



**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**FACULTE DES SCIENCES  
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

N° d'ordre :  
N° de série :

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

**Spécialité : Physique**

**Option : Physique énergétique**

Présenté par :

**Mahdadi Roukia**

**Thème**

**ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE  
DE DEUX PROTOTYPES DE SECHAGE SOLAIRE**

**Soutenu publiquement le : 15/ 02/2009**

**Devant le jury composé de :**

Mr	Smail Chihi	Maitre de Conférences	Université de Ouargla	Président
Mr	Hocine Benmoussa	Professeur	Université de Batna	Examineur
Mr	Mostefa Zeroual	Maitre de Conférences	Université de Batna	Examineur
Mr	Bachir Bouchekima	Professeur	Université de Ouargla	Rapporteur
Mr	Slimane Boughali	M.A. chargé de cours	Université de Ouargla	Co-rapporteur
Mr	Abdelghani Boubekri	M.A. Chargé de cours	Université de Ouargla	Membre Invité

## **Remerciements**

*Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour terminer mon travail de recherche.*

*Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur Monsieur le Professeur Bachir Boucheḳima pour avoir accepté de diriger ce mémoire.*

*Tous mes remerciements à mon co-encadreur Monsieur Boughali Slimane Maître assistant Chargé de cours à l'université de Ouargla, de sa collaboration et de sa patience durant la période de l'encadrement.*

*A Monsieur Smail Chihî, Maître de conférences à l'université de Ouargla pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury de mémoire de magister.*

*Je voudrais aussi remercier tous les membres de jury, Monsieur Hocine Benmoussa, Professeur à l'université de Batna et Monsieur Mostefa Zeroual, Maître de Conférences à l'université de Batna, avec ma profonde gratitude de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'avoir accepté de le juger.*

*Je remercie également Monsieur Abdelghani Boubekri, Maître assistant chargé de cours à l'université de Ouargla, d'avoir accepté d'être membre de mon jury de mémoire.*

*Aussi je n'oublie pas de remercier Monsieur Djamel Bechḳi, Maîtres assistant chargé de cours à l'université de Ouargla et Monsieur Mennouche Djamel Maître assistant à l'université de Ouargla, pour leur aide, leurs conseils dans le domaine expérimental, ainsi que leurs encouragements.*

*J'exprime mes profondes gratitude à mon époux Mahdadi Saïd pour son aide efficace et ses encouragements durant le parcours de ce travail et à toute ma famille.*

*Une attention particulière à Monsieur Houti Ahmed, le technicien du laboratoire de physique pour son aide durant l'installation du séchoir solaire.*

*Je remercie ma chère amie Nadia Nadir pour son soutien moral et son aide.*

*Enfin je remercie toutes mes amies : Warda Belachi, Souad Babay et Rezaiguia Mina pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous ce qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude et toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail.*

## Résumé

Ce travail représente les résultats d'une étude expérimentale du séchage de la tomate par deux prototypes de séchoirs solaires indirect à convection naturelle et à convection forcée. Le principal objectif étant l'étude comparative de leurs efficacités énergétiques d'après l'évaluation énergétique des séchoirs solaires.

Le rayonnement solaire, la température, l'humidité, le débit de l'air asséchant, temps de séchage, le rendement du capteur solaire et l'efficacité de séchage sont les paramètres principaux influant directement sur l'efficacité énergétique de nos séchoirs solaires.

Les résultats expérimentaux montrent que:

- L'efficacité énergétique de séchoir solaire naturel variant entre 12-15%, et entre 10-13% pour le séchoir solaire forcé.
- Le séchoir solaire naturel est le plus efficace par rapport au séchoir solaire forcé.

**Mots clés :** séchoir solaire, tomate, convection naturelle, convection forcée, efficacité énergétique.

## Abstract

This work represents the results of an experimental study of the drying of tomato by two prototypes of solar driers indirect with natural convection and forced convection. The objective principle being comparative studies their thermal efficiency of during the energy evaluation of our solar drier.

The solar radiation, the temperature, moisture, the air flow, the drying time, the thermal efficiency of solar collector and the thermal efficiency of drying chamber are the principal parameters which influencing directly of our solar drier.

The experimental results show that:

-The thermal performance of natural solar drier varies between 12 -15 and between 10 – 13% for the forced solar drier.

-The natural solar drier is most effective compared to the forced solar drier.

**Keywords:** solar drier, tomato, natural convection, forced convection, thermal efficiency.

## **المخلص:**

هذا العمل يمثل نتائج دراسة تجريبية للتجفيف الشمسي لمنتجات الطماطم بواسطة نوعين من المجففات الشمسية غير المباشرة، الطبيعي و القسري. الهدف الرئيسي لهذا العمل التجريبي هو دراسة مقارنة للفعالية الطاقوية من خلال التقييم الطاقوي لهذين المجففين الشمسيين.

الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، تدفق التيار الهوائي، للهواء المجفف، زمن التجفيف، مردود المجمع الشمسي و الفعالية الطاقوية للتجفيف هي العوامل الأساسية التي تؤثر مباشرة على الفعالية الطاقوية للمجفف الشمسي.

النتائج التجريبية بينت أن:

• الفعالية الطاقوية للمجفف الشمسي الطبيعي تتغير بين 12 % و 15 % و بين 10% 13% بالنسبة للفعالية الطاقوية للمجفف الشمسي القسري.

• المجفف الشمسي الطبيعي أكثر فعالية طاقوية من للمجفف الشمسي القسري.

**الكلمات المفتاحية :** مجفف شمسي- طماطم - الحمل الحراري الطبيعي - الحمل الحراري القسري - الفعالية الطاقوية.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Présentation de l'eau dans le matériau	05
Figure 1-2 : Courbes d'adsorption-désorption du produit à sécher	06
Figure 1-3 : Périodes du séchage	09
Figure 1-4 : Représentation schématique du transfert de chaleur par conduction	12
Figure 1-5 : Représentation schématique du transfert de chaleur par convection	13
Figure 1-6 : Représentation schématique du transfert de chaleur par rayonnement	14
Figure 1-7 : Quelques isothermes de corps noir	15
Figure 2-1: Classification des séchoirs solaires et des modes de séchage.	17
Figure 2-2: Les séchoirs solaires directs	19
Figure 2-3: Les séchoirs solaires indirects	21
Figure 2-4: Les séchoirs solaires hybrides	23
Figure 2-5: Les séchoirs solaires mixtes	25
Figure 2-6 : Schéma montrant le principe de l'effet de serre	26
Figure 2-7: Capteur solaire plan	28
Figure 3-1: Schéma descriptif du séchoir solaire naturel	37
Figure 3-2: Schéma descriptif du séchoir solaire forcé	38
Figure 3-3: Variation du rayonnement global en fonction du temps	42
Figure 3-4: Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=3kg	43
Figure 3-5: Variation de débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage M=3kg	44
Figure 3-6: Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=3kg	45
Figure 3-7: Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage M=3kg	46
Figure 3-8: Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps M=3kg	47
Figure 3-9 : Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps de séchage M=3kg	48
Figure 3-10 : Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage M=3kg	49

Figure 3-11 : Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage du séchoir naturel en fonction du temps de séchage ( $M_1=3\text{kg}$ , $M_2=4\text{kg}$ , $M_3=6\text{kg}$ )	50
Figure 3-12: Comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir naturel en fonction du temps de séchage ( $M_1=3\text{kg}$ , $M_2=4\text{kg}$ , $M_3=6\text{kg}$ )	51
Figure 3-13: Variation du rayonnement global en fonction du temps	52
Figure 3-14 : Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$	53
Figure 3-15: Le débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Figure 3-16: Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Figure 3-17: Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$	56
Figure 3-18 : Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps ( $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ )	57
Figure 3-19: Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps ( $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ )	58
Figure 3-20 : Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ , $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ )	59
Figure 3-21: Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage forcé en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ , $v_{a1}=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v_{a2}=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v_{a3}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	60
Figure 3-22 : Comparaison de l'efficacité énergétique de séchoir forcé en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ , $v_{a1}=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v_{a2}=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ , $v_{a3}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	61
Figure 3-23: Comparaison de la température de l'air asséchant de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	62
Figure 3-24: Le débit volumique de l'air asséchant de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	63
Figure 3-25: Comparaison de l'humidité relative de l'air asséchant pour deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	64
Figure 3-26: Comparaison de la teneur en eau de la tomate dans les deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	65
Figure 3-27: Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	66
Figure 3-28: Comparaison de l'efficacité énergétique pour deux séchoirs solaires en fonction du temps de séchage ( $M=4\text{kg}$ , $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )	67

	<i>Nomenclature</i>	<i>Unité</i>
A	Surface de capteur	m <sup>2</sup>
B	Inclinaison du capteur	deg
C	Concentration du constituant considéré	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique de l'air	J/kg. °C
D <sub>c</sub>	Coefficient de diffusion moléculaire	m <sup>2</sup> /s
ds	Surface élémentaire normal à la direction $\vec{n}$	m <sup>2</sup>
g	Accélération de la pesanteur	m/s <sup>2</sup>
H <sub>r</sub>	Humidité relative de l'air	%
H <sub>ras</sub>	Humidité relative de l'air asséchant	%
h <sub>c</sub>	Coefficient de convection thermique	W/m <sup>2</sup> .K
k <sub>G</sub>	Coefficient de transfert de masse en phase gazeuse	kmole/s.m <sup>2</sup> .a tm
L <sub>v</sub>	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à température moyenne T	kJ/kg
$M_{\lambda,T}^0$	Emittance monochromatique	W/m <sup>2</sup> .μm
M	Masse du produit	kg
m <sub>a</sub>	Masse de l'air	kg
m <sub>as</sub>	Masse de l'air sec	kg
m <sub>e</sub>	Masse d'eau évaporée	kg
m <sub>s</sub>	Masse du produit	kg
$\dot{m}$	Débit massique de l'air	kg/s
$\frac{N_A}{A}$	Densité de flux massique	kg.mol/s.m <sup>2</sup>
P	Pression atmosphérique	Pa
P <sub>AG</sub>	Pression partielle moyenne de la vapeur d'eau dans la région de la phase gazeuse	Pa
P <sub>AI</sub>	Pression partielle de la vapeur d'eau à l'interface gaz-liquide	Pa
P <sub>s</sub>	Pression de saturation	Pa
P <sub>v</sub>	Pression de vapeur d'eau	Pa
R	Constant des gaz	J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
S	Surface d'échange	m <sup>2</sup>
T	Température	K, °C

U	Vitesse moyenne	m/s
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau/kg MS
X <sub>a</sub>	Humidité absolue de l'air	kg eau / kg air sec
X <sub>ae</sub>	Humidité absolue de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	kg eau / kg air sec
X <sub>as</sub>	Humidité absolue de l'air à la sortie la chambre de séchage	kg eau / kg air sec
X <sub>f</sub>	Teneur en eau finale (équilibre) du produit	kg eau/kg MS
X <sub>h</sub>	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau/kg Mh
X <sub>i</sub>	Teneur en eau initiale du produit	kg eau/kg MS
X <sub>ae</sub> <sup>sa</sup>	Humidité absolue de l'air saturé	kg eau/kg MS
η <sub>c</sub>	Efficacité du capteur solaire	%
η <sub>ch</sub>	Efficacité énergétique de séchage (la chambre de séchage)	%
η <sub>p</sub>	Efficacité énergétique maximale de séchage	%
η <sub>s</sub>	Efficacité énergétique d'un séchoir solaire	%
Φ	Flux de chaleur	W
φ <sub>a</sub>	Flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur	W/m <sup>2</sup>
φ <sub>p</sub>	Puissance perdue	W/m <sup>2</sup>
φ <sub>s</sub>	Puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur	W/m <sup>2</sup>
φ <sub>u</sub>	Puissance utile récupérée l'air	W/m <sup>2</sup>
λ	Conductivité thermique du l'air	W/m. °C
v <sub>a</sub>	Débit volumique de l'air	m <sup>3</sup> /s
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m <sup>3</sup>
WAC	Capacité d'absorption d'eau (Water Absorption Capacity)	
DHC	Capacité de la matière sèche (Dry matter Holding Capacity),	
RC	Capacité de réhydratation du produit sec	
<b>Indice</b>		
ab	Ambiante	
e-cp	Entrée du capteur	

e-ch	Entrée de la chambre	
F	Séchoir forcé	
s-ch	Sorte de la chambre	
s-cp	Sorte du capteur	
N	Séchoir naturel	



## TABLE DES MATIERES

Remerciement

Liste des figures

Nomenclature

<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>
------------------------------	-----------

### CHAPITRE 1 : Etude théorique du séchage

I. Généralités	03
I.1. Définition	03
I.2. Caractérisation de l'air de séchage	03
I.3. Caractérisation des solides humides	04
II. Séchage des produits agroalimentaires	04
II.1. Description du solide humide	04
II.2. Hygroscopicité	05
II.3. Isothermes de sorption	05
II.4. Mode de séchage	06
II.5. Processus de séchage	07
II.6. Vitesse de séchage	08
II.7. Cinétique de séchage	08
II.8. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	10
III. Modes de transfert	11
III.1. Transfert de chaleur	11
III.2. Transfert de masse	15

### CHAPITRE 2 : Etude comparative des séchoirs solaires

I. Les séchoirs solaires	17
I.1. Les types des séchoirs solaires	17
I.1.1. Les séchoirs solaires directs	17
I.1.2. Les séchoirs solaires indirects	20
I.1.3. Les séchoirs solaires hybrides	22
I.1.4. Les séchoirs mixtes	24
I.2. Les capteurs solaires plans	26
II. Comparaison des séchoirs solaires	28

II.1. Les paramètres généraux dans l'évaluation et la comparaison des séchoirs Solaires	28
II.1.1. Les paramètres physiques de séchoir	29
II.1.2. Les paramètres énergétiques	30
II.1.3. Les paramètres de qualité des produits secs	35
<b>CHAPITRE 3 : Etude expérimentale</b>	
I- Introduction	37
I-1-Description du séchoir solaire naturel	37
I-2-Description du séchoir solaire forcé	38
I-3-Protocole et méthodologie expérimentale	39
II -Résultats expérimentaux	41
II- 1-Séchoir naturel	52
II- 2-Séchoir forcé	
II- 3-Etude comparative de l'efficacité énergétique entre les deux séchoirs solaires	62
III. Résumé et discussion des résultats expérimentaux	68
III.1. Résumé des résultats expérimentaux de deux prototypes	68
III.2. Discussion des résultats expérimentaux	69
<b>Conclusion</b>	<b>70</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

## INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, le séchage solaire est une technique très répandue à travers le monde, il permet de stocker et de valoriser les excédents de production pour les commercialiser en période de pénurie [1].

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide [2]. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires.

Pendant le séchage par cette méthode, des pertes considérables peuvent se produire en raison de diverses influences telles que les oiseaux, les insectes, les poussières, les pluies etc. L'utilisation des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peut réduire les pertes et améliorer la qualité du produit sec [3].

Pour cette raison plusieurs études expérimentales et simulation ont été réalisées sur le développement de divers types de séchoirs solaires pour des applications de macro-échelle et sur l'évaluation des aspects techniques et économiques des séchoirs solaires [4].

L'utilisation d'un séchoir permet l'évaluation de son efficacité et d'avoir ainsi une base des données pour le comparer à d'autres séchoirs. Les résultats obtenus fournissent des informations appropriées pour le concepteur aussi bien que pour l'utilisateur. Le choix des séchoirs pour une application particulière est en grande partie une décision basée sur ce qui est disponible comme types de séchoirs actuellement appliqués [4].

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de séchage solaire d'un produit agro-alimentaire (la tomate), la procédure de séchage s'est déroulée dans deux prototypes de séchoirs solaires indirects, à convection naturelle et à convection forcée. Ces types de séchoir sont peut coûteux, simple à réaliser, et adaptés au séchage des produits agro-alimentaires.

En utilisant les deux prototypes de séchoirs solaires existant au niveau du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) de

l'université de Ouargla pour évaluer les efficacités énergétiques, comparées et rapportées à l'efficacité énergétique de séchage et au rendement énergétique du capteur solaire, et de caractériser ainsi les paramètres d'influence sur l'efficacité énergétique de système.

La présentation de ce mémoire est résumée selon le cheminement suivant :

Dans le chapitre un, nous avons étudié le phénomène de séchage en générale ainsi que les paramètres d'influence sur ce phénomène. Nous avons évoqué une étude théorique qui consiste à étudier succinctement les phénomènes de transfert.

Les différents types d'appareillage de séchoirs solaires et leurs constitutions, et une partie détaillée des paramètres généralement utilisés dans l'évaluation de différents types de séchoirs solaires des produits agroalimentaires, ont fait l'objet du deuxième chapitre.

Ensuite nous avons étudié les efficacités des systèmes pour sécher la tomate en mettant en évidence une évaluation énergétique, en tenant compte de tous les paramètres qui rentrent dans cette étude, la comparaison entre les deux séchoirs solaires sur le plan efficacité énergétique à été mise en évidence, ce qui constitue le travail présenté dans le troisième chapitre.

Une conclusion relative au travail effectué et un listing des références bibliographiques utilisées figurent en fin du mémoire.

## I. Généralités

### I.1. Définition

Le séchage du produit est une opération unitaire qui a pour but l'élimination du liquide volatile (plus souvent l'eau) qu'il contient [5]. Dans cette opération interviennent deux phénomènes : un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide). L'humidité est extraite par évaporation et diffusion [6].

### I.2. Caractérisation de l'air de séchage [6] [7]

#### I.2.1. Humidité absolue

On définit l'humidité absolue d'un gaz comme la masse d'eau en kg associée à un kg de gaz sec. On le notera  $X_a$ .

$$X_a = \frac{m_e}{m_{as}} \quad (1-1)$$

Où

$m_e$  est la masse de l'eau en kg.

$m_{as}$  est la masse de gaz sec en kg.

#### I.2.2. Humidité relative

On définit l'humidité relative  $H_r$  comme le quotient de la pression partielle de vapeur d'eau  $P_{H_2O}$  contenue dans le gaz par la pression de vapeur saturante de la vapeur  $P^{\circ}_{H_2O}$  (tension de vapeur) à la même température. L'humidité relative est souvent nommée **degré hygrométrique**.

$$H_r = \frac{P_{H_2O}}{P^{\circ}_{H_2O}} \quad (1-2)$$

### I.3. Caractérisation des solides humides [2] [7]

#### I.3.1. Humidité d'un solide

Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse totale  $m$  :

Une masse  $m_e$  d'eau

La masse restante  $m_s = m - m_e$  est la masse sèche

Comme pour l'air humide, on définit l'**humidité absolue** ou la teneur en eau en base sèche par :

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad (1-3)$$

On peut aussi définir l'**humidité relative** d'un produit ou la teneur en eau en base humide par :

$$X_h = \frac{m_e}{m} \quad (1-4)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (1-5) \quad \text{et} \quad X_h = \frac{X}{1 + X} \quad (1-6)$$

## II. Séchage des produits agroalimentaires

### II.1. Description du solide humide

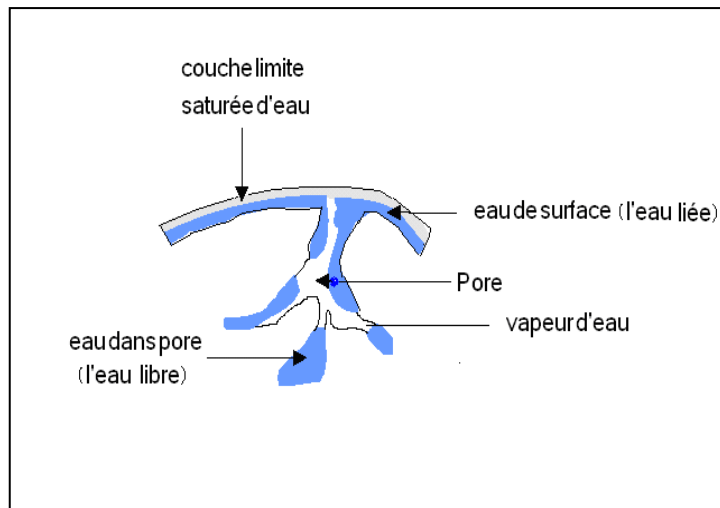
Avant le séchage, un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure 1-1. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant 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 titrable présente dans le matériau l'est sous trois états : eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur [8].

- L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire ; la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu ( $\epsilon$ ).

- L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants.

- La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.



**Figure 1-1 : Présentation de l'eau dans le matériau**

## II.2. Hygroscopicité

Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel, à l'équilibre, la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide s'il était seul dans une enceinte). C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface.

Un solide devient hygroscopique quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est du principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

## II.3. Isothermes de sorption

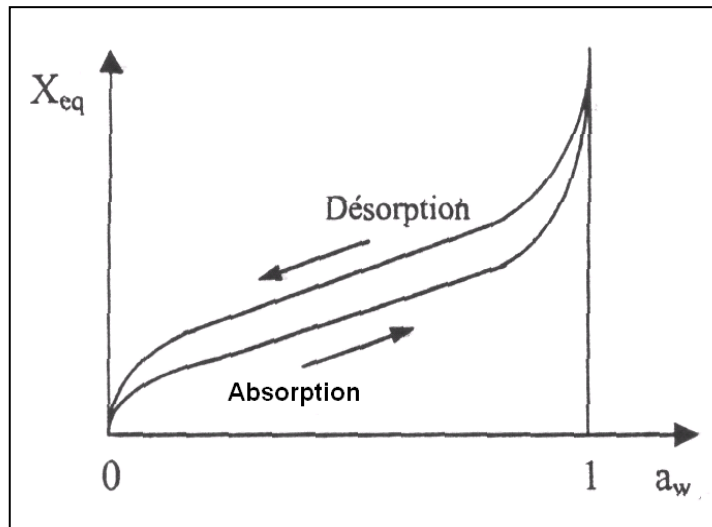
Lorsque la pression de vapeur d'eau à la surface du produit devient égale à celle existante dans l'air ambiant, le produit hygroscopique est en équilibre avec l'air qui l'entoure.

