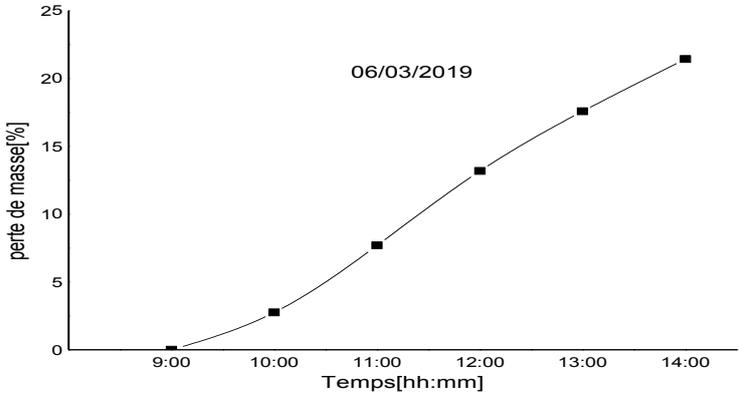
Fig. IV.5. Variation du rendement thermique du séchoir en fonction du débit de l'air asséchant.

#### IV.2.4. Variation de la perte de masse en fonction du temps de séchage :

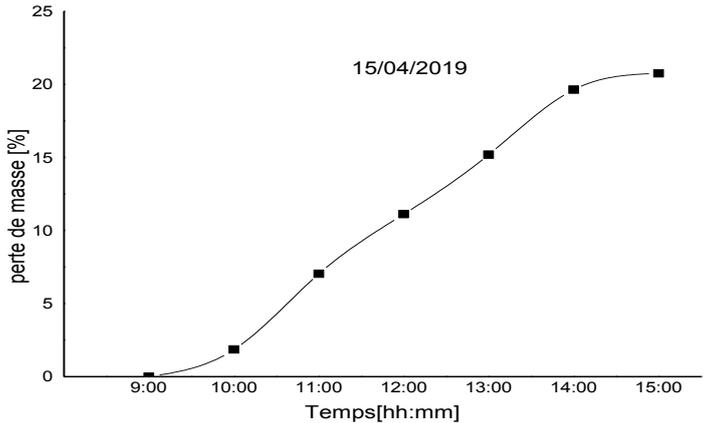
Les figures IV-5 a, b et c, présentent la variation de la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage des trois expériences. Il s'avère à travers ces courbes que le deuxième débit  $Q=0.0078\text{kg/s}$  a permis de perdre la totalité de la masse humide dans une période plus courte par rapport aux autres débits (0.0061 et 0.011 kg/s).



(a)- $Q=0.0061\text{kg/s}$



(b)- $Q=0.0078\text{kg/s}$



(c)- $Q=0.011\text{kg/s}$

Fig. IV.6 : Variation de la perte de masse en fonction du temps de séchage

### IV.2.5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage :

La figure (IV.3.) traduit l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour différents débits. Le contenu final en eau à base sèche obtenue après environ quatre heures de séchage est égal à 0.03 kg/kg(ms), pour le cas du débit d'air de 0.0061kg/s. Lorsqu'on a augmenté le débit à 0.0078 kg/s, l'humidité à la surface du produit est rapidement déplacée et transportée vers l'extérieur, ce qui accélère le séchage de l'argile et améliore le temps de séchage où on est arrivé à une teneur en eau égale à 0.07 kg/ kg(ms) après quatre heures de séchage.

Pour un débit de 0.011 kg/s, nous notons une augmentation relative du temps de séchage, d'où la valeur de la teneur en eau après quatre heures de séchage été d'environ 0.04kg/kg(ms) , ce qui est un peu plus élevé par rapport aux deux autres expériences.