L'activité  $a_w$  de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau  $X$  et sa température  $T$ . La courbe représentant, pour une température  $T$  donnée, la teneur en eau  $X$  d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau  $a_w$  ou de l'humidité relative de l'air en équilibre  $H_r$ , est appelée : [9] [10]

- Isotherme d'absorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.

- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Les deux courbes sont en générale différentes car le séchage d'un produit (passage de  $a_w=1$  à  $a_w < 0,6$ ) entraîne des structures et des porosités irréversibles : figure 1-2.



**Figure 1-2 : Courbes d'adsorption-désorption du produit à sécher**

La connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau  $X$  du produit en fin de séchage.

#### II.4. Mode de séchage

Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, il existe dans la pratique 5 types de séchage [6] :

##### II.4.1. Séchage par convection

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique : Si on place un corps humide dans une enceinte où règne un flux gazeux chaud et sec, des différences de température et de pression partielle d'eau seront constatées entre le corps et le gaz aboutissant ainsi aux phénomènes suivants :

- Un transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet de l'existence d'un gradient de température,
- Un transfert de matière (eau) s'effectuant du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Le séchage est dit isenthalpique si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par le flux de gaz chaud.



Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air, dont les propriétés thermophysiques lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée. L'enceinte où est placée le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelé séchoir.

#### **II.4.2. Séchage par conduction**

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition.

#### **II.4.3. Séchage par rayonnement**

Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

#### **II.4.4. Séchage par perte diélectrique**

Le séchage par pertes diélectriques 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, l'attraction des charges électriques change de direction, ce qui génère une déformation de la matière [12].

Avantage :

- un chauffage rapide.
- L'absence de surchauffe locale, la masse étant chauffée de la même manière sur toute son épaisseur.
- Vers la fin du séchage, la chaleur est absorbée surtout dans les domaines où l'humidité est retenue d'une façon plus intense.

#### **II.4.5. 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'activité de l'eau du produit [13].

#### **II.5. Processus de séchage**

Le séchage par convection permet de mettre en contact un gaz (généralement air chaud et de faible hygrométrie) en écoulement autour du corps à sécher. Ce courant gazeux assure à la fois l'apport de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et l'enlèvement de la vapeur produite. Entre l'entrée et la sortie du séchoir, le gaz se refroidit en même temps qu'il se

charge d'humidité. Dans le cas du solide, on observe une diminution progressive de sa teneur en eau et une augmentation de sa température au cours du séchage.

## II.6. Vitesse de séchage

C'est la masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau (kg d'eau / m<sup>2</sup> s). L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors :

$$r = - \frac{dm_e}{Sdt} \quad (1-7)$$

$m_e$  : Masse d'eau à évaporer qui s'écrit comme suit :

$$m_e = m_s (x_e - x_s) \quad (1-8)$$

$m_s$  : Masse de produit sec.

$x_i, x_s$  : 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 [14] :

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

## II.7. Cinétique de 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 (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps : figure 1-3.

Tous les travaux de séchage montrant les courbes de la vitesse de séchage en fonction de temps se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on remarque que le processus de séchage passe par 3 principales périodes :

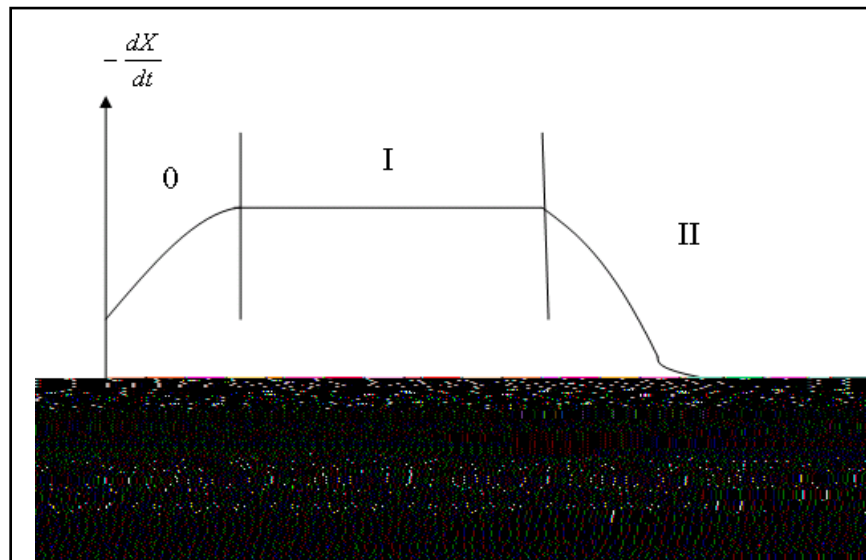


Figure 1-3 : Périodes du séchage

**Région 0** : Période de mise en température

**Région I** : Période à allure constante

**Région II** : Période de ralentissement

- **Période de mise en température (région 0)**

Quand un produit d'une température de surface  $T_s$  et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur, les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation ; l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage, ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur. Si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante [15].

- **Période à allure constante (région I)**

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface ; l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide. L'activité de l'eau ( $a_w$ ) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit [2] [16].

- **Période de ralentissement (région II)**

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [15] :

- **Disparition de l'eau libre à la surface du produit** : Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

- **L'épaisseur du produit** : Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.

- **La diffusivité de l'eau dans le produit** : Elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- **Le croutage** : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région I) et sont disposés à la surface. Ce phénomène, appelé croutage, est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

## **II.8. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage**

### **II.8.1. Influence de la température de l'air**

L'effet de la température de l'air sec sur la vitesse de séchage est très important. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est due également à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Donc, les conductivités de l'eau dans le produit sont importantes. [2] [7]

### **II.8.2. Influence de l'humidité de l'air**

La teneur en eau de l'air joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de quelques produits. Il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

### II.8.3. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage notamment au début de l'opération. Mais pour des produits dont la cinétique de séchage est vérifiée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

## III. Modes de transfert

Il y a deux modes de transfert, de chaleur et de masse (matière).

### III.1. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie les plus connus. On peut distinguer trois modes de transfert thermique [17] :

#### III.1.1. Transfert par conduction

##### III.1.1.1. Définition

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission. Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides ou entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais, sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux. Elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement figure 1-4.

#### III-1-1-2- Loi de Fourier

La loi de Fourier traduit la relation existant, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique et le gradient de température. Cette expression, dans la mesure où la position d'un point peut être caractérisée par une seule dimension (paroi plane, cylindrique ou sphérique par exemple), s'écrit : avec  $\Phi$  (W) flux de chaleur comme suivant [18] [19] :

$$\Phi = - \lambda_c . S \frac{dT}{dX} \quad (1-9)$$

Où

T : Température en (°C),

S : Surface d'échange en (m<sup>2</sup>),

X : Coordonnée du point considéré en (m),

$\lambda_c$ : Conductivité thermique en (W/m.°C).

Le calcul intégral permet de généraliser la loi de Fourier à des corps de forme quelconque. Cette loi traduit le fait que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. La

direction de l'écoulement de chaleur coïncide avec celle du gradient de température. Le signe(-) caractérise le fait que l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes, du chaud vers le froid.

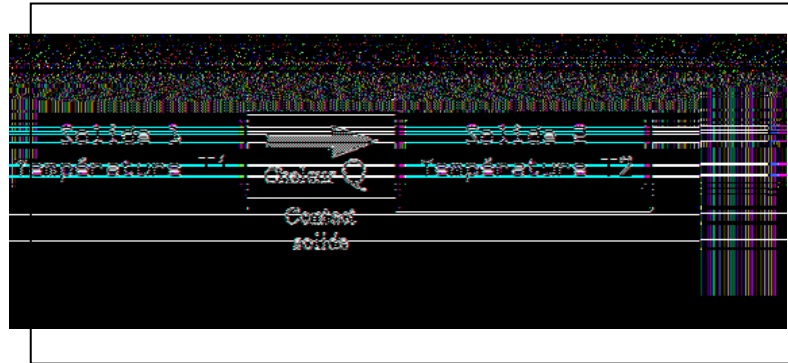


Figure 1-4 : Représentation schématique du transfert de chaleur par conduction

### III.1.2. Transfert de chaleur par convection

#### III.1.2.1. Définition

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement.

Imaginons un solide baignant dans un fluide en mouvement. Si le solide et le fluide ne sont pas à la même température, de la chaleur est échangée entre le solide et les particules fluides qui sont à son contact. Cet échange se fait par conduction. Mais la particule de fluide, dès qu'elle a échangé de la chaleur, se déplace et est remplacée, au contact du solide, par une autre particule. Par ailleurs, la particule fluide initiale rencontre, au cours de son déplacement, d'autres particules fluides avec lesquelles elle échange de la chaleur par conduction. Le mécanisme élémentaire de transfert de chaleur est la conduction thermique mais le phénomène global, qui est la convection thermique, résulte de la combinaison de cette conduction avec les mouvements du fluide qui obéissent à des lois spécifiques : Figure 1-5.

Deux types de convection sont généralement distingués :

- **La convection naturelle**, dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide : Figure 1-5-1 ;

- **La convection forcée**, dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide : Figure 1-5-2.

**III.1.2.2. Loi de Newton**

Le transfert par convection est régi par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température  $T_S$  du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température  $T_F$  du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté  $h_c$  [18].

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant (considérons  $T_S > T_F$ ) :

$$\phi = h_c \cdot S (T_S - T_F) \quad (1-10)$$

Avec :

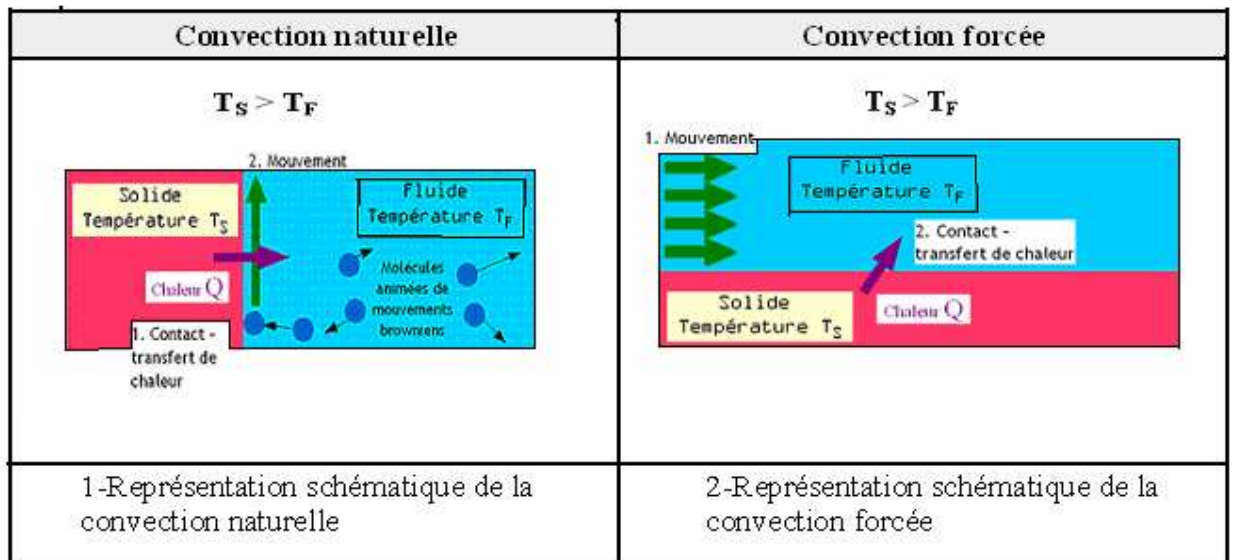
$\Phi$ : Puissance transmise en W.

$h_c$ : Coefficient de convection thermique en  $W/m^2.K$ .

$S$ : Surface d'échange considérée en  $m^2$ .

$T_F$ : Température du fluide en  $^{\circ}C$ .

$T_S$ : Température de solide (paroi) en  $^{\circ}C$ .



**Figure 1-5 : Représentation schématique du transfert de chaleur par convection**

### III.1.3. Transfert par rayonnement

#### III.1.3.1. Définition

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchiée, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques : figure 1-6 [19]

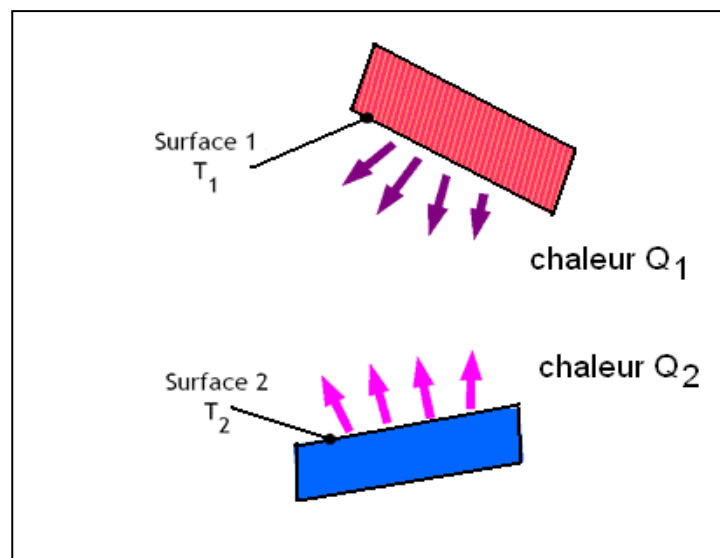


Figure 1-6 : Représentation schématique du transfert de chaleur par rayonnement

#### III.1.3.2. Le corps noir

##### III.1.3.2.1. Définition [2] [19]

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur et de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

##### III.1.3.2.2. Le corps noir et son rayonnement

Le corps noir, à une température et une longueur d'onde données, émet le maximum de flux par rayonnement : son facteur d'émission est égal à 1.



De façon générale, tous les corps chauffés, émettent de la lumière dans toutes les longueurs d'ondes, la figure 1-7 présente l'émittance monochromatique d'un corps noir M en fonction de  $\lambda$  pour différentes températures.

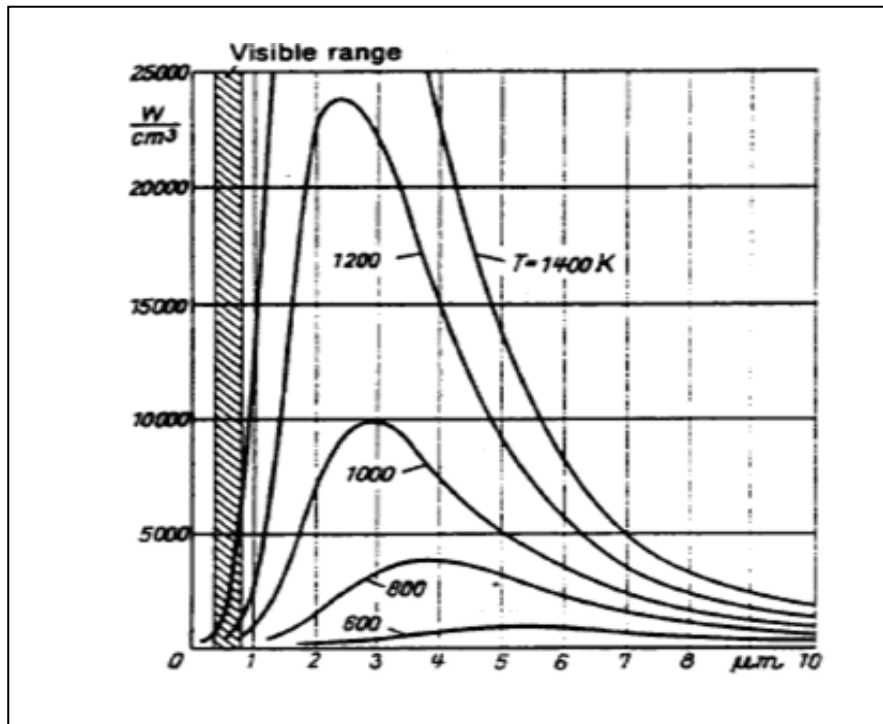


Figure 1-7 : Quelques isothermes de corps noir

### III.2. Transfert de masse [19]

Le transport d'un constituant d'une solution fluide d'une région de haute concentration à une région de concentration plus faible est appelé transfert de masse. On peut très facilement comprendre le mécanisme du transfert de masse en faisant une analogie avec la transmission de chaleur. La masse peut être transférée :

#### III.2.1. Transfert de masse par diffusion moléculaire

Le transfert de masse par diffusion moléculaire est directement analogue à la transmission de chaleur par conduction ou au transfert de quantité de mouvement dans l'écoulement laminaire. Il peut avoir lieu dans un fluide au repos ou dans un fluide en écoulement laminaire. L'équation de ce transfert est décrite par la loi de Fick.

##### III.2.1.2. Loi de Fick

Dans un mélange de fluide au repos, de température uniforme  $T$ , si la concentration des constituants n'est pas uniforme, il se produit un mouvement d'agitation moléculaire de ces constituants, tendant à atténuer les différences de concentration. Ce mouvement est décrit par la loi de Fick. Le flux massique d'un constituant du mélange, dans une direction  $\vec{n}$  donnée,

est proportionnel au gradient de concentration qui a provoqué le mouvement. La loi de Fick s'exprime par la relation :

$$\dot{m} = -D_c \frac{\partial C}{\partial n} ds \quad (1-11)$$

Où

$\dot{m}$  : Débit massique en kg/s

$ds$  : Surface élémentaire normal a la direction  $\vec{n}$  en  $m^2$

$C$  : Concentration du constituant considéré en  $kg/m^3$

$D_c$  : Coefficient de diffusion moléculaire en  $m^2/s$

### III.2.2. Transfert de masse par convection

Le mécanisme de transfert de masse dans un écoulement turbulent est analogue à celui de la transmission de chaleur par convection dans un écoulement turbulent ; par des courants tourbillonnants dans des fluides en écoulement turbulent, ce cas est analogue à la transmission de chaleur par convection.

$$\frac{N_A}{A} = k_G (P_{AG} - P_{Al}) \quad (1-12)$$

Où

$\frac{N_A}{A}$  : Densité de flux massique en  $kg.mol/s.m^2$

$P_{AG}$  : Pression partielle moyenne de la vapeur d'eau dans la région de la phase gazeuse (Pa)

$P_{Al}$  : Pression partielle de la vapeur d'eau à l'interface gaz-liquide. (Pa)

$k_G$  : Coefficient de transfert de masse en phase gazeuse, définit par :

$$k_G = \frac{D_c P}{RT (y_{fg} - y_i)} (kmol / s.m^2 atm) \quad (1-13)$$

Avec

$P$  : Pression totale (P)

$R$  : Constante des gaz parfait ( $m^3.atm/k mol ^\circ C$ )

$T$  : Température de mélange (K)

$(y_{fg} - y_i)$  : épaisseur de la couche limite (m).

### III.2.3. Transfert de masse par migration

Il y a un troisième mode de transfert de masse, qui est la migration. Dans ce mode, la molécule est attirée par une force intrinsèque et trouve en elle (dans son énergie potentielle) l'énergie nécessaire pour se déplacer.

**Exemple :** Migration électrique (due à une force dérivant d'un gradient de potentiel).

## I. Les séchoirs solaires

Le choix d'un type de séchoir est une opération très importante, il devrait être orienté en fonction des besoins propres à l'utilisateur : figure 2-1 [20].

Pour cette raison plusieurs types de séchoirs solaires ont été conçus et étudiés. Ainsi, suivant qu'il s'agit de fruits, de grains ou de bois... etc., les structures des séchoirs sont variables (disposition des produits, dimensions, température ...). Suivant leur origine énergétique on peut distinguer [21]:

- *Les systèmes passifs*: l'énergie solaire seule en assure le fonctionnement;
- *Les systèmes hybrides*: ils associent à l'énergie thermique solaire une énergie d'appoint fuel-gaz pour chauffage ou bien l'électricité pour la circulation de l'air;

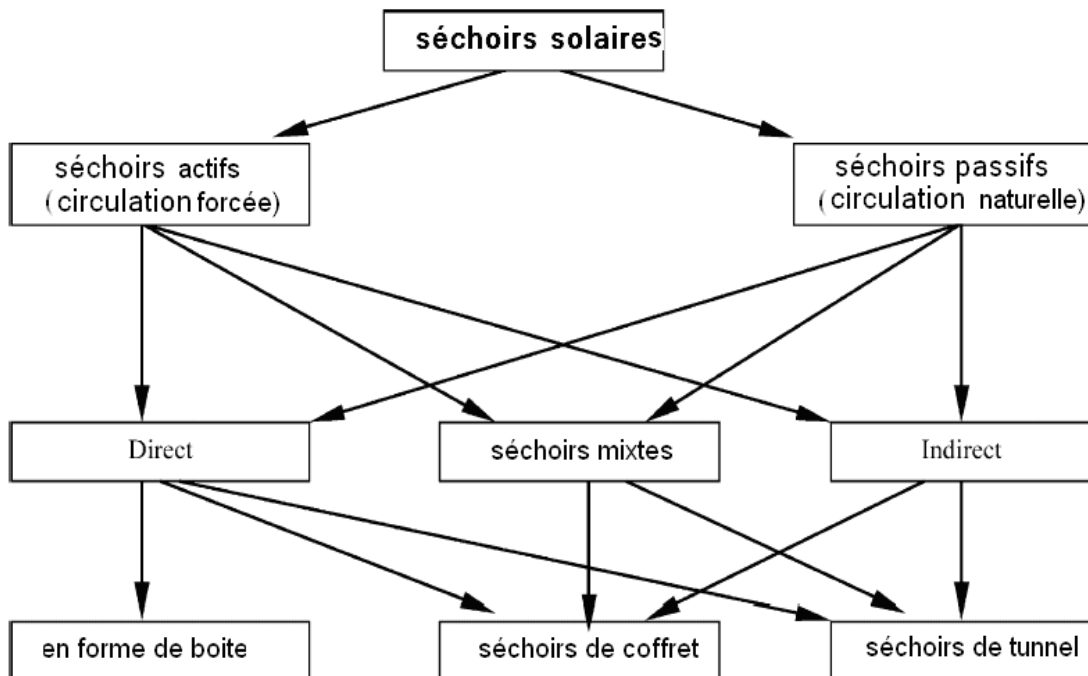


Figure 2-1: Classification des séchoirs solaires et des modes de séchage.