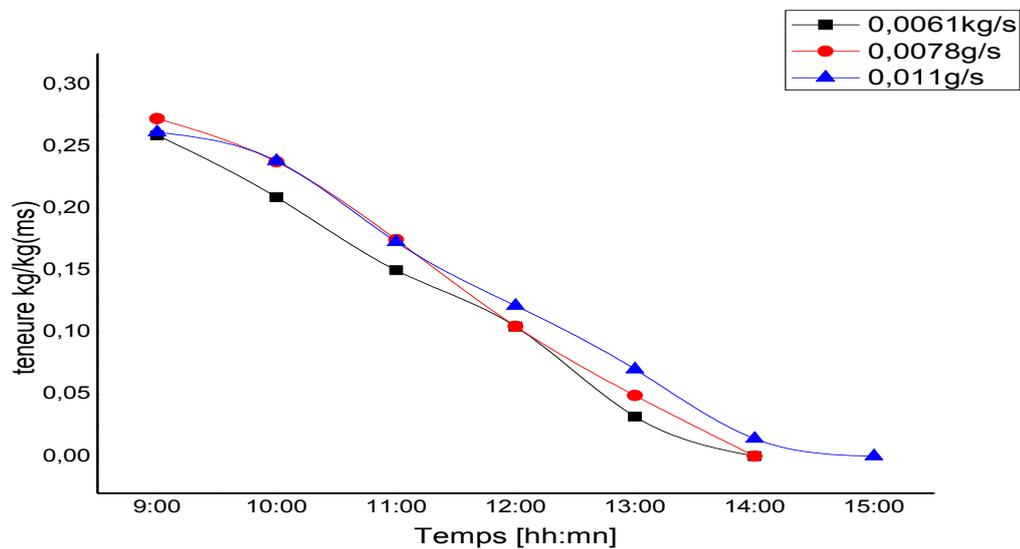


Fig. IV.7 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.

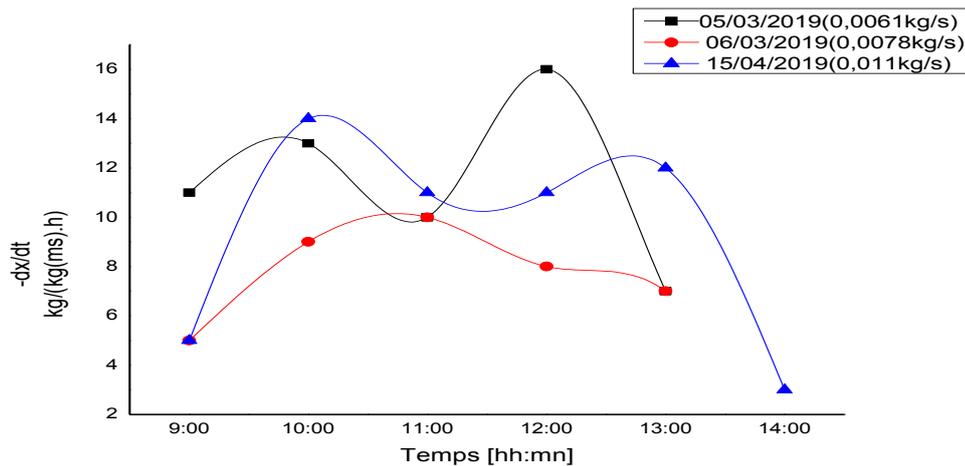
### IV.2.6. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage :

La figure (IV.8) traduit l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage, Nous remarquons que pendant les premières quatre heures du séchage (9h00 à 11h00), la vitesse de séchage de l'argile avec un débit de 0.011kg/s été plus élevée que celle avec un débit de 0.0061kg/s et cette dernière été plus élevée que celle du débit de 0.0078kg/s.

A partir de 11h00 jusqu'à 12h00, nous remarquons une diminution des vitesses de séchage avec les deux débits (0.0078kg/s et 0.011kg/s) en comparant avec celle du faible débit (0.0061kg/s). A partir de 12:00, nous remarquons une diminution des vitesses de séchage avec

les deux débits (0.0061,0.0078kg/s) en comparant avec celle du grand débit (0.011kg/s) en raison de la faible teneur en eau du produit lors du séchage.

En générale, on peut remarquer que la courbe de la vitesse de séchage pour le deuxième débit (0.0078kg/s) est la plus proche aux courbes typiques de séchage.