### I.1. Les types des séchoirs solaires

#### I.1.1. Les séchoirs solaires directs

Le séchage traditionnel des fruits et légumes se pratique à même le sol, le long des routes, sur des nattes, des rochers plats et sur les toits des habitations. Les aliments sont exposés aux intempéries, à la poussière et aux insectes. Ces systèmes s'améliorent par quelques astuces simples, faciles à mettre en œuvre et qui, dans de nombreux cas, suffisent à augmenter notablement la qualité des produits : figure 2-2A, B [15]

Les séchoirs solaires directs sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois qu'il rencontre. [20]

Les séchoirs solaires directs sont constitués d'un caisson de forme variable offrant au rayonnement solaire une couverture transparente (verre ou film plastique). Des claies sont disposées à l'intérieur du caisson entre lesquelles l'air circule le plus souvent par convection naturelle. Ces séchoirs, dont la figure 2-2C, D, montrent que quelques modèles sont faciles à construire et de faible coût, car on peut utiliser des matériaux locaux. Mais ils présentent, par suite de leur simplicité même, des inconvénients : faible capacité, rendement médiocre, séchage irrégulier et non uniforme à cause d'une convection naturelle non contrôlée, détérioration éventuelle du produit par le rayonnement solaire en raison de réactions photochimiques ou de surchauffes superficielles...etc.

On trouve seulement quelques séchoirs en convection forcée qui concernent le séchage de fruits disposés en couche unique sur des étagères horizontales situées à l'intérieur d'un séchoir-captateur assimilé à une boîte parallélépipédique ( figure 2-2E) dont la face supérieure est une vitre laissant passer le rayonnement solaire et la face inférieure est un plan noir isolé à l'arrière pour éviter les pertes thermiques. [22]

Il y a un autre type de séchoir solaire qui est le séchoir coquillage, il 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 permettent la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques : figure 2-2F. [2]

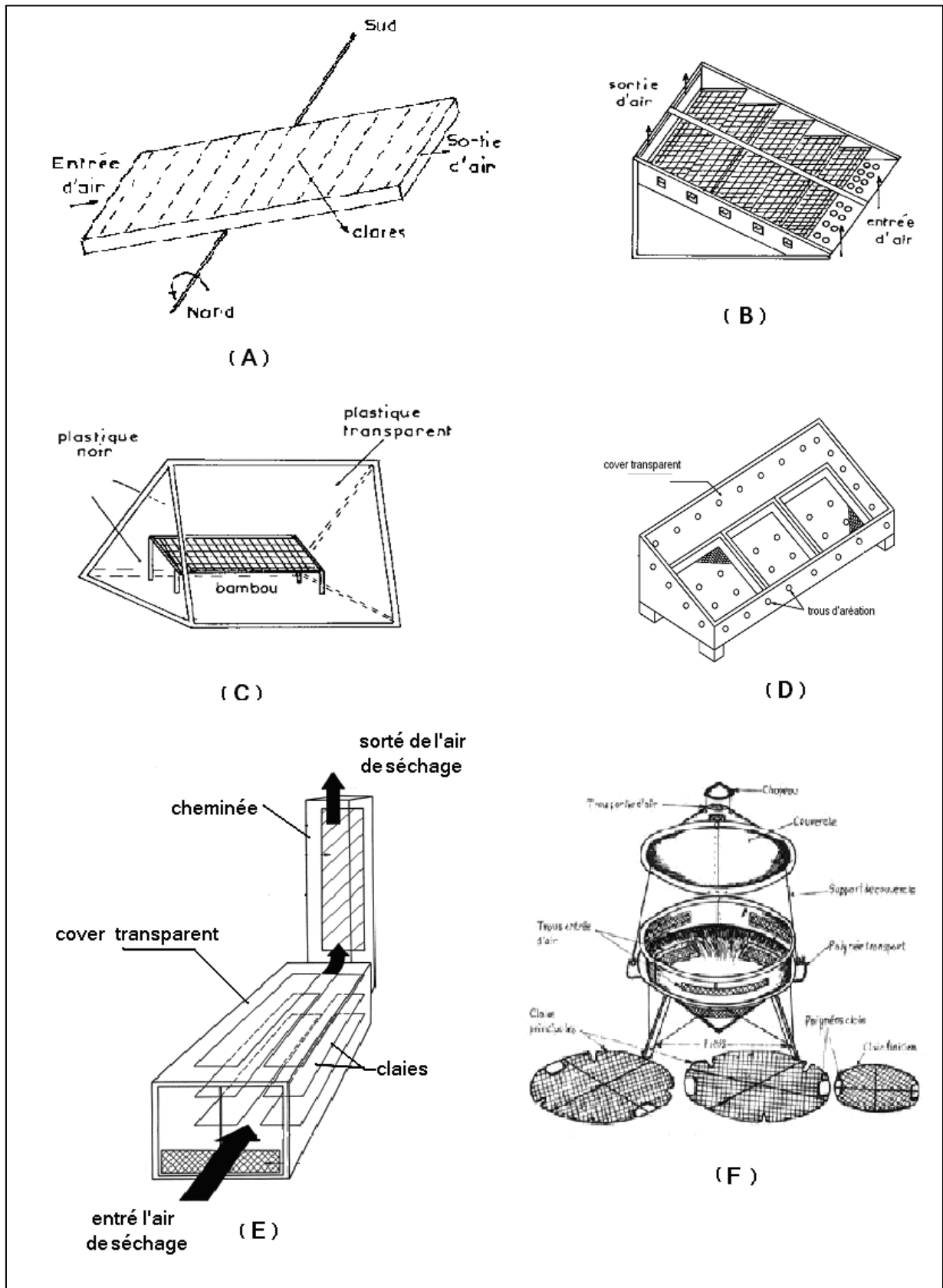


Figure 2-2: Les séchoirs solaires directs

### **I.1.2. Les séchoirs solaires indirects**

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive [23]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit. L'air chauffé dans le collecteur (capteur plan) est soufflé à travers des claies contenant des produits (légumes, fruits, poissons...) disposés en couche mince. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques et la ventilation du séchoir : figure 2-3.

#### **Avantages :**

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C) [2].

#### **Inconvénients**

- Coût important.
- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Conception et construction nécessitant une personne qualifiée.
- Formation nécessaire du personnel.

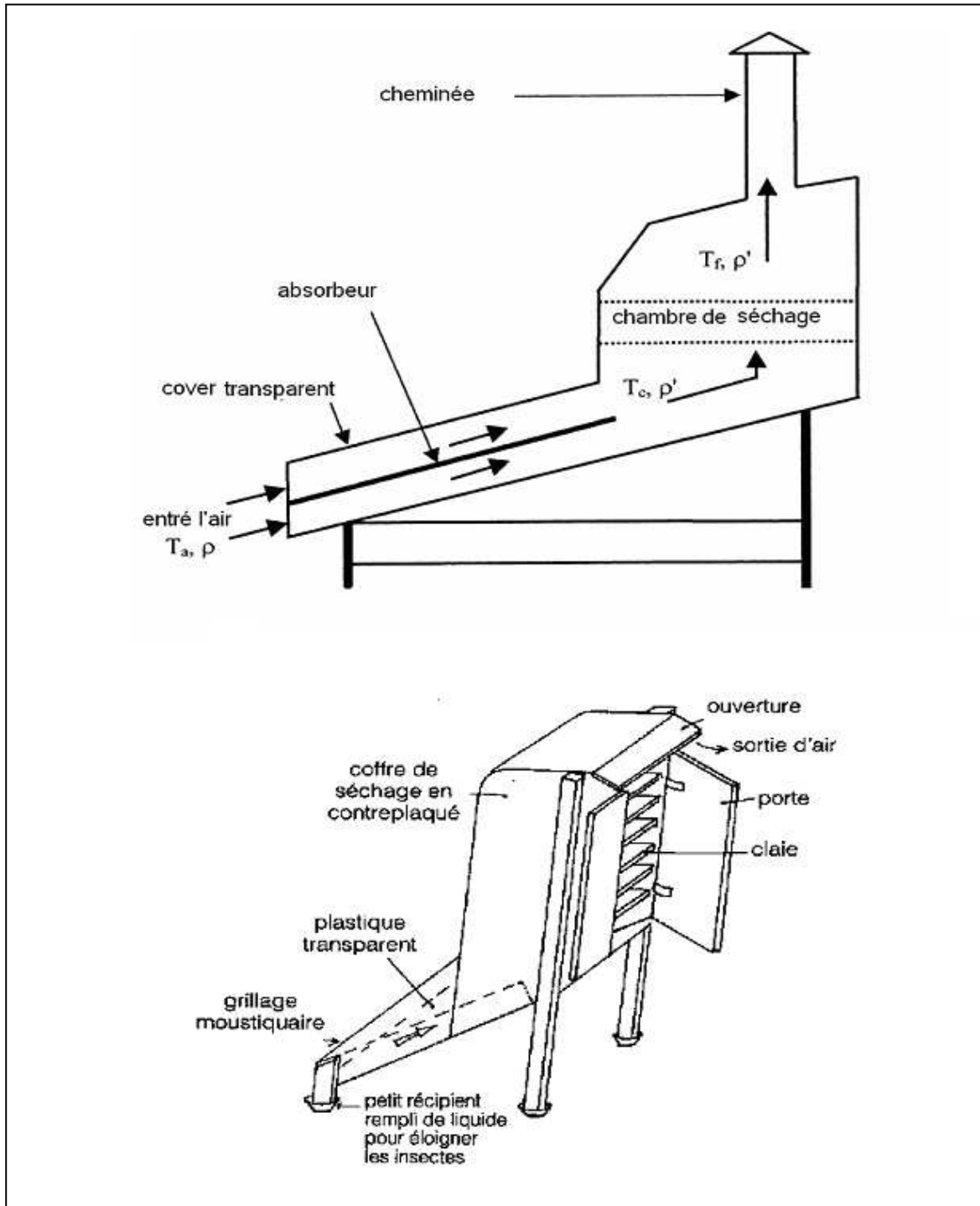


Figure 2-3: Les séchoirs solaires indirects

### I.1.3. Les séchoirs solaires hybrides

Malgré les améliorations techniques apportées, le processus de séchage n'est pas réellement contrôlable. Le producteur reste tributaire des conditions météorologiques. Les performances des séchoirs diminuent fortement en cas de pluie ou de temps nuageux.

Le temps de séchage dépasse fréquemment une journée. Comme la matériel ne fonctionne pas la nuit, les produits encore humides s'exposent aux attaques microbiennes. Pour pallier ces inconvénients les recherches se sont orientées vers des séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz, sous-produit végétaux... L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir : [2]

- Maintien d'une température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu de bois. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire. Elle permet simplement de préchauffer l'air : figure 2-4A.

- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques. Ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation : figure 2-4B.

#### **Avantages**

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

#### **Inconvénients**

- Coûts de production et d'investissement élevés.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz, pièces de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.



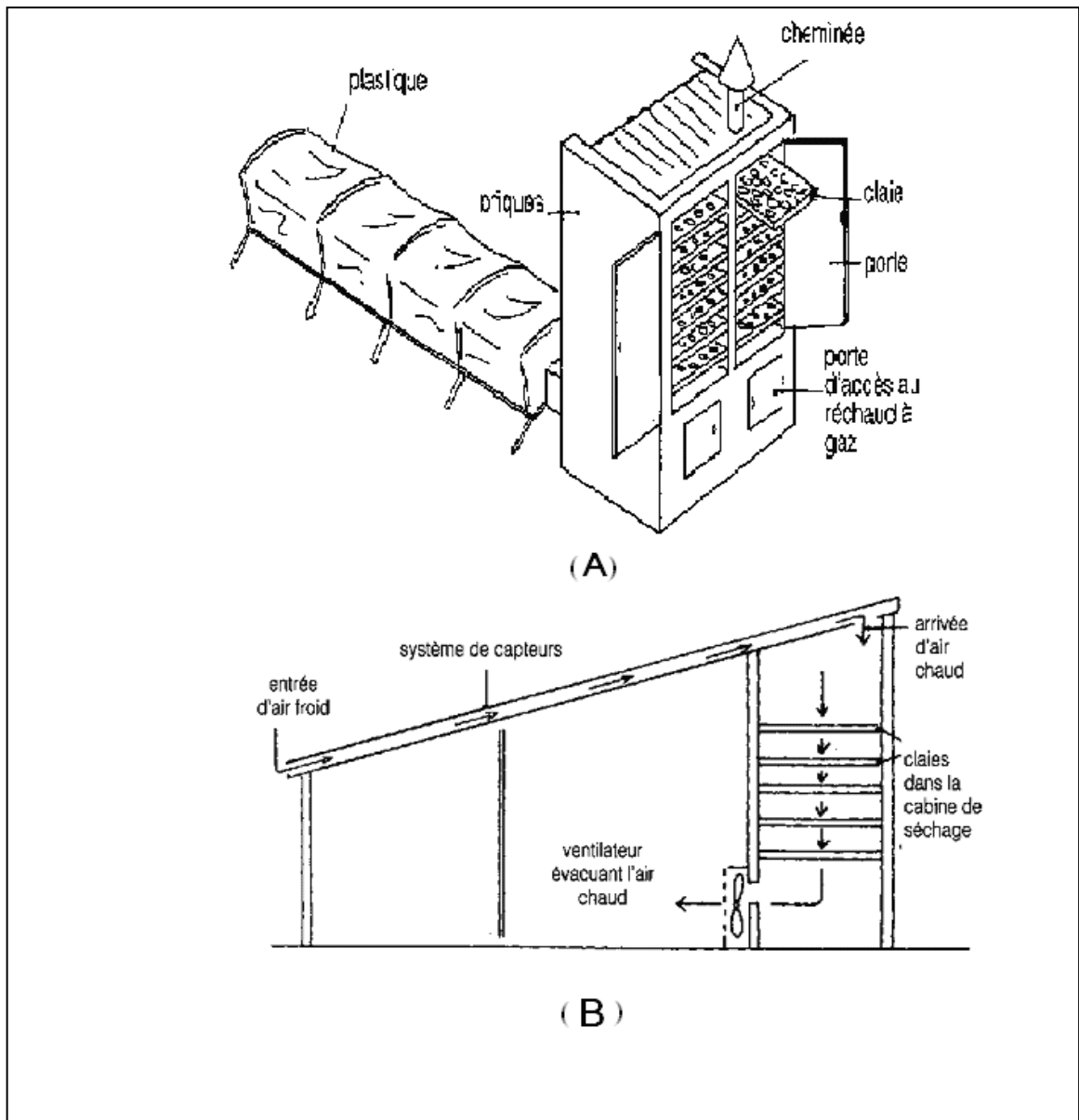


Figure 2-4: Les séchoirs solaires hybrides

#### I.1.4. Les séchoirs mixtes

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

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure 2-5A) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empète directement sur le produit comme le séchoir intégral [22].

Une autre conception (figure 2-5B) se compose d'un capteur à air recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant des claies superposées, les parois sont des contre-plaques, la surface supérieure recouverte de verre. La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie [24].

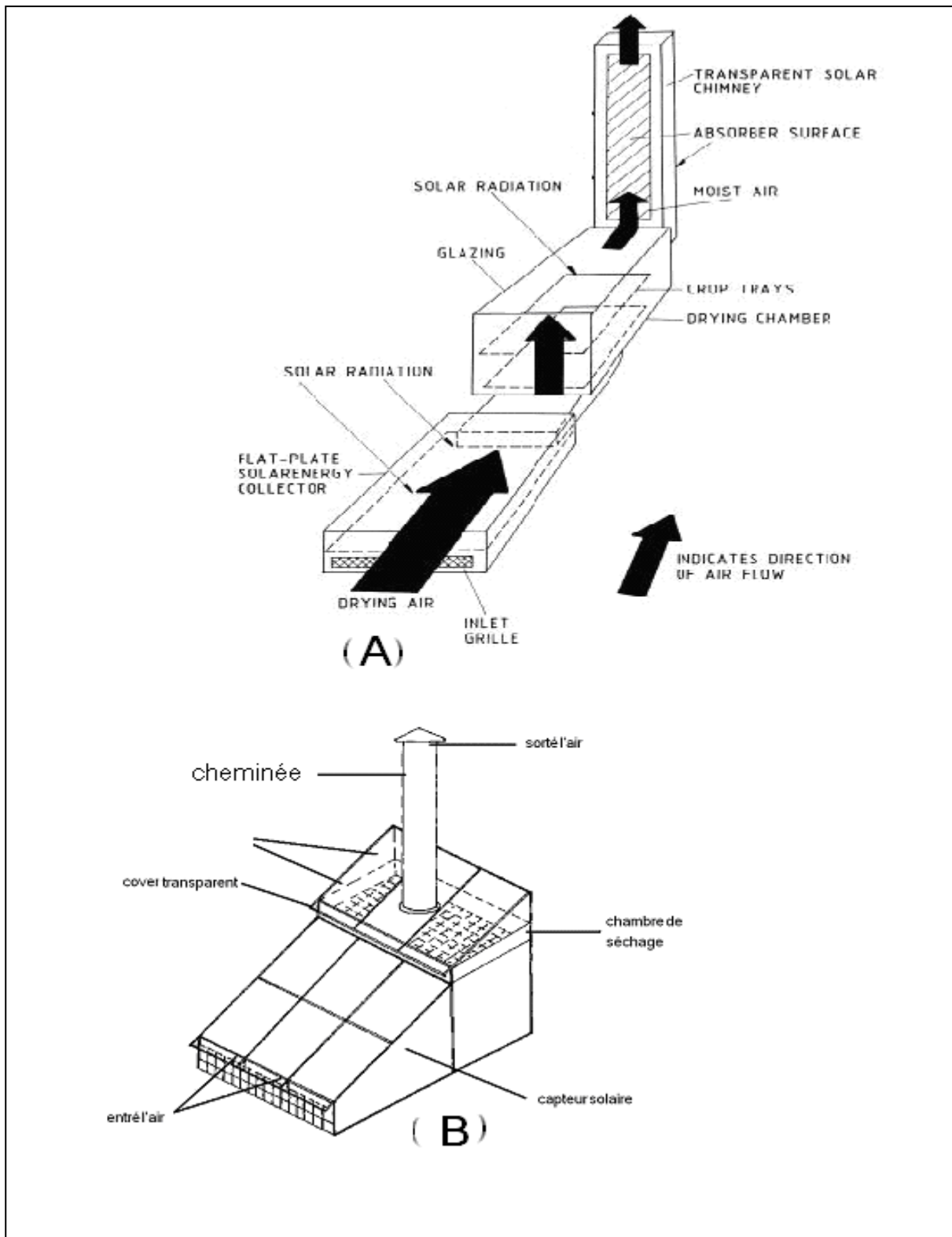


Figure 2-5: Les séchoirs solaires mixtes

## I.2. Les capteurs solaires plans

Les capteurs solaires plans sont des dispositifs transformant par des conversions photo-thermiques l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique, qui peut être ensuite utilisée comme n'importe quelle autre source usuelle de chaleur. [7]

### I.2.1. Captation par effet de serre

#### I.2.1.1. Effet de serre

C'est un effet provoqué par une paroi transparente (ou translucide) disposée sur une enceinte close, la paroi transparente permet une bonne pénétration du rayonnement solaire mais piège le rayonnement infrarouge : figure 2-6 [15].

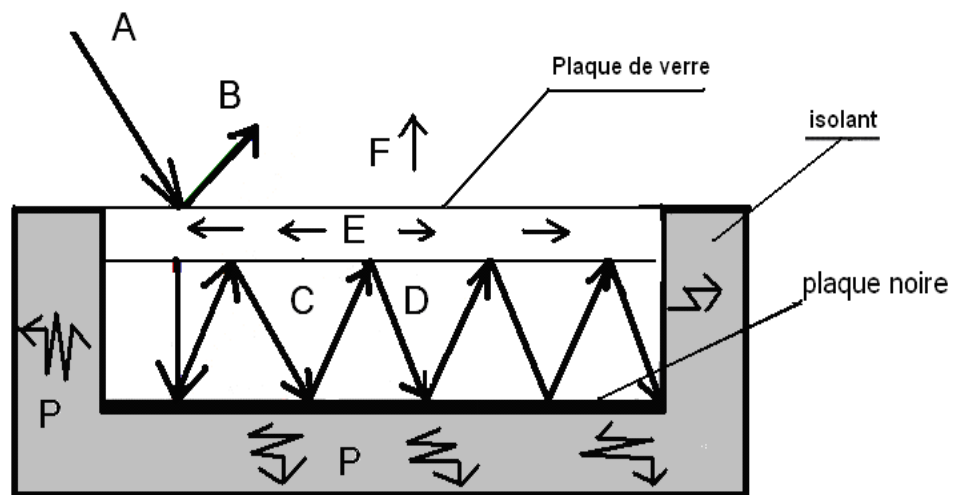


Figure 2-6 : Schéma montrant le principe de l'effet de serre

- A : rayonnement solaire incident
- B : rayonnement réfléchi par le vitrage (couverture transparente)
- C : rayonnement thermique émis par l'absorbeur
- D : rayonnement thermique réfléchi par le vitrage
- E : rayonnement thermique absorbé par le vitrage
- F : rayonnement thermique émis par le vitrage
- P: pertes latérale et inférieure par l'isolation et le cadre.

### **I.2.2. Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan**

Le capteur solaire plan fonctionne selon le principe de l'effet de serre car la majeure partie de l'énergie incidente est piégée dans le capteur cela s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge[25].

Le corps qui sert à capter le rayonnement, appelé absorbeur, est généralement noirci afin d'augmenter son facteur d'absorption. L'absorbeur chauffé cède sa chaleur à un fluide circulant en bon contact thermique avec lui : figure 2-7. Les éléments essentiels de ces capteurs sont [5]:

### **I.2.3. Les composantes d'un capteur solaire plan [7]**

#### **I.2.3.1. Couverture transparente**

La couverture doit laisser passer le maximum de flux solaire, donc être transparente à la lumière mais pas à la chaleur émise par l'absorbeur. La différence de température entre ses deux faces est très faible. Le double vitrage est plus efficace pour l'effet de serre. Des phénomènes peuvent surgir comme la rupture de la couverture due à la fragilité du verre et des chocs thermiques.

#### **I.2.3.2. L'absorbeur**

C'est la partie essentielle, son pouvoir absorbant doit être maximal c'est-à-dire aussi voisin que possible de celui du corps noir théorique.

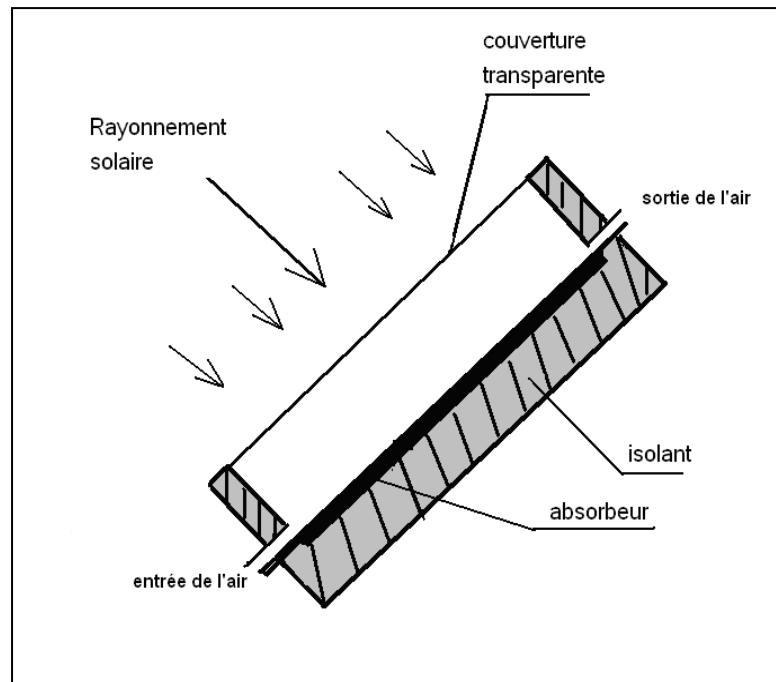
C'est une plaque métallique mince (cuivre, aluminium, galvanisé ...) recouverte d'une couche de peinture noire mat.

#### **I.2.3.3. Fluide caloporteur (l'air)**

Le rôle principal du fluide est de véhiculer la chaleur entre l'absorbeur et le domaine d'utilisation. L'air présente l'avantage d'être abondant et gratuit et de faible capacité calorifique.

#### **I.2.3.4. Les isolants**

L'insolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, non seulement au niveau des absorbeurs dont il faut limiter les pertes, mais aussi au niveau des constituants du séchoir.



**Figure 2-7: Capteur solaire plan**

## II. Comparaison des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont employés pour sécher divers produits alimentaires. L'utilisation d'un séchoir est nécessaire pour cette opération permettant ainsi d'évaluer son efficacité et avoir une base de données pour une éventuelle comparaison avec d'autres séchoirs. Les résultats obtenus fournissent des informations appropriées pour le concepteur aussi bien que pour l'utilisateur. Les critères de choix des séchoirs pour une application donnée dépendent directement de la conception et du dimensionnement de l'installation de séchage.

### II.1. Les paramètres généraux dans l'évaluation et la comparaison des séchoirs solaires

Le choix d'un séchoir solaire des produits agroalimentaires est déterminé par des conditions de qualité, des caractéristiques du produit et de la sûreté et de la convenance de l'installation. Ces paramètres généralement mesurés et rapportés pourraient être classés par catégorie comme suit : [4]

#### 1. Les paramètres physiques de séchoir

- Dimension (type, volume, et forme)
- Capacité de séchoir et densité de charge
- Surface et nombre de claies
- Charge et décharge de la chambre de séchage

## 2. Les paramètres énergétiques

- Le temps de séchage et la vitesse de séchage
- Température et l'humidité de l'air asséchant
- Le débit d'air
- L'efficacité énergétique

## 3. Les paramètres de qualité du produit à sécher

- Qualité sensorielle (couleur, goût, texture, arôme...)
- Propriétés chimiques (les sucres, les vitamines, les lipides...)
- La capacité de réhydratation (humidification)

### II.1.1. Les paramètres physiques de séchoir

#### II.1.1.1. Facteur dimensionnel

Ceux-ci se rapportent au type, au poids, aux dimensions et aux matériaux de fabrication du séchoir solaire, [4]. Des capteurs solaires sont habituellement fabriqués avec un absorbeur plat mat d'aluminium, fer galvanisé ou acier, la vitre transparente faite en verre, plastique ou avec un autre matériau, les claies sont fabriquées en acier inoxydable ou galvanisé. La matière d'isolation employée est choisie en fonction de la qualité, en fonction du prix et en fonction de la durée de vie.

Le dimensionnement physique d'un séchoir solaire est souvent une mesure directe de la capacité de séchage et se rapporte à la quantité du produit séché, mesurée en kilogramme de produit frais. Elle change avec le type de produit et la quantité d'humidité à extraire. La surface des claies se rapporte au chargement ou à la capacité du séchoir. Les produits doivent être étendus suivant une seule couche pour le séchage efficace. Les conditions d'air de séchage, de débit et de produit chargé déterminent le nombre de claies pour un séchoir particulier. La capacité du séchoir dépend également de la surface du capteur solaire et du dimensionnement de la chambre de séchage.

#### II.1.1.2. Temps de charge et décharge

Ce facteur est généralement négligé dans l'évaluation des séchoirs, mais le moment pour le chargement et le déchargement est une considération importante dans la conception appropriée des séchoirs commerciaux.

Le temps de chargement et de déchargement des séchoirs, en minutes par kilogramme de produit (frais/sec) est un paramètre additionnel pour l'évaluation comparative des séchoirs. [4]

## **II.1.2. Les paramètres énergétiques**

### **II.1.2.1. Temps de séchage et vitesse de séchage**

La durée du processus de séchage (temps de séchage) est le paramètre le plus important à considérer en évaluant un séchoir. On l'estime à partir du moment où le séchoir est chargé avec le produit frais jusqu'à ce que le produit soit séché, avec un temps habituellement donné en heures ou en jours.

La vitesse de séchage donne dans une représentation graphique du teneur d'humidité (teneur en eau à base sèche) en fonction de temps de séchage. Les données (les courbes de la teneur en eau) des différents types de séchoirs solaires sont tracées sur le même graphe pour permettre de donner une évaluation comparative du séchoir. [4]

Dans de grands séchoirs, il est important de vérifier l'uniformité de séchage en analysant les taux de séchage d'échantillons de produits maintenus à de divers endroits sur la claie. La forme de coupe du produit influe sur le temps de séchage (par exemple la tomate moitié et tranche).

Le traitement préparatoire chimique des produits fait augmenter la perméabilité de l'eau ou fait augmenter la vitesse de séchage et diminuer le temps de séchage [26].

### **II.1.2.2. La température et l'humidité relative de l'air de séchage**

L'augmentation de la température de l'air de séchage fait augmenter la vitesse de séchage de deux manières.

D'abord, ceci fait augmenter les capacités d'air de séchage puisque l'enthalpie  $H=f(T)$ . Deuxièmement, le chauffage de l'air permet de chauffer le produit, augmentant ainsi sa pression de vapeur. Ceci conduit une expansion plus rapide de l'humidité à l'extérieur [4].

Cependant, il y a une limite à considérer pour la température de l'air dans le séchoir. Le fonctionnement des séchoirs à températures élevées est généralement contraint par la sensibilité thermique de la plupart des fruits et légumes.

L'humidité relative de l'air de séchage influe également sur le processus de séchage. On peut faire augmenter la capacité de l'air de séchage par déshumidification ou chauffage de l'air (en diminuant son humidité relative) avant qu'elle rentre dans la chambre de séchage.

L'air à la sortie de la chambre de séchage porte toujours des possibilités intéressantes et considérables de séchage, si en mélangeant une fraction d'air chaud et humide à la sortie à l'air frais et en le recyclant dans le séchoir, ceci aide à utiliser une partie de l'énergie thermique à la sortie pour accentuer le séchage, ainsi l'efficacité thermique du système est améliorée.



### II.1.2.3. Débit d'air

C'est un autre paramètre important qui influence sur le processus de séchage. À mesure que le débit d'air augmente, les pertes par conduction et rayonnement peuvent être faibles si l'élévation de la température est faible. L'efficacité de séchage peut supporter un taux élevé de débit d'air puisque l'air ne peut pas avoir à temps proportionné de contact avec le produit pour augmenter son contenu d'humidité. On a rapporté que le taux optimum de débit d'air pour les séchoirs solaires est environ  $0,75 \text{ m}^3/\text{min}$  par mètre carré de surface des claies [4].

Le débit d'air insuffisant peut avoir comme conséquence l'extraction lente d'humidité aussi bien que les températures élevées de séchoir. Dans les systèmes à convection naturelle, le flux d'air est principalement déterminé par l'élévation de la température dans le capteur solaire [26].

### II.1.2.4. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique d'un séchoir solaire est définie comme l'énergie employée pour évaporer l'humidité dans le produit divisé par l'énergie employé en séchant le produit. [27]

#### II.1.2.4.1. Efficacité du capteur solaire

L'efficacité de capteur solaire ou le rendement du capteur est le rapport énergétique entre l'énergie utilisée ou récupérée par le capteur solaire pour sécher le produit et le rayonnement solaire global capté par la surface A du capteur solaire au temps t. [27, 28, 29]

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_a} \quad (2-1)$$

Où

$Q_a = IA$ : I est le rayonnement solaire global capté par la surface (A) du capteur en (kJ)

$Q_u$ : est l'énergie utilisée par le capteur solaire en (kJ)

$$Q_u = m_a C_p (T_s - T_e) \quad (2-2)$$

Avec

$m_a$ : Masse d'air à l'entrée du capteur solaire (kg)

$C_p$ : Chaleur spécifique de l'air (kJ/kg.K)

$T_s$ : Température de l'air à la sortie du capteur en °C

$T_e$ : Température de l'air à l'entrée du capteur solaire en °C

### II.1.2.4.2. Efficacité énergétique de séchage

C'est le rendement de l'opération, dans le cas où il n'y a aucune perte, c'est le rapport énergétique entre l'énergie de vaporisation de  $m_e$  d'eau à l'énergie qui lui a été fournie. Elle est définie comme suit : [30]

$$\eta_{ch} = \frac{m_e L_v}{Q_u} \quad (2-3)$$

Où :

$m_e$  : Masse d'eau évaporée du produit en kg

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à température moyenne  $T$  du produit au cours du séchage en (kJ/kg)

#### - Calcul de la masse d'eau $m_e$ évaporée

On peut déterminer la masse d'eau évaporée par la relation suivante : [30]

$$m_e = m \left( \frac{X_i - X_f}{100 - X_f} \right) \quad (2-4)$$

Ou :

$$m_e L_v = m_a C_p (T_i - T_f) \quad (2-5)$$

Où :

$m$  : Masse du produit en kg

$X_i$  : Humidité absolue initiale du produit

$X_f$  : Humidité absolue finale (équilibre) du produit

$m_a$  : Masse d'air entrée à la chambre de séchage (kg)

$T_i, T_f$  : Température de l'entrée et de sortie de la chambre de séchage en °C

#### - Calcul de la masse d'air $m_a$ et du volume d'air $V_a$ à l'entrée de la chambre

La détermination de la masse d'air dépend du changement de la teneur en eau de l'air entre l'entrée et la sortie de la chambre de séchage, elle est définie par la relation : [24, 31]

$$\Delta X_a = X_{ai} - X_{af} \quad (2-6) \quad \text{et} \quad \Delta X_a = \frac{m_e}{m_a} \quad (2-7)$$

$$\text{Donc :} \quad m_a = \frac{m_e}{\Delta X_a} \quad (2-8)$$

Si on prend l'air comme gaz parfait, on peut déterminer le volume d'air  $V_a$  par la loi des gaz parfaits:

$$PV_a = m_a RT_f \quad (2-9)$$

Où :

$P$  : Pression atmosphérique = 101,3 kPa

$V_a$  : Volume de l'air en  $m^3$

$m_a$ : Masse de l'air en kg

$T_f$  : Température de sortie en K

$R$  : Constante des gaz pour l'air =  $2,91 \cdot 10^2 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

#### II.1.2.4.3. Efficacité maximale de séchage (pick-up efficieny)

L'évaluation des performances du système de séchage est également représentée par l'efficacité énergétique maximale de séchage (pick-up efficieny). Elle est la plus utile pour évaluer l'évaporation réelle de l'humidité du produit qui est séché à l'intérieur de la chambre de séchage.

Elle définit la capacité d'air de chauffage pour extraire l'humidité du produit. Elle diminue généralement avec la diminution de l'humidité du produit. [24, 28]

$$\eta_p = \frac{X_{as} - X_{ae}}{X_{ae}^{sa} - X_{ae}} = \frac{m_e}{\rho v_a t (X_{ae}^{sa} - X_{ae})} = \frac{m_e}{m_a (X_{ae}^{sa} - X_{ae})} \quad (2-10)$$

Où :

$v_a$  : Débit volumique de l'air ( $m^3/s$ )

$X_{as}$  : Humidité absolue de l'air à la sortie de la chambre de séchage

$X_{ae}$  : Humidité absolue de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

$X_{ae}^{sa}$  : Humidité absolue de l'air saturé entrant dans le séchoir

#### II.1.2.4.4. Efficacité énergétique d'un séchoir solaire:

C'est le rapport énergétique entre l'énergie de vaporisation de  $m_e$  de l'eau et l'énergie solaire captée par A ( $m^2$ ) du surface. [4]

- Si le séchoir solaire est à convection naturelle, l'efficacité énergétique est :

$$\eta_s = \frac{m_e L_v}{A \cdot I} \quad (2-11)$$

- Si le séchoir solaire est à convection forcée, l'efficacité énergétique est définie par :

$$\eta_s = \frac{m_e L_v}{A \cdot I + P_f} \quad (2-12)$$

Où :

$P_f$  est l'énergie électrique de la source utile (Van, ventilateurs ...etc) en kJ

- L'efficacité énergétique du séchoir solaire hybride est définie comme l'énergie employée pour évaporer  $m_e$  d'eau dans le produit, divisée par l'énergie absorbée par le séchoir solaire. [32, 33]

$$\eta_s = \frac{m_e L_v}{A \cdot I + P_s} \quad (2-13)$$

$P_s$  : énergie stockée par le séchoir (kJ)

-Si on utilise une source électrique (ventilateur par exemple), l'efficacité énergétique du séchoir solaire devient alors : [20]

$$\eta_s = \frac{m_e L_v}{A \cdot I + P_f + P_s} \quad (2-14)$$

$P_f$  : énergie d'appoint (kJ)

#### II.1.2.4.5. Efficacité énergétique de séchage des produits agroalimentaires

Du premier jour, l'efficacité de séchage change directement avec la teneur en eau du produit (ou la masse d'eau évaporée). Pour la même absorption d'énergie, l'efficacité de séchage diminue quand la cinétique de séchage est décalée de la période à allure constante à la période de ralentissement. Le calcul d'efficacité pendant la période de séchage à allure constante du produit a pu offrir une évaluation logique de la réalisation de l'efficacité du séchoir. Cependant, en raison de l'absence d'une période à allure constante de séchage dans beaucoup d'opérations de séchage de fruits et légumes et en raison de la difficulté rencontrée

en observant le changement de séchage durant la période à allure constante au séchage durant la période de ralentissement, on peut définir l'efficacité énergétique durant le premier jour du séchage [4].

### **II.1.3. Les paramètres de qualité des produits secs**

Le séchage solaire affecte habituellement les propriétés physiques du produit et donne des résultats dans les changements de la taille, de la forme, de la couleur et de la texture...etc, ces changements ne sont pas toujours indésirables. L'évaluation de la qualité du produit sec inclut habituellement l'évaluation des paramètres sensoriels et alimentaires et la capacité de réhydratation. [33, 34]

#### **II.1.3.1. La qualité sensorielle**

C'est une combinaison de différents sens de conception obtenu dans le choix et la consommation du produit. L'aspect jugé par l'œil, par exemple couleur, taille, forme, uniformité et absence des déformations, elle est importante dans l'évaluation de la qualité du produit. Le sens du goût est limité à doux, à aigre, à salé et à amer. La saveur implique les sens du goût, de l'arôme et de la sensation.

Bien que la perte de saveur en produits secs soit souvent due aux pertes volatiles, des réactions chimiques (oxydation, perfectionnant etc...) soutiennent considérablement à la détérioration de la saveur. [4, 35]

#### **II.1.3.2. Les attributs alimentaires**

Ceux-ci incluent des paramètres chimiques tels que le contenu de sucre, l'acide ou la vitamine C ascorbique, le contenu de bêta-carotène, et le contenu d'acidité avant et après le séchage. Une teneur plus élevée en poussière indique la contamination par la poussière. La vitamine C inférieure indique la perte nutritive due aux températures de séchage plus élevées et à de plus longues périodes de séchage ; une acidité plus élevée indique la détérioration de qualité due à la fermentation. [33, 36]

#### **II.1.3.3. La capacité de réhydratation**

Quelques fruits et légumes secs sont consommés après réhydratation. Quand l'eau est ajoutée, le produit regagne sa saveur, arôme, texture et aspects originaux. Cependant, le produit ne reviendra jamais complètement à son niveau original de contenu d'humidité. Le point auquel il pourrait regagner son humidité perdue se nomme comme capacité de réhydratation. Plus il revient à ses niveaux originaux d'humidité étroit, le meilleur sera sa

texture et aspect. Des dommages de tissu dans le produit pendant le processus de séchage sont connus pour affecter la capacité de réhydratation du produit sec. Ils pourraient se produire pendant les traitements préparatoires, manipulation, ou le séchage suivant, dû aux changements de la structure et de la composition du tissu du produit [4]

Lewicki [37] a proposé une méthode pour calculer les capacités de réhydrations, qui sont basées sur la capacité de matériel sec d'absorber l'eau et de tenir des solubles à l'intérieur de la matrice de produit. Ceci tient compte de la capacité d'absorption d'eau WAC (Water Absorption Capacity) et de la matière sèche tenant la capacité DHC (Dry matter Holding Capacity), qui sont données par :

$$WAC = \frac{M_r(100 - s_r) - M_d(100 - s_d)}{M_0(100 - s_0) - M_d(100 - s_d)} \quad (2-15)$$

$$DHC = \frac{M_r \cdot s_r}{M_d \cdot s_d} \quad (2-16)$$

Où

$M_r$  : Masse du produit réhydraté (kg).

$M_d$  : Masse du produit sec (kg)

$M_0$  : Masse du produit après le séchage en (kg)

$S_r$  : Contenu de matière réhydratée (%)

$S_d$  : Contenu de matière sèche (%)

$S_0$  : Contenu de matière après le séchage (%)

La capacité de réhydratation (RC) du produit sec est le produit de WAC et de DHC, donnée par :

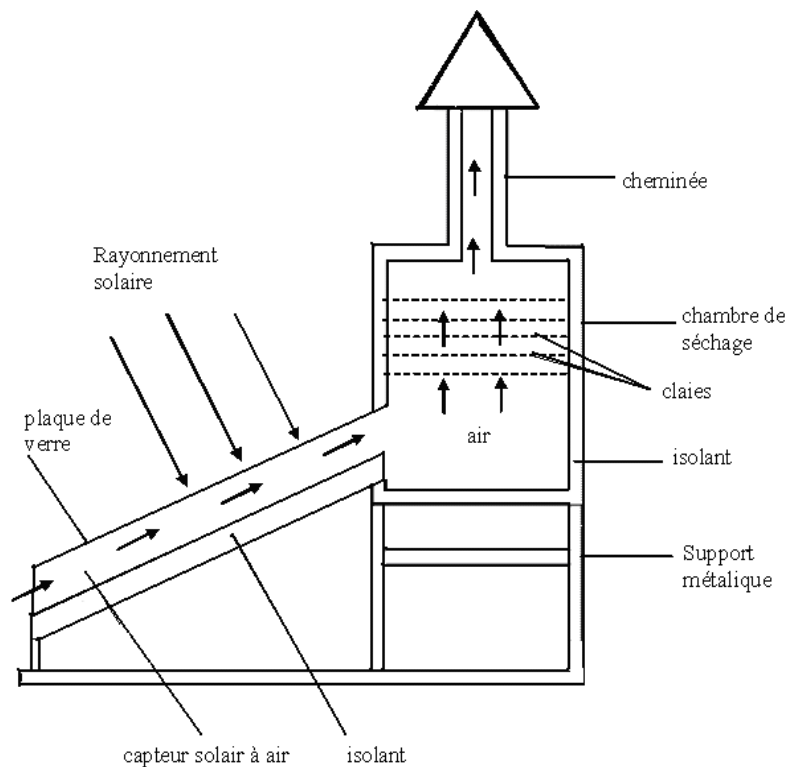
$$RC = WAC \cdot DHC \quad (2-17)$$

## I. Introduction

L'étude expérimentale de notre travail concerne l'utilisation de deux prototypes de séchoir solaire indirect (séchoirs solaires à convection naturelle et à convection forcée) pour sécher un produit agroalimentaire (la tomate) dans le but comparée de leurs efficacités énergétiques. Pour cet objectif il faudra évaluer les deux prototypes énergétiquement.

### I.1. Description du séchoir solaire naturel

Le premier séchoir solaire étudié figure 3-1 est un séchoir solaire indirect à convection naturelle, dont les éléments constitutifs sont :



**Figure 3-1: Schéma descriptif du séchoir solaire naturel**

#### I.1.1. Le capteur solaire

Le capteur solaire est un capteur à air plan de longueur de 2 m, et de largeur 1 m, et de hauteur 0,13m, le capteur est recouvert d'une plaque de verre d'épaisseur 0.004 m, au dessous de cette plaque et à une distance de 0,06 m est déposée une plaque d'aluminium peinte en noire mate qui sert d'absorbeur; les cotés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec le polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de  $31^\circ$  par rapport au plan horizontal et orienté plein sud.