**Fig. IV.8 :** Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage pour trois débits différents.

### IV.3.Conclusion :

Il s'avère à travers les courbes des figures présentées dans ce chapitre que, les valeurs du rendement à grand débit (0.011kg/s) sont plus élevées à celles du débit moyen (0.0078kg/s) et que ces dernières sont à leur tour plus élevées que celles à faible débit (0.0061kg/s) ; ce qui veut dire que, le rendement thermique augmente avec l'augmentation du débit d'air.

D'après les courbes des pertes de masse, nous constatons que, le deuxième débit  $Q=0.0078\text{kg/s}$  a permis de perdre la totalité de la masse humide dans une période plus courte par rapport aux autres débits (0.0061 et 0.011 kg/s).

Le contenu final en eau à base sèche obtenue après environ quatre heures de séchage est égal à 0.03 kg/kg (ms), pour le cas du débit d'air de 0.0061kg/s. Lorsqu'on a augmenté le débit à 0.0078 kg/s, l'humidité à la surface du produit est rapidement déplacée et transportée vers l'extérieur, ce qui accélère le séchage de l'argile et améliore le temps de séchage où on est arrivé à une teneur en eau égale à 0.07 kg/ kg (ms) après quatre heures de séchage.

En générale, on peut remarquer que la courbe de la vitesse de séchage pour le deuxième débit (0.0078kg/s) est la plus proche aux courbes typiques de séchage.

# CONCLUSIO N GENERAL

### *CONCLUSION GENERALE*

Ce travail est une contribution à l'étude du séchage solaire d'un produit jugé très important au patrimoine national, c'est l'Argile utilisé pour la production de la poterie.

Les tests expérimentaux effectués sont basés sur l'utilisation d'un séchoir solaire à double passage d'air. Ce séchoir est conçu et réalisé à l'université de Biskra. Les courbes de la variation des vitesses de séchage, pertes de masse du produit, le contenu final en eau à base sèche et le rendement thermique du capteur en fonction du débit d'air, ont été présentées

Il s'avère à travers les résultats que, le rendement thermique du CSP augmente avec l'augmentation du débit d'air.

D'après les courbes des pertes de masse, nous constatons que, le deuxième débit  $Q=0.0078\text{kg/s}$  a permis de perdre la totalité de la masse humide dans une période plus courte par rapport aux autres débits (0.0061 et 0.011 kg/s). Ceci se traduit aussi sur les courbes présentant le contenu final en eau à base sèche qui confirme les constatations prises précédemment.

Enfin, la conclusion la plus importante des courbes de séchage ; c'est que le deuxième débit a permis le séchage de l'argile dans une plus courte durée. De même ; la courbe de la vitesse de séchage pour le deuxième débit (0.0078kg/s) est la plus proche aux courbes typiques de séchage.

- [1] Labeled. A. Contribution à l'étude des échanges convectifs en régime transitoire dans les capteurs solaires plans à air, Application au séchage des produits agroalimentaires. Thèse de doctorat, Université de Biskra.2012.
- [2] H. Houhou. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agroalimentaires. Université de Biskra.2012.
- [3] S. Benlahmidi Etude du séchage convectif par l'énergie solaire des produits rouges. Thèse de doctorat, Université Biskra.2013.
- [4] D.Mennouche.Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire. Thème magister, Université Ouargla.2006.
- [5] A. Guessoum, M. Houti.Etude et amélioration du fonctionnement d'un séchoir solaire direct à convection naturelle. Thème Master Académique. Université Ouargla.2016.
- [6] H.Elhage, A. Herez, M. Ramadan, H. Bazzi, M. Khaled. An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment.
- [7] D.Gudiño-Ayala, A.Calderón-Topete. Pineapple drying using a new solar hybrid dryer. In Energy Procedia 57. (2014). 1642 – 1650.
- [8] A.Elsamila, W.Dyah, Performance .of the Rack Type-Greenhouse Effect Solar Dryer for Wild Ginger (*Curcuma xanthorrhiza*Roxb). Drying Energy Procedia 47 (2014) 94 – 100.
- [9] A. Guimarães Ferreira, L.Matias Gonçalves , C. Brasil Maia. Solar drying of a solid waste from steel wire industry .Applied Thermal Engineering 73 (2014). 102-108.
- [10] A. Labeled, N. Moummi, K. Aoues, A. Benchabane . Solar drying of henna (*Lawsonia Inermis*) using different models of solar flat plate collectors: An experimental investigation in the region of Biskra (Algeria).Journal of Cleaner Production.2015
- [11]S. K. Sansaniwal, M. Kumar. Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES).Volume 9, pp. 1671-1685, December 2015.
- [12] D, K. Rabha, P. Muthukumar, C. Somayaji. Experimental Investigation of Thin Layer Drying Kinetics of Ghost Chill Pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) Dried in a Forced Convection Solar Tunnel Dryer. Dried in a Forced Convection Solar Tunnel Dryer, Renewable Energy (2016).