### I.1.2. La chambre de séchage

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, de hauteur 1 m, de profondeur 0,8 m; les parois latérales et les parties inférieure et supérieure sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée cubique fabriquée avec des feuilles galvanisées de hauteur 1 m, les côtés de 0,020 m, et les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène.

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la boîte sur cinq (5) claies de forme rectangulaire composée chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air, les claies sont distantes les unes des autres de 10 cm.

### I.1.3. Fonctionnement du séchoir solaire naturel

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire par convection naturelle, il est chauffé avant d'arriver à l'entrée de la chambre de séchage, puis il continue son chemin à travers les claies superposées. Enfin, l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à travers la cheminée solaire.

## I.2. Description du séchoir solaire forcé

Le deuxième séchoir solaire étudié figure 3-2 est un séchoir solaire indirect à convection forcée, dont les éléments constitutifs sont :

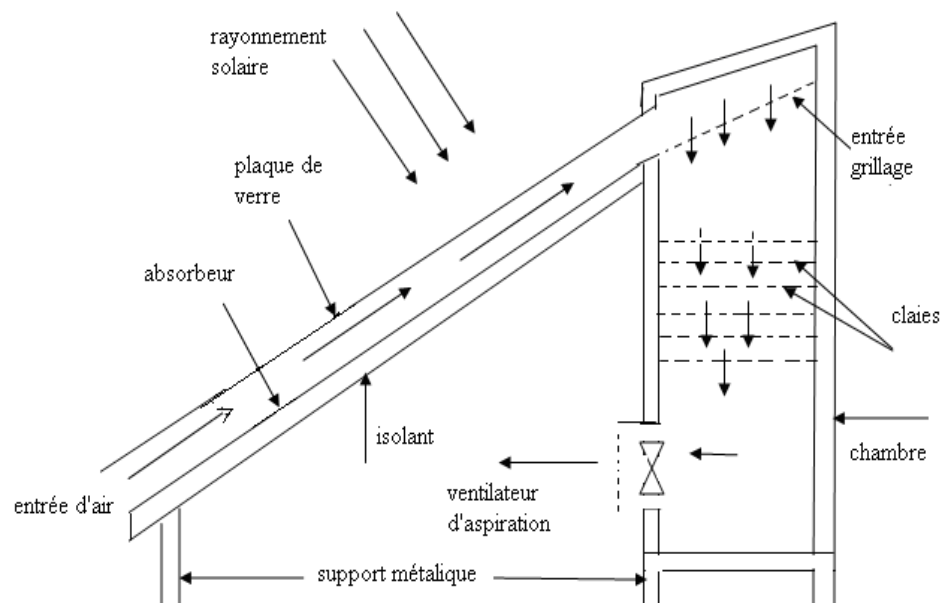


Figure 3-2: Schéma descriptif du séchoir solaire forcé



### **I.2.1. Le capteur solaire**

Le capteur solaire est un capteur à air plan de longueur de 2,5 m, de largeur 1 m, et de hauteur 1,75 m, le capteur est recouvert d'une plaque de verre d'épaisseur 0,004 m. En dessous de cette plaque et à une distance de 0,07 m est déposée une plaque galvanisée peinte en noire mate qui sert d'absorbeur, les côtés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec le polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de  $31^\circ$  par rapport au plan horizontal et orienté plein sud.

### **I.2.2. La chambre de séchage**

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme parallélépipédique, de hauteur 2,10m, de longueur 1m, de largeur 0,60m, les parois latérales, et les parties inférieure et supérieure sont isolées thermiquement par du polystyrène. En bas de la chambre de séchage, il y a un ventilateur d'aspiration de type N:KFA-30A avec une vitesse de rotation 1400t/min qui évacue l'air de séchage à l'extérieur, il possède une boîte de commande pour faire varier la vitesse d'aspiration. Les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène.

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la chambre sur six (6) claies de forme rectangulaire composée chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air, les claies sont distantes les unes des autres de 0,12m.

### **I.2.3. Fonctionnement du séchoir solaire forcé**

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire par convection forcée à l'aide de ventilateur d'aspiration, l'air est chauffé avant d'arriver à l'entrée de la chambre de séchage, puis il continue son chemin à travers les claies superposées. Enfin l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à travers le ventilateur.

## **I.3. Protocole et méthodologie expérimental**

La méthodologie d'expérience se compose par: une préparation des séchoirs et du produit, une installation des appareils de mesure et enregistreurs suivi par une expérimentation.

### **I.3.1.1. Préparation des séchoirs solaires**

La préparation du séchoir implique d'assurer le fonctionnement approprié du séchoir.

- La couverture transparente doit être complètement nettoyée,
- La plaque noire du capteur solaire devrait être vérifiée et peinte si besoin.

### **I.3.1.2. Préparation du produit**

Les étapes nécessaires pour la préparation du produit sont :

- Le lavage du produit pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides et autres contaminations.
- Découpage du produit en rondelles de 1 cm d'épaisseur.
- Dépôt des rondelles sur les claies.

### **I.3.2. Appareillages de mesures**

#### **I.3.2.1 Mesure du rayonnement solaire**

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $W/m^2$  à l'aide d'un solarimètre et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.

#### **I.3.2.2. Mesure des températures**

La mesure de température ambiante s'effectue à l'aide un appareil de marque KIMO de type LV 110 et à l'aide des thermocouples de type K dans plusieurs endroits des capteurs solaires et les chambres de séchage:

- Entrée et sortie des capteurs solaires.
- Entrée et sortie des chambres de séchage.

Les résultats sont affichés par un appareil Testo 445

#### **I.3.2.3 Mesure de l'humidité et de la vitesse de l'air**

L'humidité et la vitesse de l'air ambiante sont mesurées respectivement à l'aide d'un hygromètre et un appareil de marque KIMO de type LV 110. L'humidité et la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage de séchoir naturel sont mesurées respectivement à l'aide d'une sonde à affichage numérique et d'un manomètre connecté à un appareil de marque Testo 645 et dans le séchoir forcé, l'humidité et la vitesse sont mesurées respectivement à l'aide d'un hygromètre et d'un appareil Testo 425.

### I.3.3. L'étude expérimentale

Après la préparation de nos séchoirs solaires, le produit et les appareils de mesure, nous avons suivi les étapes suivantes:

Pour avoir l'influence de la masse initiale du produit, et le débit d'air sur l'efficacité énergétique au début de l'opération, nous avons effectué les expériences suivantes:

**1-** Evaluer le séchoir solaire naturel pour sécher trois différentes masses initiales du produit, et comparer leurs efficacités énergétiques. On procède comme suit:

- 1<sup>er</sup> expérience:** sécher une seule claie qui porte 3 kg du produit.
- 2<sup>ème</sup> expérience:** sécher deux claies, chaque claie porte 2kg du produit.
- 3<sup>ème</sup> expérience:** sécher deux claies, chaque claie porte 3kg du produit.

**2-** Evaluer le séchoir solaire forcé pour sécher une seule claie, qui porte 2kg du produit avec trois vitesses différentes, et comparer leurs efficacités énergétiques. On procède comme suit:

- 1<sup>er</sup> expérience:** fixer la vitesse du ventilateur d'aspiration à  $V_{\max}=2,5\text{m/s}$  correspondant à un débit volumique d'air de  $0,175\text{ m}^3/\text{s}$
- 2<sup>ème</sup> expérience:** fixer la vitesse du ventilateur d'aspiration à  $V=2\text{m/s}$  correspondant à un débit volumique d'air de  $0,14\text{ m}^3/\text{s}$ .
- 3<sup>ème</sup> expérience:** fixer la vitesse du ventilateur d'aspiration à  $V=0,6\text{m/s}$  correspondant à un débit volumique d'air de  $0,042\text{ m}^3/\text{s}$ .

**3-** Evaluer et comparer les deux prototypes des séchoirs solaires pour sécher deux claies, chaque claie porte 2kg du produit. On fixe le ventilateur d'aspiration à  $V=0,6\text{m/s}$  correspondant à un débit volumique d'air de  $0,042\text{ m}^3/\text{s}$ .

Nous avons enregistré les valeurs des températures, des humidités et des vitesses de l'air ambiant et de l'air asséchant de deux séchoirs solaires chaque 30 minutes et nous avons pesé le produit chaque heure.

## II. Résultats expérimentaux

Nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les expériences effectuées, dans chaque expérience et chaque séchoir solaire, nous avons montré les courbes suivantes:

1- Les courbes des variations des rayonnements solaires, des températures et des humidités de l'air ambiant et de l'air asséchant, et les débits de l'air asséchant en fonction du temps;

- 2 – Les courbes des variations des teneurs en eau en fonction du temps de séchage;
- 3- Les courbes des variations des rendements du capteur solaire en fonction du temps;
- 4- Les courbes des variations des efficacités énergétiques maximales de séchage en fonction du temps;
- 5 - Les courbes des variations des efficacités énergétiques des séchoirs solaires en fonction du temps.

On utilisant l'Origin 6.0 pour tracer les courbes effectuent.

## II.1. Séchoir naturel

### II.1.1. Premier expérience

#### II.1.1.1. Variation du rayonnement solaire

La figure 3-3 montre la variation du rayonnement solaire global en fonction du temps pour deux jours successifs. Cette variation prend une forme gaussienne et atteint un maximum de  $766\text{W/m}^2$  à  $13^{\text{h}}$ .

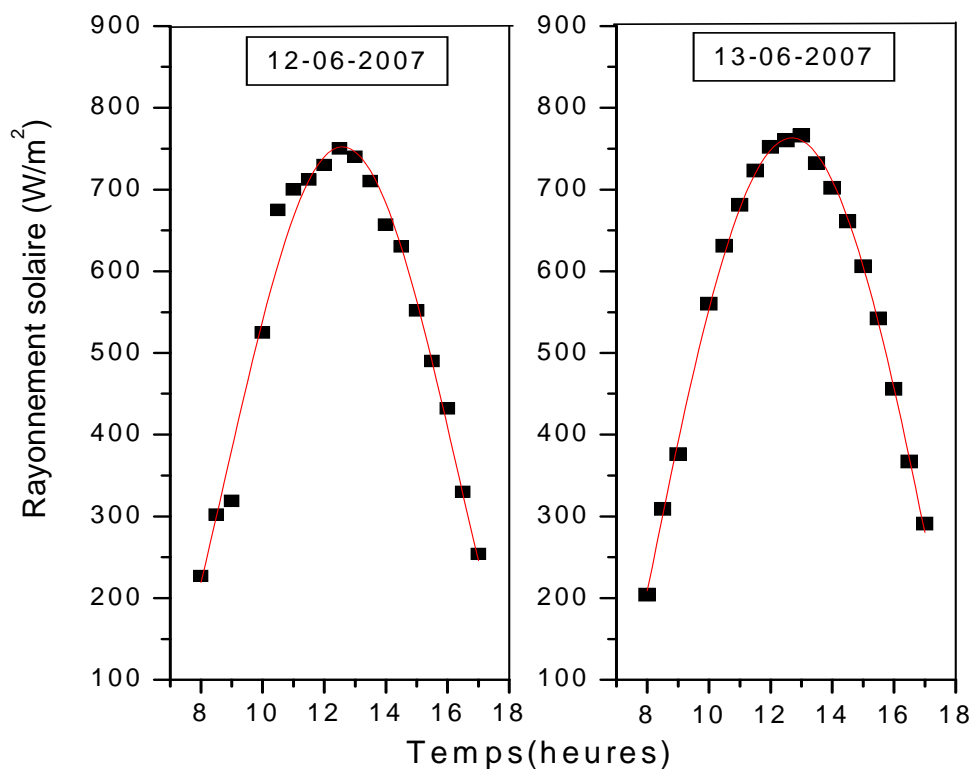
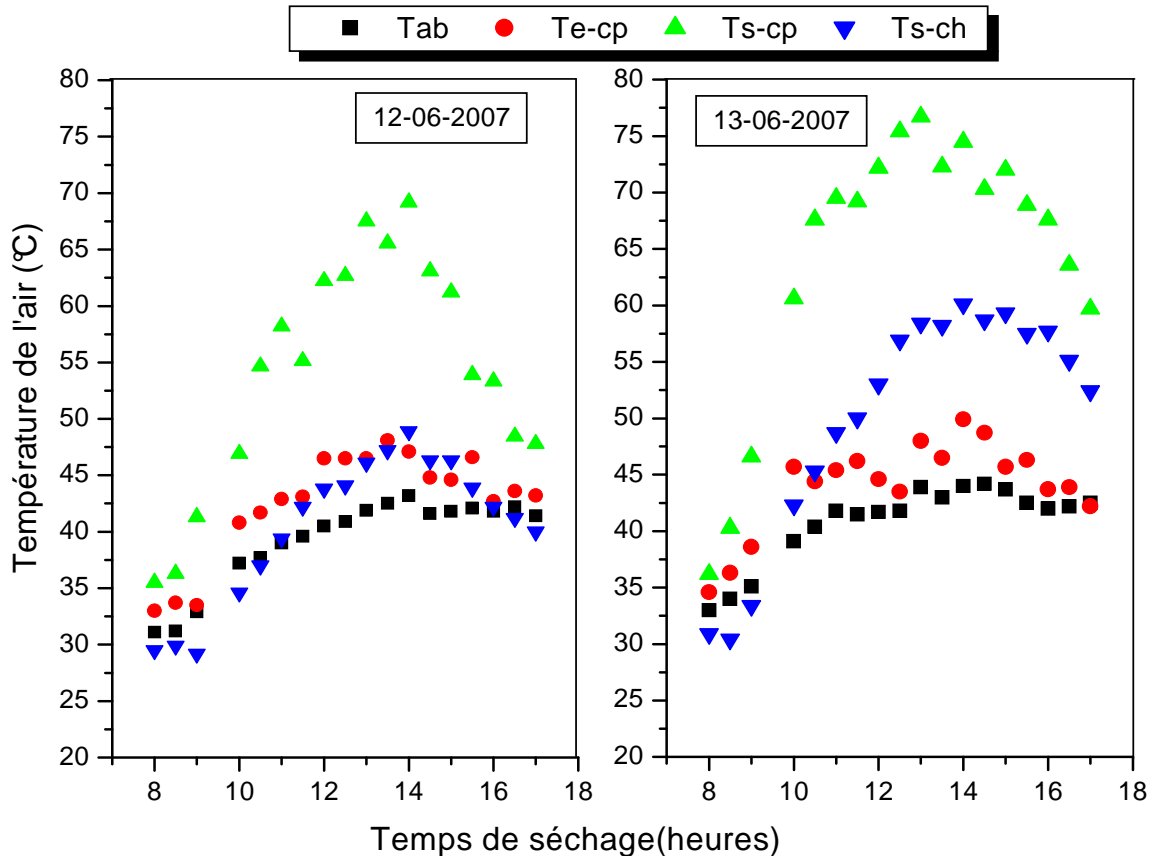


Figure 3-3: Variation du rayonnement global en fonction du temps

### II.1.1.2. Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage

La figure 3-4 montre l'évolution de la température de l'air ambiant  $T_{ab}$ , température à l'entrée du capteur  $T_{e-cp}$ , température de l'air asséchant  $T_{s-cp}$  et température de sortie de la chambre  $T_{s-ch}$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

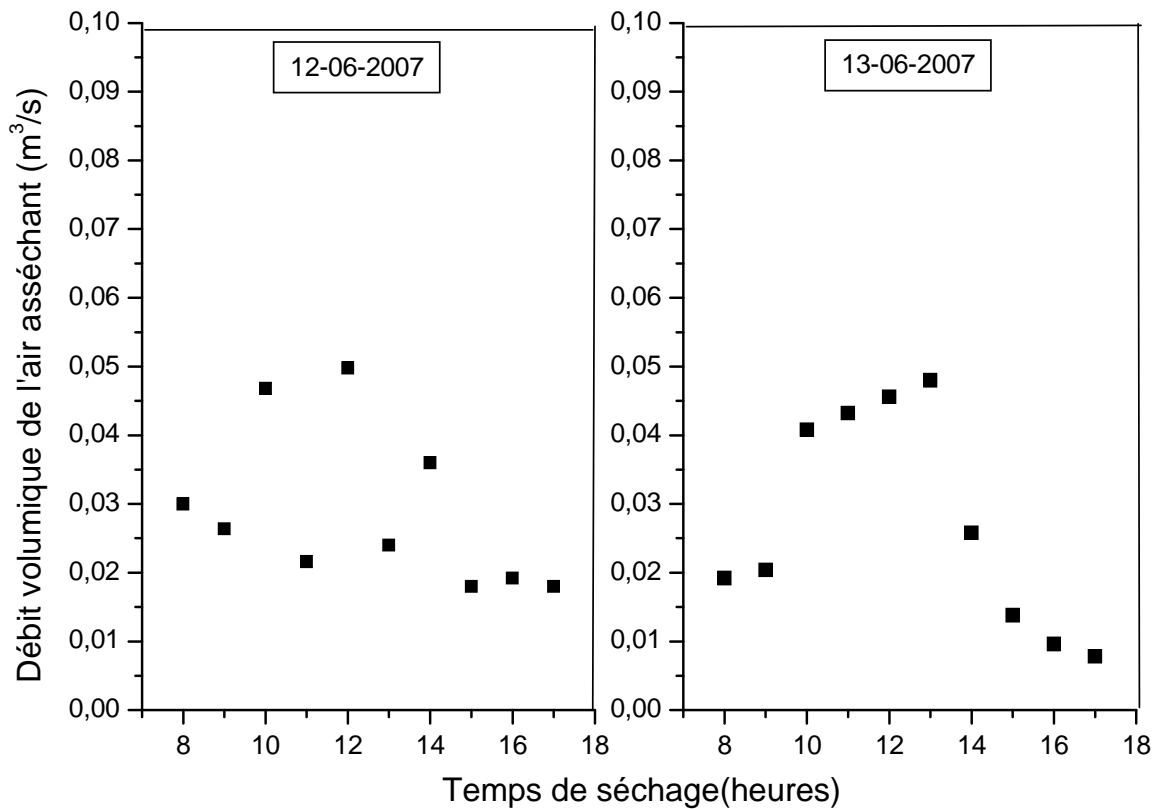


**Figure 3-4: Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=3kg**

$T_{ab}$ ,  $T_{e-cp}$ ,  $T_{s-cp}$  et  $T_{s-ch}$  présentent dans la figure 3-4 le même comportement que celui du rayonnement solaire, leurs valeurs maximales sont respectivement 44, 49,5, 74,5 et 60,1°C. On constate un écart important entre l'entrée et la sortie du capteur. Ceci est dû à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le capteur solaire. Cet écart atteint une valeur maximale de 25°C à 14<sup>h</sup>. Une diminution est observée pour la température de l'air à la sortie de la chambre puisque une quantité de chaleur est consommée par l'évaporation de l'eau à partir du produit. Les mêmes remarques sont observées durant le 2<sup>ème</sup> jour dans l'intervalle de temps compris entre 13<sup>h</sup> et 14<sup>h</sup>.

### II.1.1.3. Variation du débit volumique d'air asséchant

La figure 3-5 montre la variation du débit volumique d'air asséchant  $v_a$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

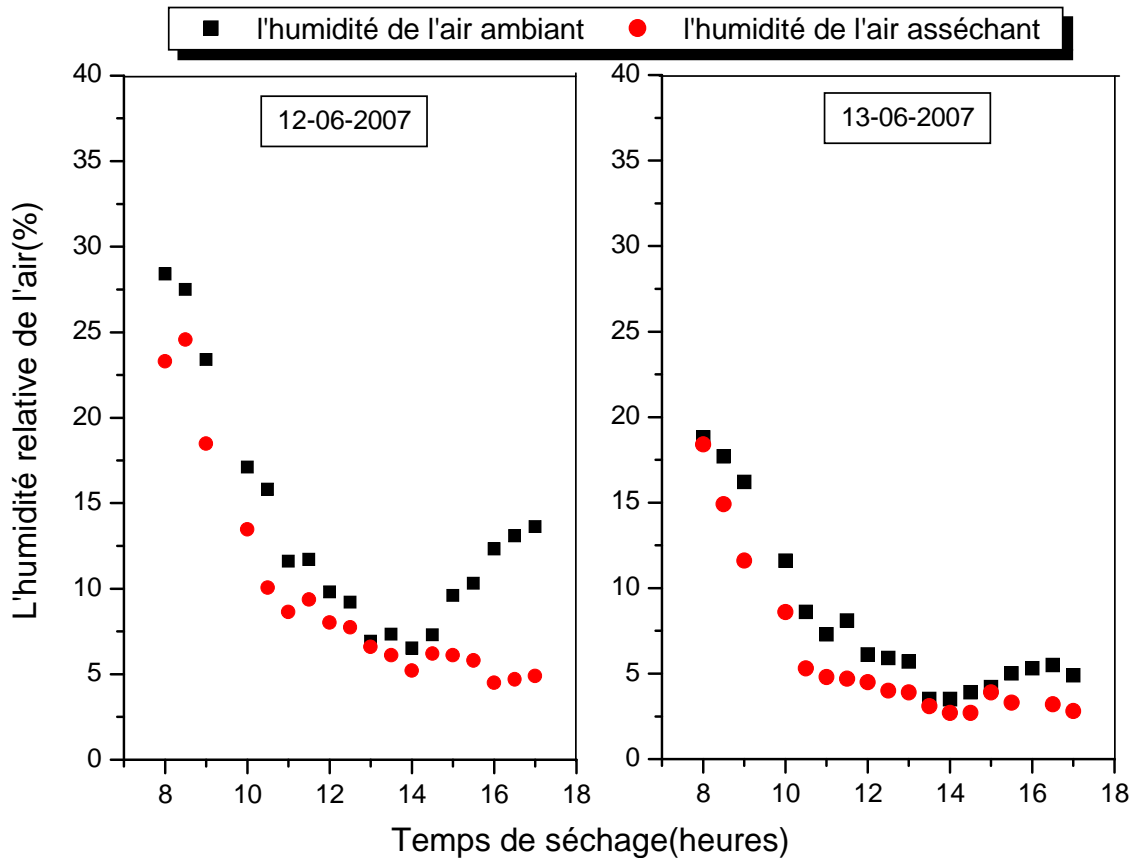


**Figure 3-5: Variation de débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage M=3kg**

La figure 3-5 présente la variation de débit d'air asséchant  $v_a$  en fonction du temps du séchage, on remarque que le débit d'air augmente avec le temps qui dépend de la température ambiante jusqu'à atteindre une valeur maximale  $0,049 \text{ m}^3/\text{s}$  à 13h où le rayonnement solaire et la température de l'air asséchant prennent des valeurs maximales.

#### II.1.1.4. Evolution de l'humidité relative de l'air ambiant et de l'air asséchant

La figure 3-6 montre l'évolution de l'humidité relative de l'air ambiant  $H_{rab}$  et de l'humidité relative de l'air asséchant  $H_{ras}$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

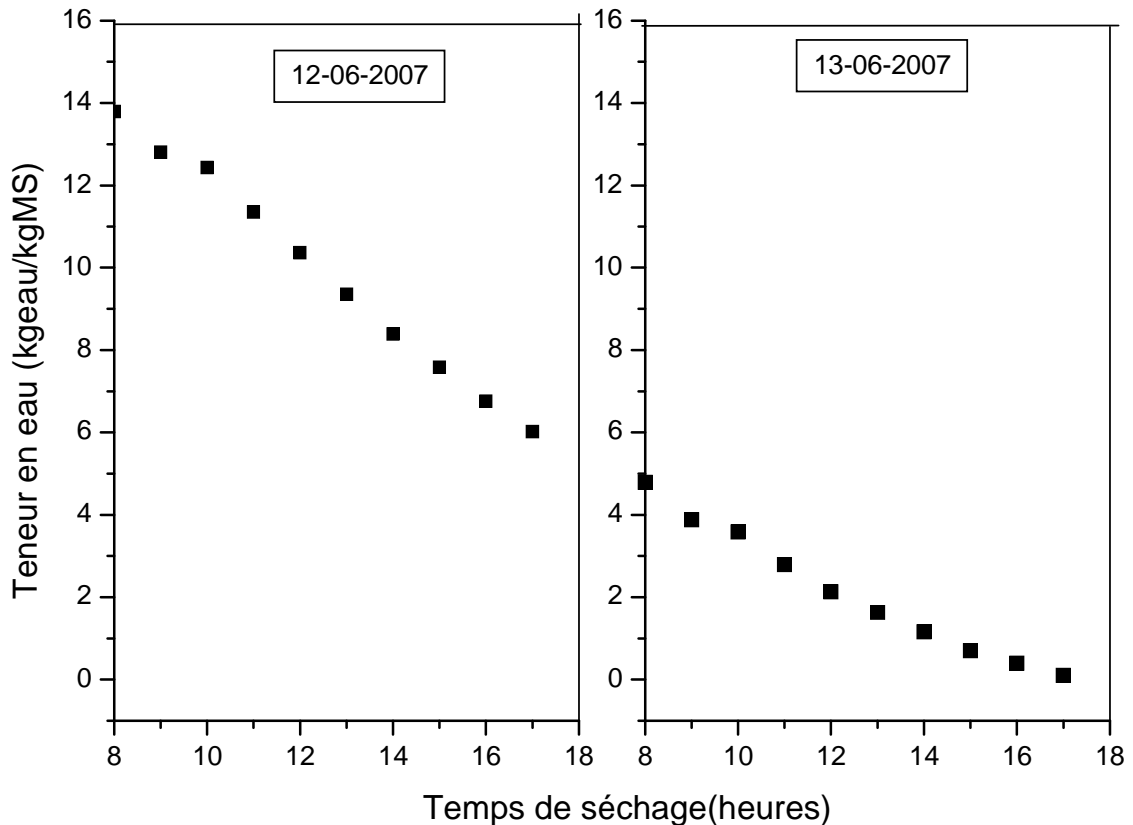


**Figure 3-6: Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage**  
**M=3kg**

La figure 3-6 présente la variation de l'humidité relative de l'air ambiant et de l'air asséchant avec le temps pour les deux jours; à partir de cette figure on constate que  $H_{rab}$ ,  $H_{ras}$  diminuent en fonction du temps jusqu'à une valeur minimale à 14<sup>h</sup> où le rayonnement solaire et la  $Ts_{cp}$  présentent des valeurs maximales à ce moment. Cette diminution à cause de l'augmentation de la température de l'air.

### II.1.1.5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage

La figure 3-7 montre la variation de la teneur en eau  $X$  en fonction du temps de séchage pour le séchage de la tomate.



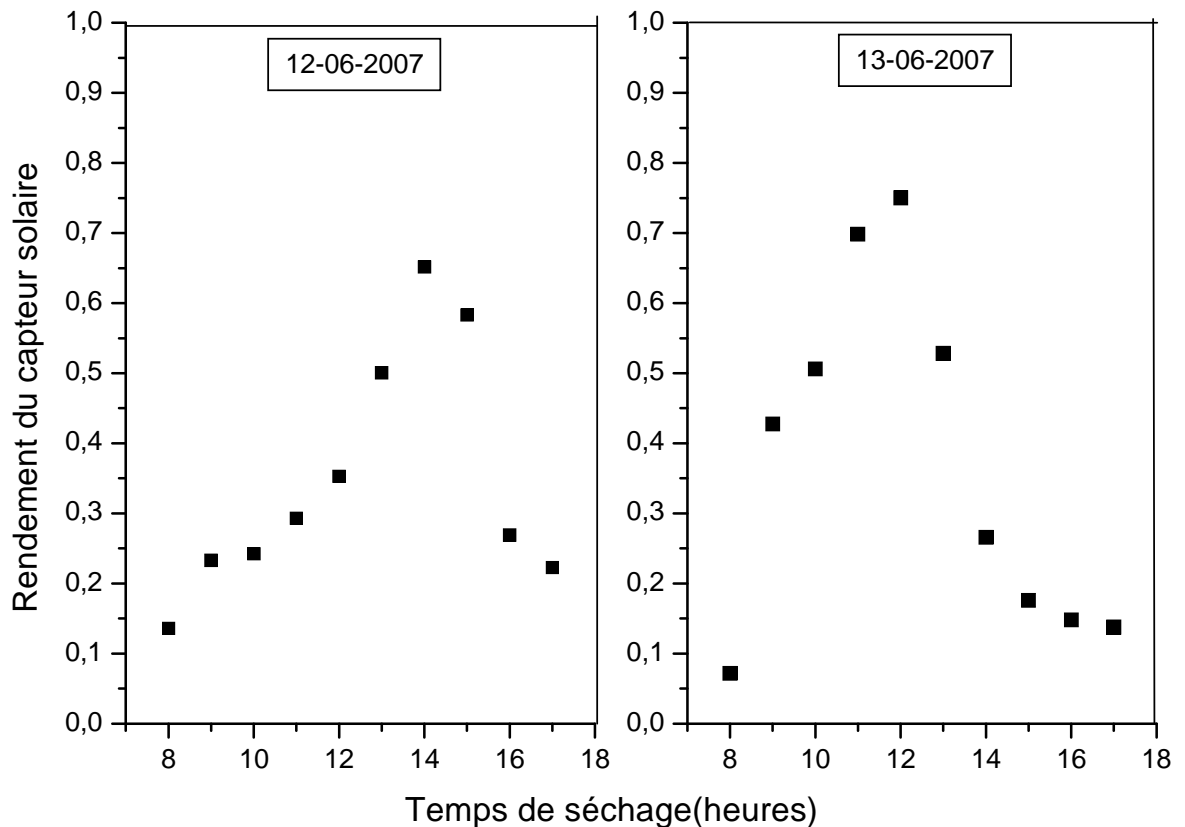
**Figure 3-7: Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage**  
**M=3kg**

La durée de séchage pour avoir une teneur finale  $X_f = 0,13$  est de deux jours (18h). Pour le premier jour, on remarque sur la figure 3-7 une diminution de 13,79 à 6,02 kg eau / kg MS, ce qui explique l'évaporation d'une quantité d'eau importante. Pour le deuxième jour la diminution de  $X$  est moins importante, elle varie de 4,79 à 0,13kg eau / kg MS et la courbe de la teneur en eau est uniforme et tend vers la teneur finale de séchage à 17h.



### II.1.1.6. Variation de rendement du capteur solaire

La figure 3-8 montre le rendement énergétique de capteur solaire naturel  $\eta_{CN}$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

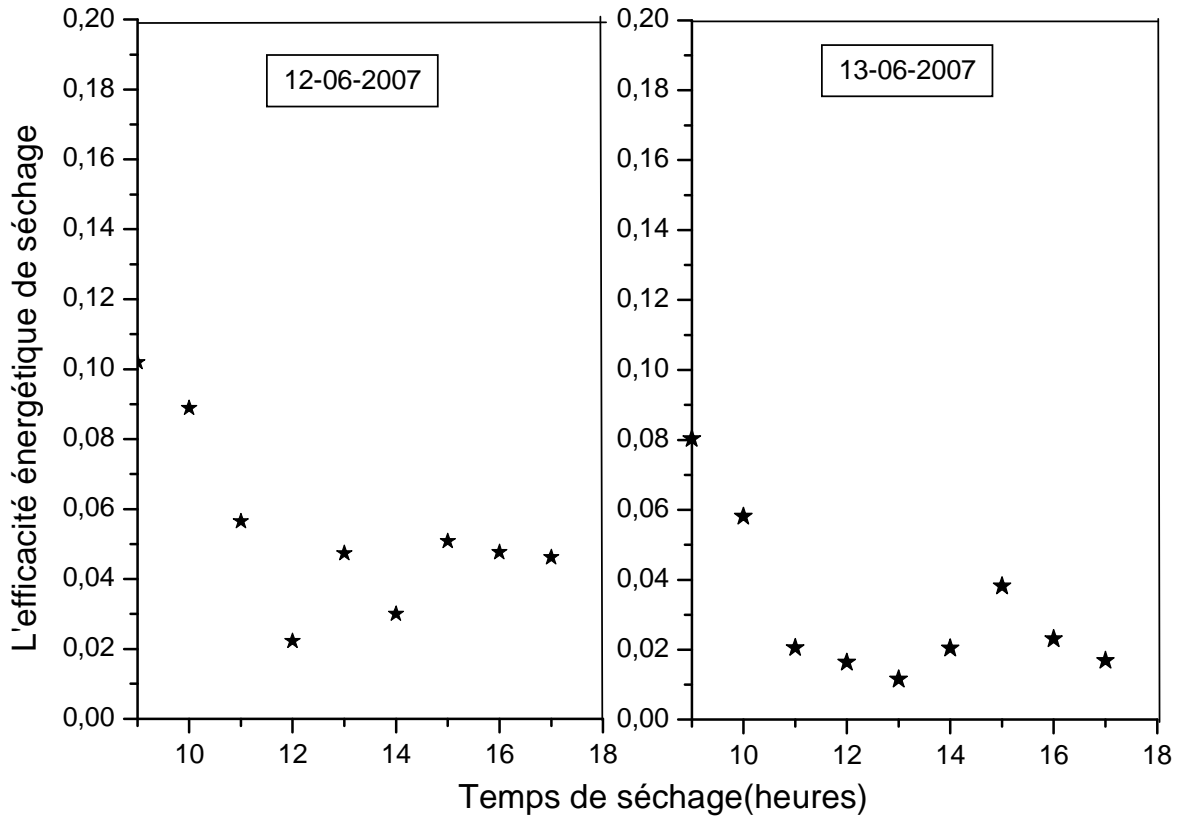


**Figure 3-8: Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps M=3kg**

La figure 3-8 présente l'évolution de rendement du capteur solaire qui augmente avec le temps, l'augmentation du rayonnement solaire et la  $T_{s-cp}$ , il est prend des valeurs maximales entre 65% et 74% dans l'intervalle du temps 12h à 13h pour les deux jours de séchage.

### II.1.1.7. Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage (pick-up efficiency)

La figure 3-9 montre la variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage naturel  $\eta_{pN}$  en fonction du temps de séchage pour les deux jours de séchage.



**Figure 3-9 : Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps de séchage M=3kg**

L'évaluation des performances ou l'efficacité énergétique de la chambre de séchage est également représentée par l'efficacité énergétique maximale de séchage (pick-up efficiency) [38] [39].

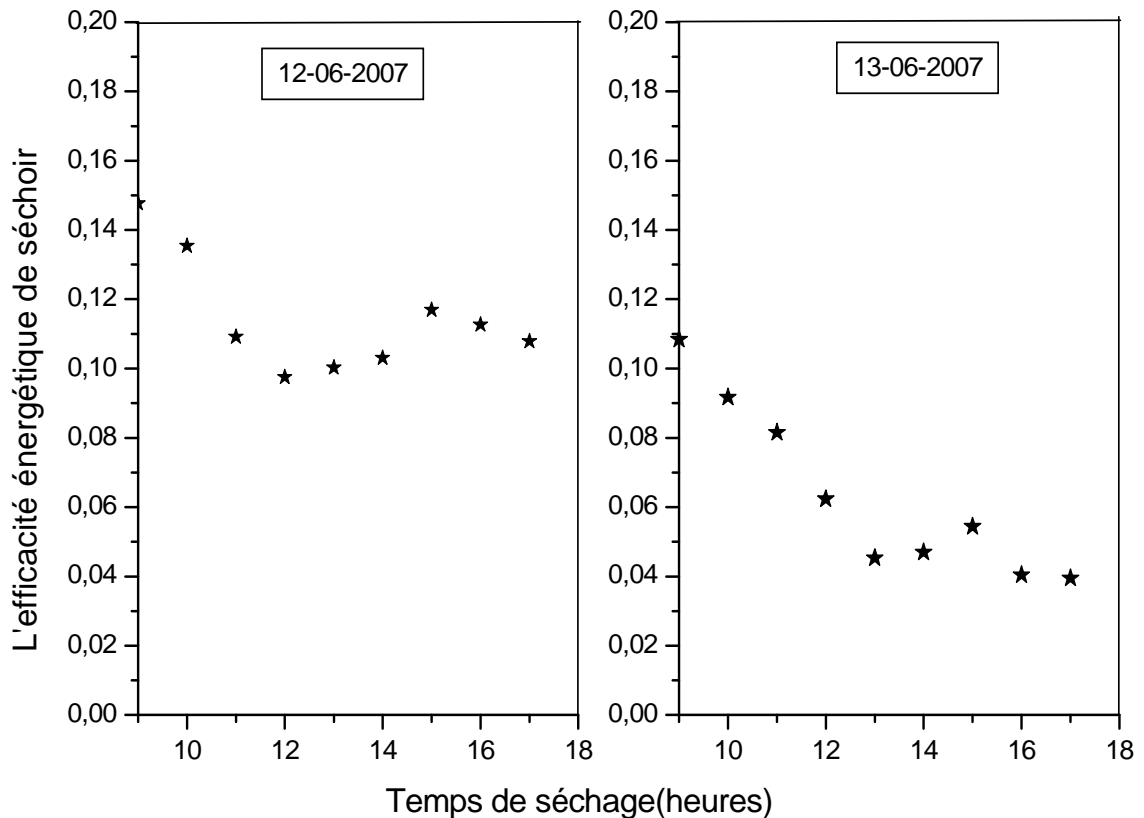
L'efficacité maximale est la plus utile pour évaluer l'évaporation réelle de l'humidité du produit qui est séché à l'intérieur de la chambre de séchage [40].

Dans la figure 3-9 l'efficacité énergétique maximale décroît avec le temps de séchage. On remarque qu'au début de l'opération, le séchage est relativement facile, et l'efficacité énergétique maximale varie entre 10,2% et 5% due à l'évaporation plus rapide de l'eau libre dans la surface externe de produit et aussi en raison de l'augmentation de la température de l'air de sortie de capteur solaire.

Pendant 2<sup>ème</sup> jours on a obtenu une diminution de l'efficacité énergétique de séchage due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

### II.1.1.8. Variation de l'efficacité énergétique de séchoir solaire

La figure 3-10 montre la variation de l'efficacité énergétique du séchoir solaire naturel  $\eta_{SN}$  en fonction du temps de séchage pour les deux jours de séchage.



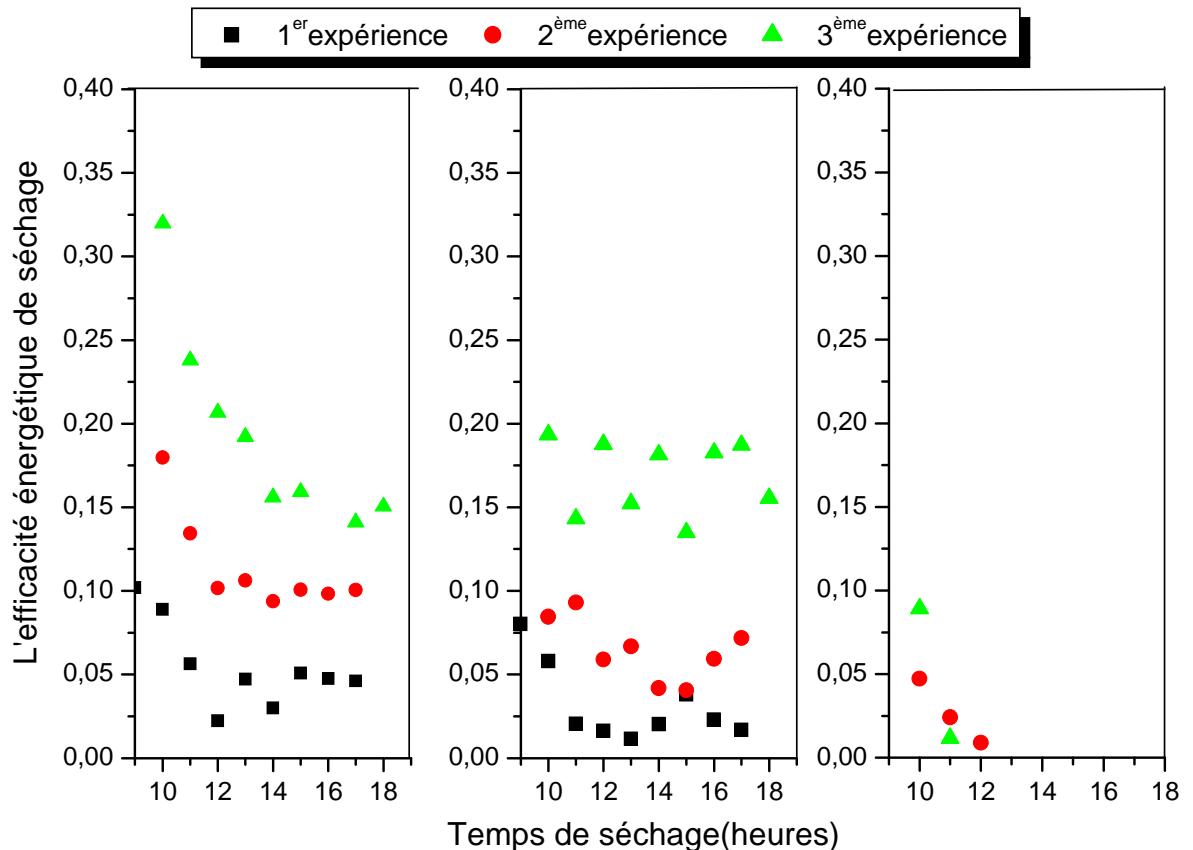
**Figure 3-10 : Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage M=3kg**

La même explication de l'efficacité de séchage, l'efficacité énergétique de séchoir solaire naturel prend des valeurs maximales variant entre 10 et 14% due à l'évaporation plus rapide de l'eau libre dans la surface externe de produit et l'augmentation de la température de l'air asséchant. Elle est diminuent durant le 2<sup>ème</sup> jour puisque la masse d'eau évaporée diminue.

## II.1.2. Etude comparative de l'efficacité énergétique de séchoir solaire naturel

### II.1.2.1. Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage

La figure 3-11 montre la comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage pour les trois expériences (les courbes de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> expérience annexe A) de séchage du séchoir solaire naturel en fonction du temps de séchage.