- [13] D, K. Rabha, P. Muthukumar, C. Somayaji. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger. *Renewable Energy* 105 (2017) 764-773.
- [14] A. Lingayat, V, P. Chandramohan, V.R.K, Raju. Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia* 109 (2017) 409 – 416.
- [15] A. Godireddy ,A.Lingayat, R. Kumar Naik, V. P. Chandramohan ,V. R. K. Raju.Numerical Solution and it's Analysis during Solar Drying of Green Peas.
- [16]K, B.Koua, E, P. Magloire, P. Gbaha. Séchage des fèves de cacao dans un séchoir solaire indirect à circulation forcée d'air. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 2(2), pp. 15-19. ISSN 2312-8712.
- [17] D. KARIDIOULA, D .C. AKMEL, N.E.ASSIDJO, A TROKOUREY. Modélisation du séchage solaire de fèves de cacao par le Réseau de Neurones Artificiel *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12(1) : 195-202, February 2018.
- [18] S. Oudjedi, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui et A. Belhamri. Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie : 2).*Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger* (2008) 255 – 266.
- [19] S. M, Hassen. Étude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud - est algérien (ourgla).
- [20] D.Kheld.Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air. Mémoire de Magister. Université de Biskra.
- [21] B.Warda. Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires. Mémoire de Magister Université d'OUARGLA.2009
- [22] B. Touati. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*mentha viridis*).2004.
- [23] F.Adouane. Etude et optimisation du séchage solaire indirect des produits agro-alimentaires dans la région de Biskra. Thème Master. Université Biskra.2018.

## ملخص:

هذا العمل يعنى بالدراسة التجريبية للتجفيف الشمسي للطين المخصص لصناعة الخزف (مؤسسة بن سديرة لصناعة الفخار، القنطرة) باستعمال مجفف شمسي مزدوج الممر الهوائي. الهدف الرئيس من هذا العمل هو تخفيض الزمن اللازم لتجفيف الطين وذلك من خلال التحقيق في مدى التأثير المزدوج لحرارة وتدفق الهواء. من خلال التجارب المنجزة قمنا برسم المنحنيات الخاصة بالمردود الحراري للملتقط الشمسي، التغير في فقدان الكتلة، نسبة الماء وكذا تغير سرعة التجفيف بالنسبة للزمن. تبين من خلال النتائج أن التدفق الأوسط (0.0078 كغ/ثا) سمح بتجفيف الطين في أقصر وقت مقارنة بالتدفقين الآخرين المستعملين، كما أن المنحنى المعبر عن تغير سرعة التجفيف باستعمال هذا التدفق كان الأقرب للمنحنيات النموذجية للتجفيف.

## Résumé :

Ce travail est une étude expérimentale du séchage solaire de l'argile de poterie (S.A.R.L. Ben-Sdira, El-Kantara), en utilisant un capteur solaire plan à air à double passages d'air. L'objectif principal de ce travail est de réduire le temps de séchage de l'argile en mettant l'accent sur l'influence du couple température/débit d'air. Les courbes présentant le rendement thermique du CSP, ainsi que, la perte de masse, la vitesse du séchage et la teneur en eau du produit durant le processus de séchage ont été présentées. Il s'avère a travers les résultats de l'étude que, le deuxième débit (0.078Kg/s) a permis le séchage de l'argile dans la plus courte durée, ainsi que, la courbe de la vitesse de séchage avec ce débit est la plus proche aux courbes typiques de séchage.