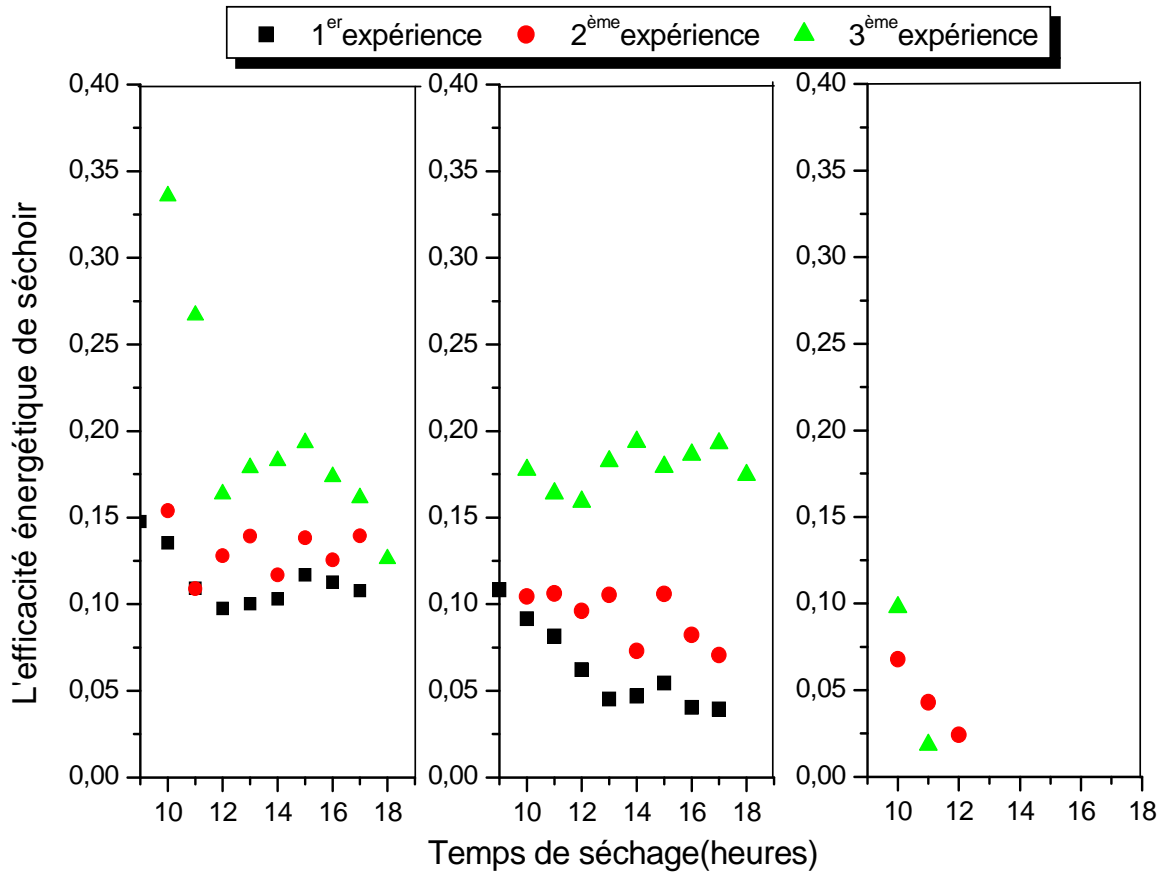


**Figure 3-11 : Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage du séchoir naturel en fonction du temps de séchage ( $M_1=3\text{kg}$ ,  $M_2=4\text{kg}$ ,  $M_3=6\text{kg}$ )**

On remarque qu'au début de l'opération, l'efficacité énergétique maximale de séchage prend des valeurs maximales de 10,2, 17,98, et 31,96% pour les trois expériences effectuées respectivement, on observe aussi un écart important entre eux due à la masse initiale du produit sécher dans chaque expérience et à 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> jours on a obtenu toujours une diminution de l'efficacité énergétique de séchage due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

### II.1.2.2. Comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir naturel

La figure 3-12 montre la comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir naturel pour les trois expériences (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> expérience annexe A) en fonction du temps de séchage.



**Figure 3-12: Comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir naturel en fonction du temps de séchage ( $M_1=3\text{kg}$ ,  $M_2=4\text{kg}$ ,  $M_3=6\text{kg}$ )**

La même explication de l'efficacité de séchage, l'efficacité énergétique de séchoir solaire naturel prend des valeurs maximales au début de l'opération de 14,76, 15,4 et 33,57% pour le 1<sup>er</sup> jour et pour les trois expériences respectivement, on observe aussi un écart important entre eux due à la masse initiale du produit sécher dans chaque expérience et à 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> jours on a obtenu toujours une diminution de l'efficacité énergétique de séchoir due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

On peut dire que la masse initiale du produit sécher influe directement sur l'efficacité énergétique c'est-à-dire que la masse du produit plus l'efficacité énergétique augmente. [41]

## II.2. Séchoir forcé

### II.2.1. Premier expérience

#### II.2.1.1. Variation du rayonnement solaire

La figure 3-13 montre la variation du rayonnement solaire global en fonction du temps pour deux jours successifs. Cette variation prend une forme gaussienne et atteint un maximum de  $803 \text{ W/m}^2$  à  $12^{\text{h}30}$ .

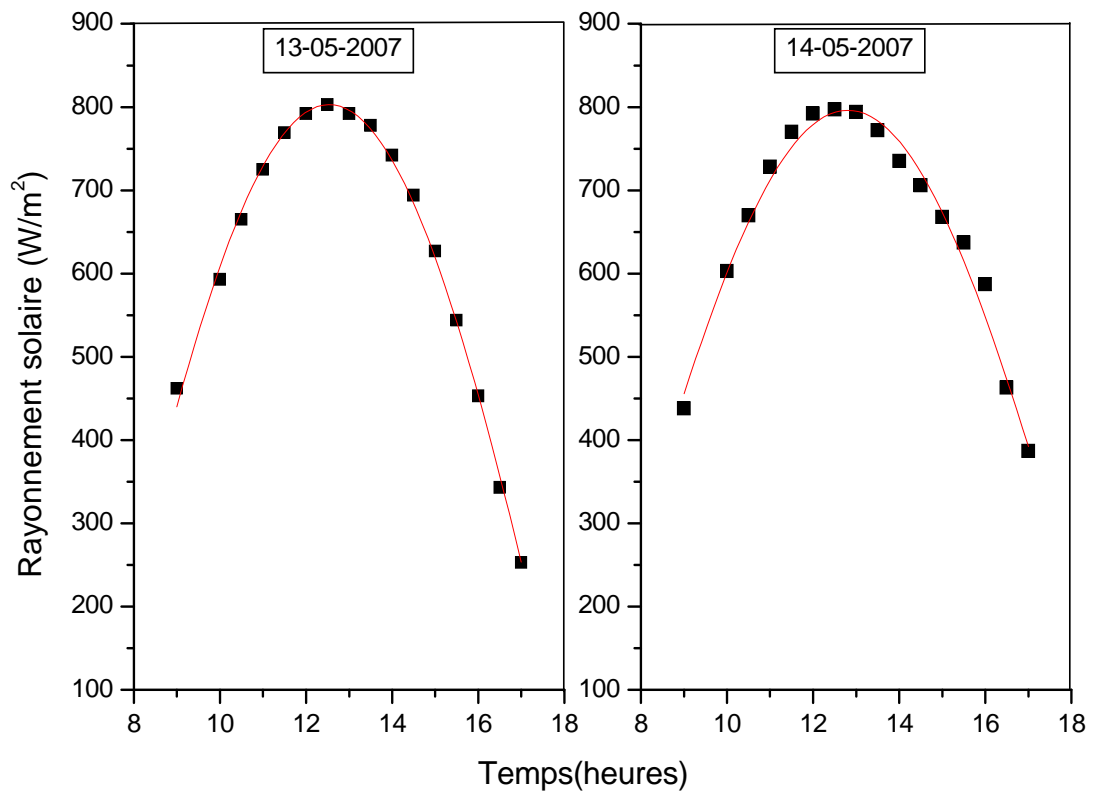
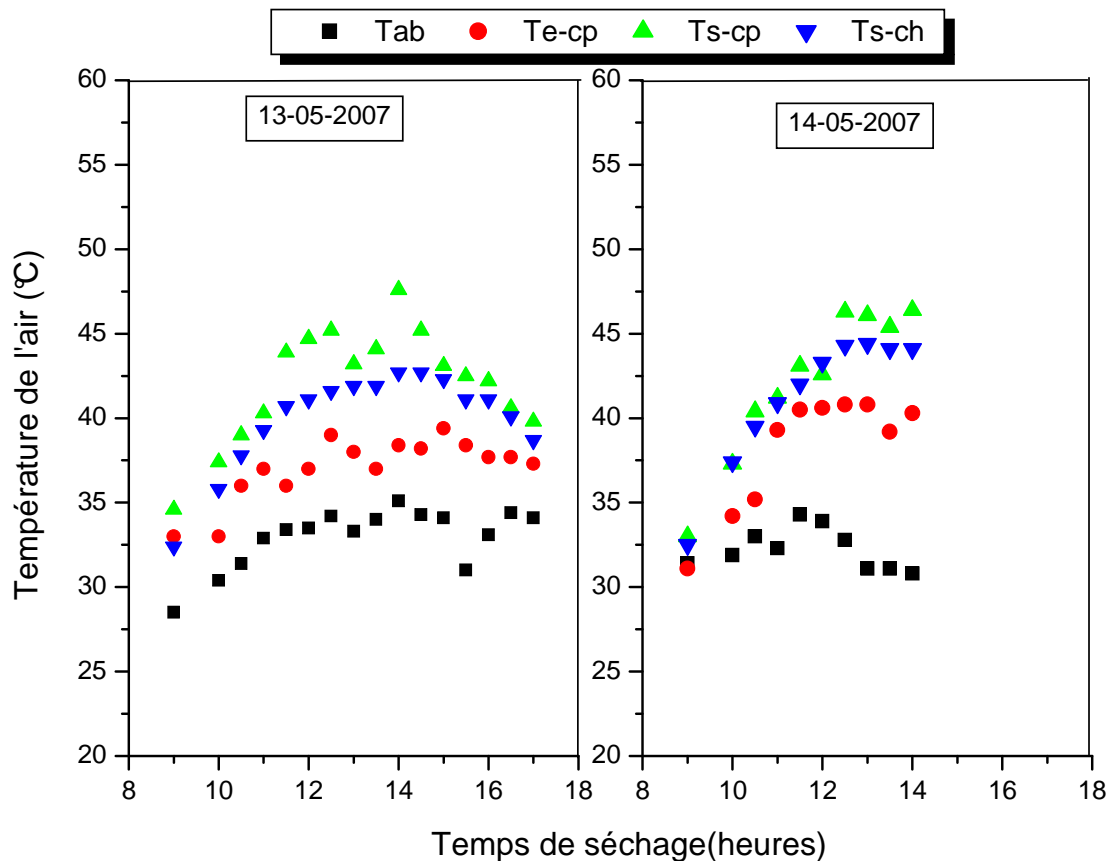


Figure 3-13: Variation du rayonnement global en fonction du temps

### II.2.1.2. Evolution de la température de l'air ambiant et de l'air asséchant

La figure 3-14 montre l'évolution de la température de l'air ambiant  $T_{ab}$ , température à l'entrée du capteur  $T_{e-cp}$ , température de l'air asséchant  $T_{s-cp}$  et température de sortie de chambre  $T_{s-ch}$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

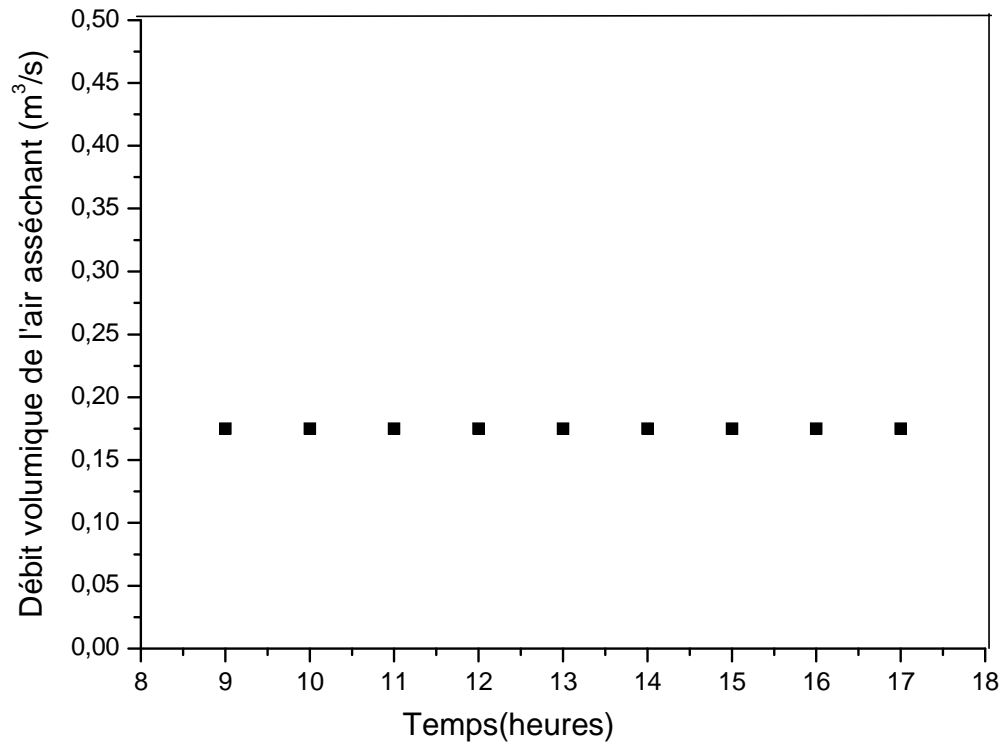


**Figure 3-14 : Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage  $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$**

$T_{ab}$ ,  $T_{e-cp}$ ,  $T_{s-cp}$  et  $T_{s-ch}$  présentent dans la figure 3-14 le même comportement que celui du rayonnement solaire, leurs valeurs maximales sont respectivement  $34,2$ ,  $39$ ,  $45,2$  et  $41,6^\circ\text{C}$ , on constate un écart moyen entre l'entrée et la sortie du capteur. Ceci est du au régime forcé de l'air circulant dans le capteur solaire. Cet écart atteint un degré maximal de  $8^\circ\text{C}$  à  $12^{\text{h}}$ . Une diminution est observée pour la température de l'air à la sortie de la chambre puisque une quantité de chaleur est consommée par l'évaporation de l'eau à partir du produit. Les mêmes remarques sont observées durant le 2<sup>ème</sup> jour dans l'intervalle de temps compris entre  $12^{\text{h}}$  30min et  $13^{\text{h}}$ .

### II.2.1.3. Débit d'air asséchant

La figure 3-15 montre le débit volumique d'air asséchant  $v_a$  en fonction du temps pendant le séchage.



**Figure 3-15: Le débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage**

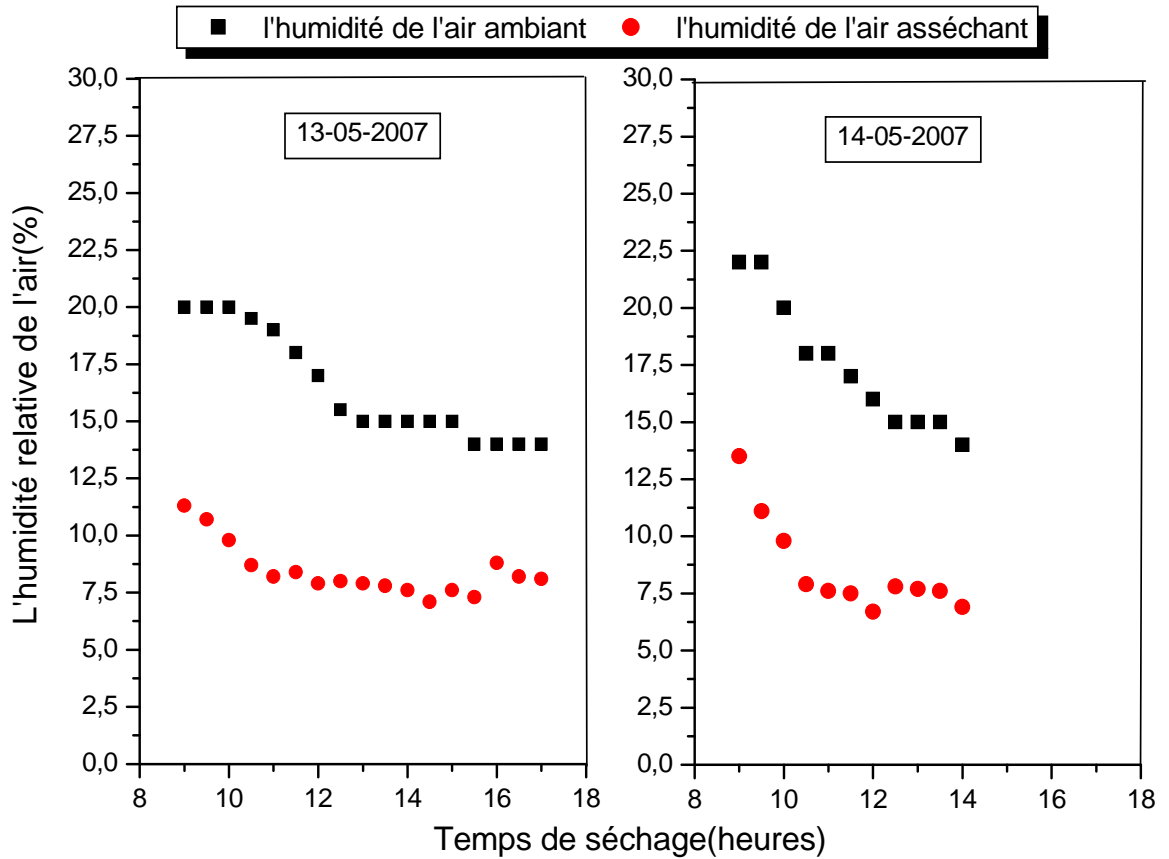
$$M=2\text{kg}, v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$$

On remarque que le débit d'air est constant au cours de toute l'opération de séchage par ce que la circulation de l'air est forcée avec une valeur  $0,175\text{m}^3/\text{s}$ .



### II.2.1.4. Evolution de l'humidité relative de l'air ambiant et de l'air asséchant

La figure 3-16 montre l'évolution de l'humidité relative de l'air ambiant  $H_{rab}$  et l'humidité relative de l'air asséchant  $H_{ras}$  en fonction du temps pour les deux jours.

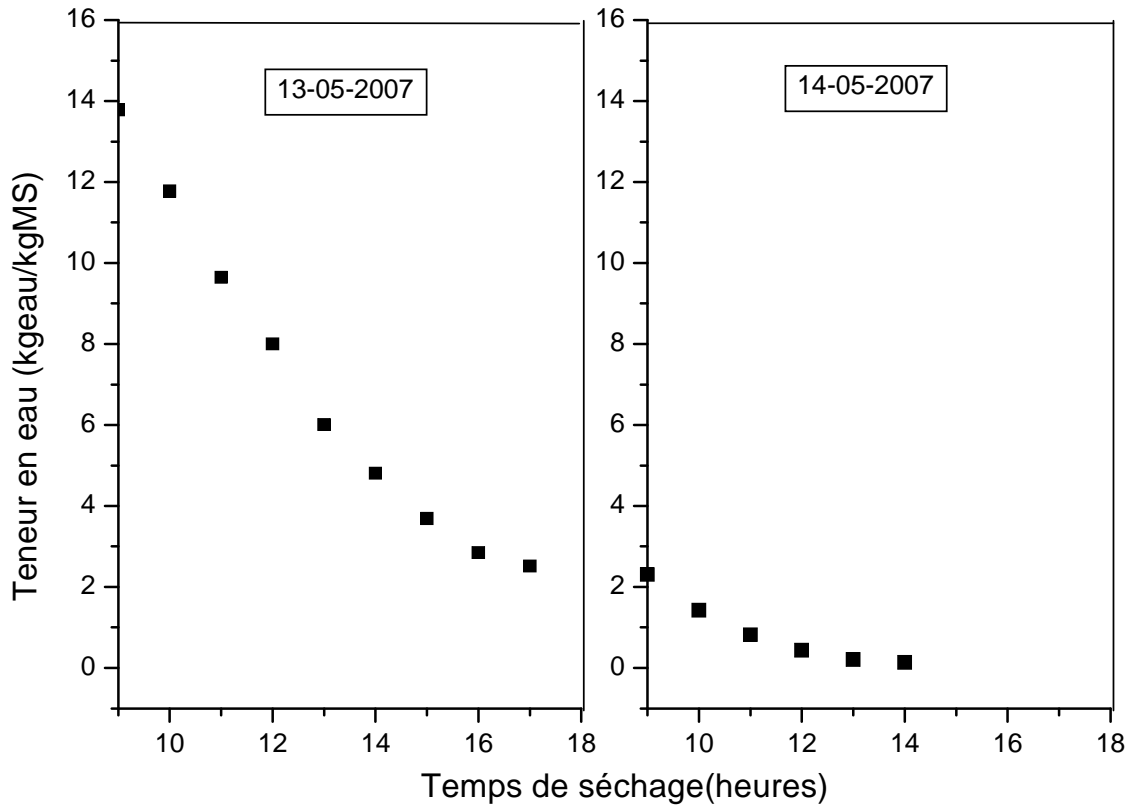


**Figure 3-16: Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage  $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$**

La figure 3-16 présente la variation de l'humidité relative de l'air ambiant et de l'air asséchant avec le temps pour les deux jours; à partir de cette figure on constate que  $H_{rab}$ ,  $H_{ras}$  diminuent en fonction du temps jusqu'à une valeur minimale de 14h à 14<sup>h</sup>30 min pour le premier jour où le rayonnement solaire et la  $T_{s-cp}$  présentent des valeurs maximales. Les mêmes remarques sont observées durant le 2<sup>ème</sup> jour.

### II.2.1.5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage

La figure 3-17 montre la variation de la teneur en eau X en fonction du temps de séchage pour les deux jours.

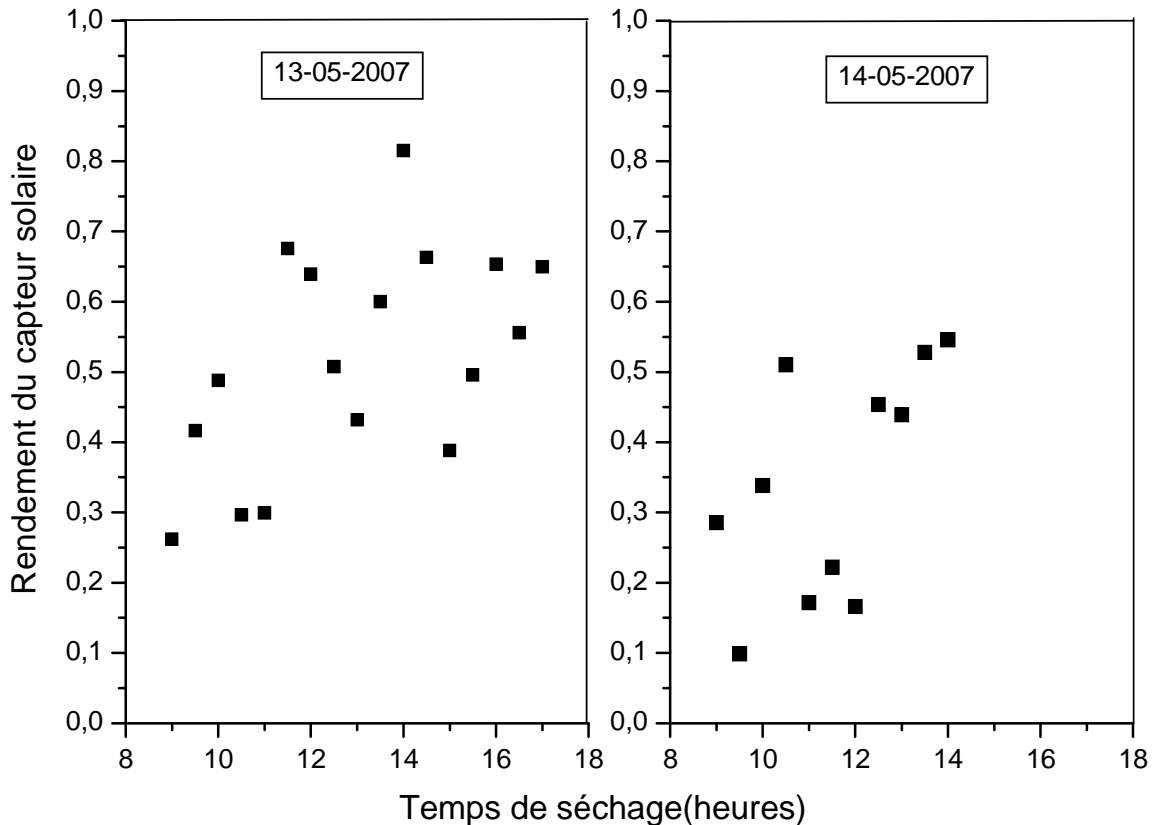


**Figure 3-17: Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage**  
 $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175\text{ m}^3/\text{s}$

La durée de séchage pour avoir une teneur finale  $X_f=0,13$  est de deux jours 13h. Pour le premier jour, on remarque sur la figure 3-17 une diminution de 13,78 à 2,51 kg eau / kg MS, ce qui explique l'évaporation d'une quantité importante d'eau libre dans la surface externe du produit. Pour le deuxième jour la diminution de X est moins importante, elle varie de 2,3 jusqu'à la teneur en eau finale 0,13 kg eau / kg MS à 14h.

### II.2.1.6. Variation du rendement du capteur solaire

La figure 3-18 montre le rendement énergétique du capteur solaire forcé  $\eta_{CN}$  en fonction du temps pour les deux jours de séchage.

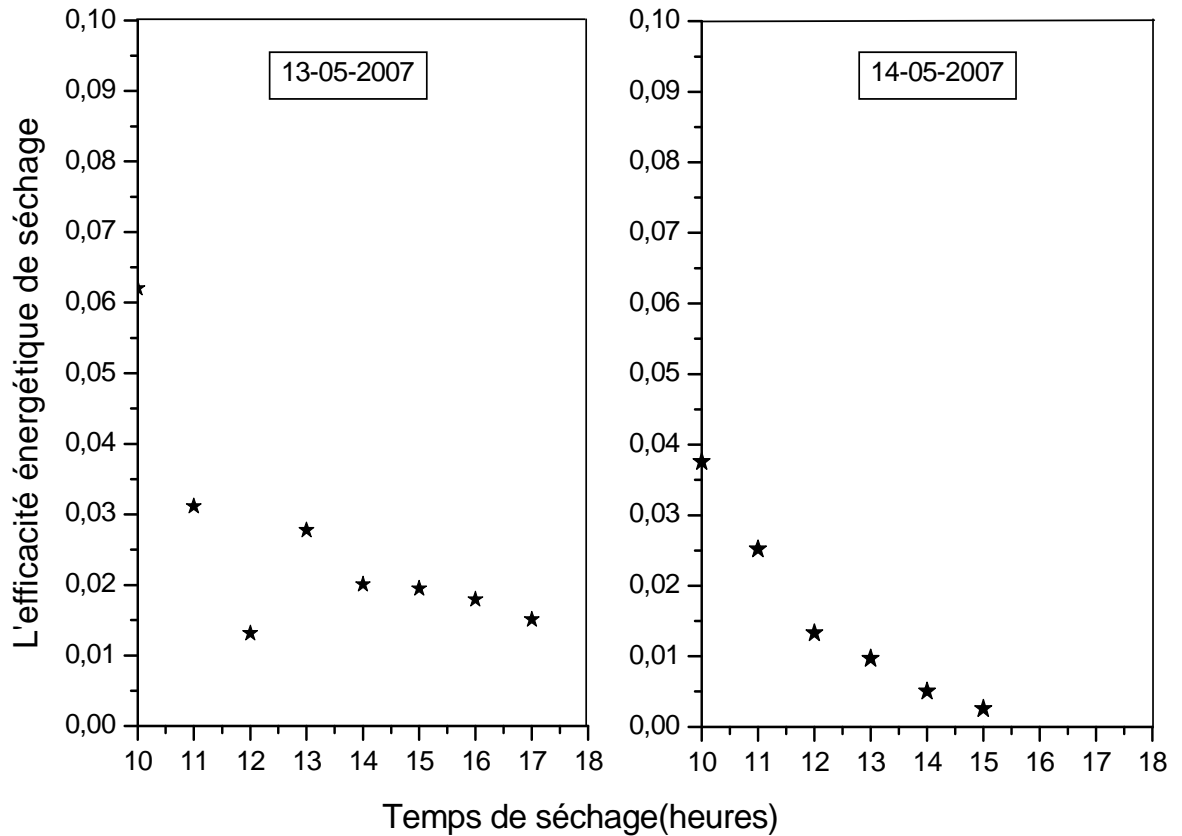


**Figure 3-18 : Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps ( $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

La figure 3-18 présente l'évolution du rendement du capteur solaire avec le temps qui s'élève avec le temps et il prend des valeurs maximales entre 54% et 81% 13h à 14h pour les deux jours successifs où le rayonnement solaire et la  $T_{s-cp}$  présentent des valeurs maximales en ce moment.

### II.2.1.7. Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage (pick-up efficiency)

La figure 3-19 montre la variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage forcé  $\eta_{pF}$  en fonction du temps de séchage pour les deux jours de séchage.



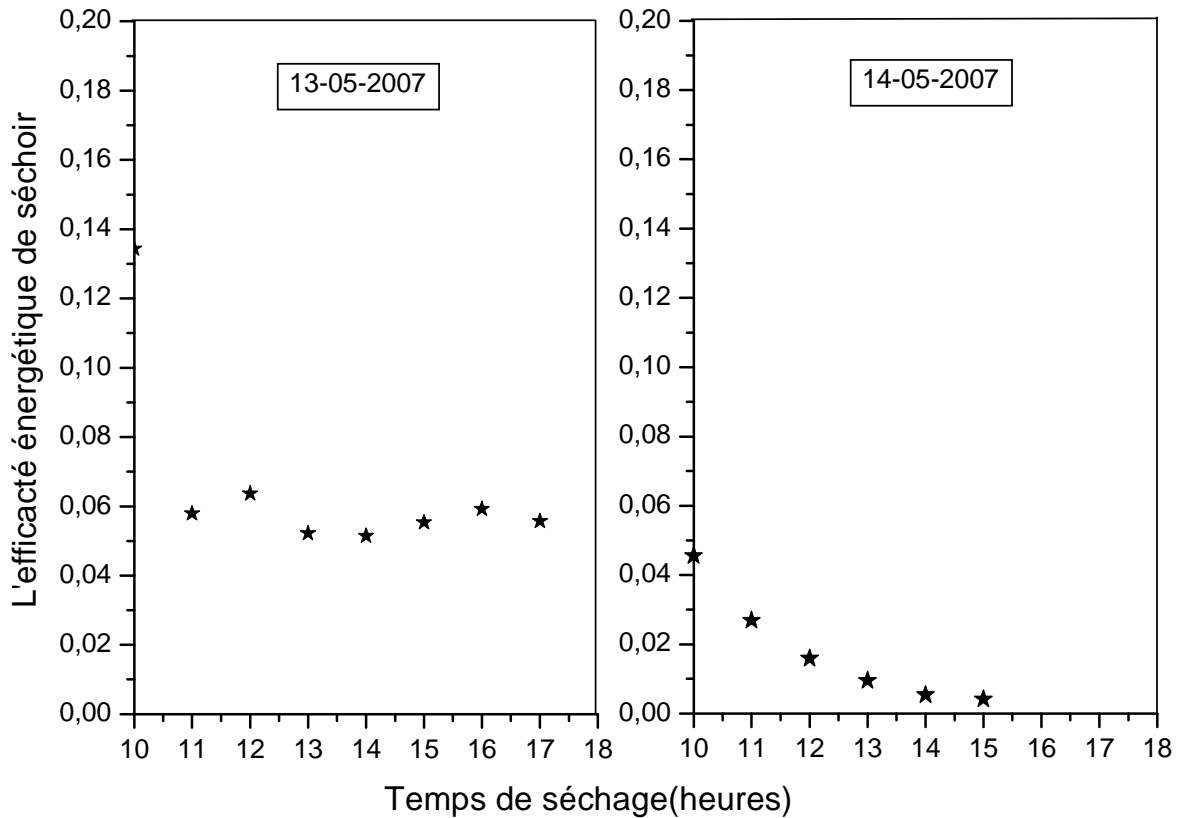
**Figure 3-19: Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps ( $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175\text{ m}^3/\text{s}$ )**

On remarque qu'au premier jour, le séchage est relativement facile et donc l'efficacité énergétique prend une faible valeur variant entre 6,2% et 2% due à l'évaporation plus rapide de l'eau libre dans la surface externe de produit et aussi en raison de l'augmentation de la température de l'air de sortie de capteur solaire.

Et durant le 2<sup>ème</sup> jour on obtient une diminution de l'efficacité de séchage due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

#### II.2.1.8. Variation de l'efficacité de séchoir solaire

La figure 3-20 montre la variation de l'efficacité énergétique du séchoir solaire forcé  $\eta_{SN}$  en fonction du temps de séchage pour deux jours de séchage.



**Figure 3-20 : Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,175\text{ m}^3/\text{s}$ )**

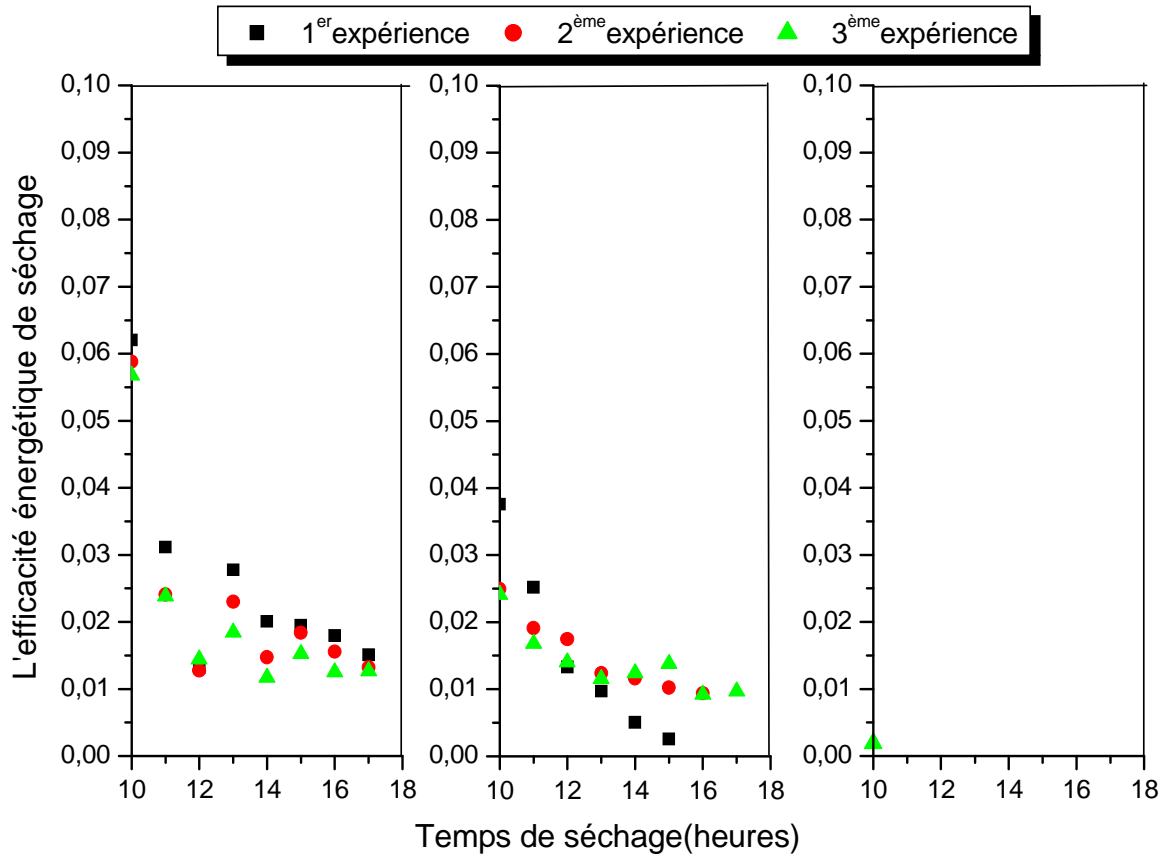
La même explication de l'efficacité de séchage, l'efficacité énergétique du séchoir solaire forcé est prend des faibles valeurs maximales varient entre 10 et 13% durant le 1<sup>er</sup> jour et elle diminue durant le 2<sup>ème</sup> jour puisque la masse d'eau dans le produit diminue.

Ces valeurs faibles de l'efficacité due à l'influence de la quantité initiale du produit.

## II.2.2. Etude comparative de l'efficacité énergétique de séchoir solaire forcé

### II.2.2.1. Comparaison de l'efficacité énergétique de séchage

La figure 3-21 montre la comparaison de l'efficacité énergétique de séchage pour les trois expériences de séchoir solaire forcé (les courbes de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> expérience annexe A) en fonction du temps de séchage.



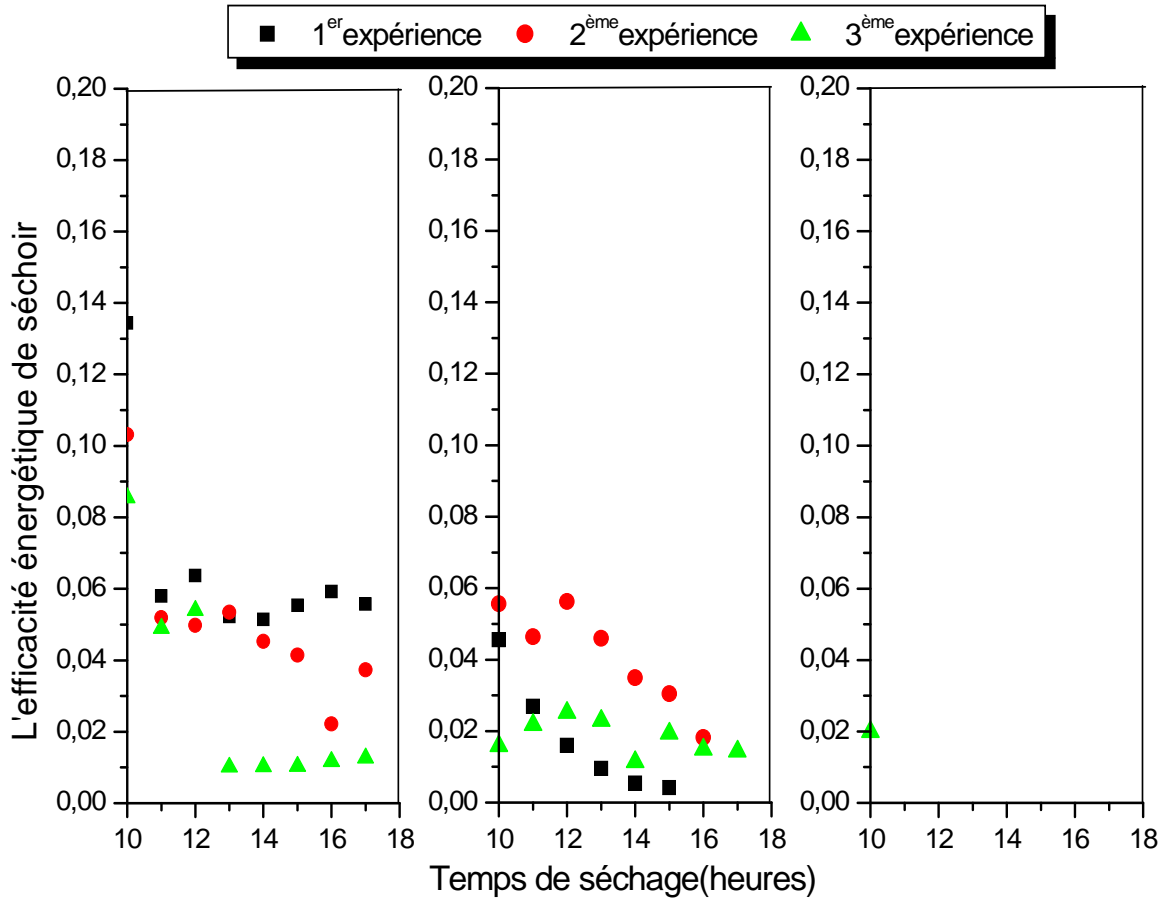
**Figure 3-21: Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage forcé en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ ,  $v_{a1}=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v_{a2}=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v_{a3}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

On remarque qu'au début de l'opération, l'efficacité énergétique maximale de séchage prend des valeurs maximales de 6,2, 5,88, et 5,67% pour les trois expériences effectuées respectivement, on observe aussi un écart faible entre eux due au débit d'air dans chaque expérience et durant 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jours on obtient toujours une diminution de l'efficacité énergétique maximale de séchage due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

On peut dire que le débit plus élevé augmente l'efficacité énergétique maximale de séchage [40].

### II.2.2.2. Comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir solaire

La figure 3-22 montre la comparaison de l'efficacité énergétique de séchoir forcé pour les trois expériences (les courbes de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> expérience annexe A) en fonction du temps de séchage.



**Figure 3-22 : Comparaison de l'efficacité énergétique de séchoir forcé en fonction du temps de séchage ( $M=2\text{kg}$ ,  $v_{a1}=0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v_{a2}=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v_{a3}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

La même explication de l'efficacité énergétique de séchage, l'efficacité énergétique de séchoir solaire forcé prend des valeurs maximales au début de l'opération de 13, 43, 10,31 et 8,55% pour le 1<sup>er</sup> jour et pour les trois expériences respectivement, on observe aussi un écart important entre eux due au débit d'air dans chaque expérience et aux 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jours on obtient toujours une diminution de l'efficacité énergétique de séchoir due à une diminution de la masse d'eau dans le produit.

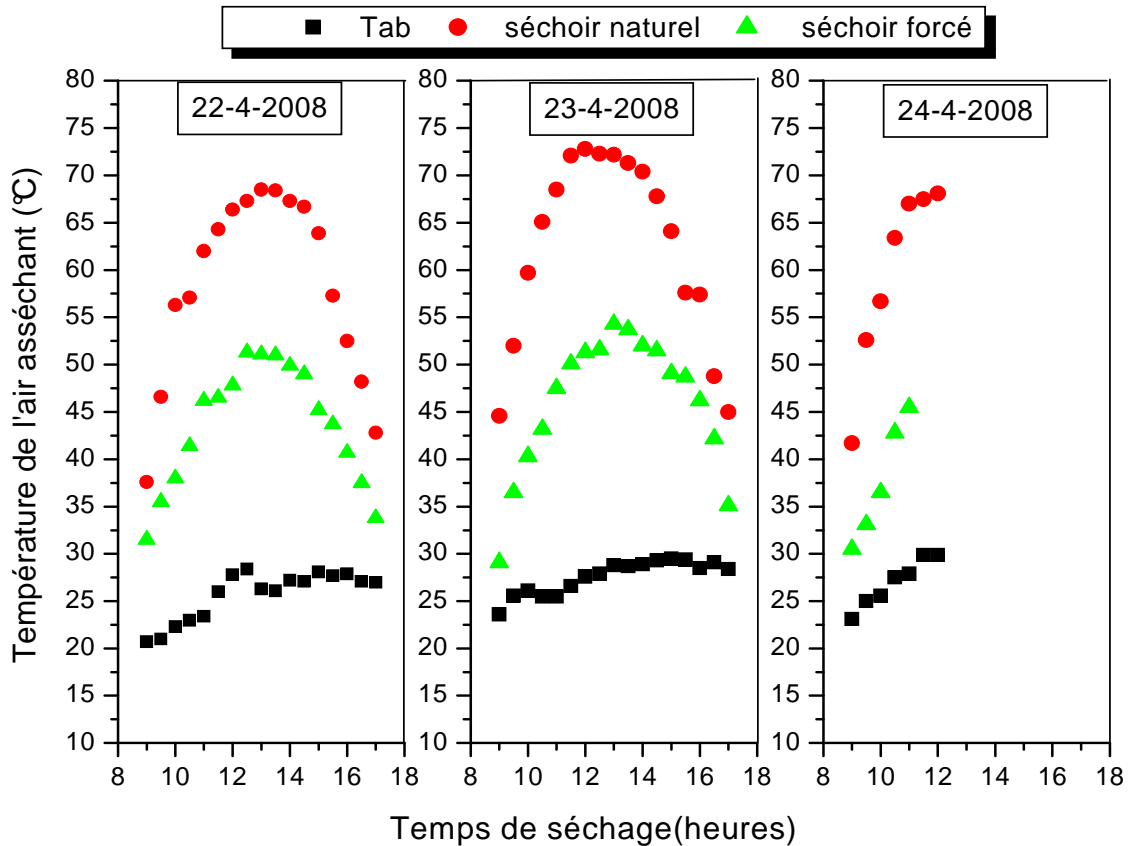
On peut dire qu'au début de l'opération le débit d'air influe sur l'efficacité énergétique. On remarque aussi que le débit plus élevé augmente l'efficacité de séchoir [30] [40].

### II.3. Etude comparative de l'efficacité énergétique entre les deux séchoirs solaires

D'après l'évaluation énergétique de nos séchoirs solaires et dans le but de comparer l'efficacité énergétique, nous présentons les courbes suivantes:

#### II.3.1. Etude comparative de la température de l'air asséchant

La figure 3-23 montre une comparaison de la température de l'air de séchage pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps.



**Figure 3-23: Comparaison de la température de l'air asséchant de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ ,  $v_{aF}=0,042\text{ m}^3/\text{s}$ )**

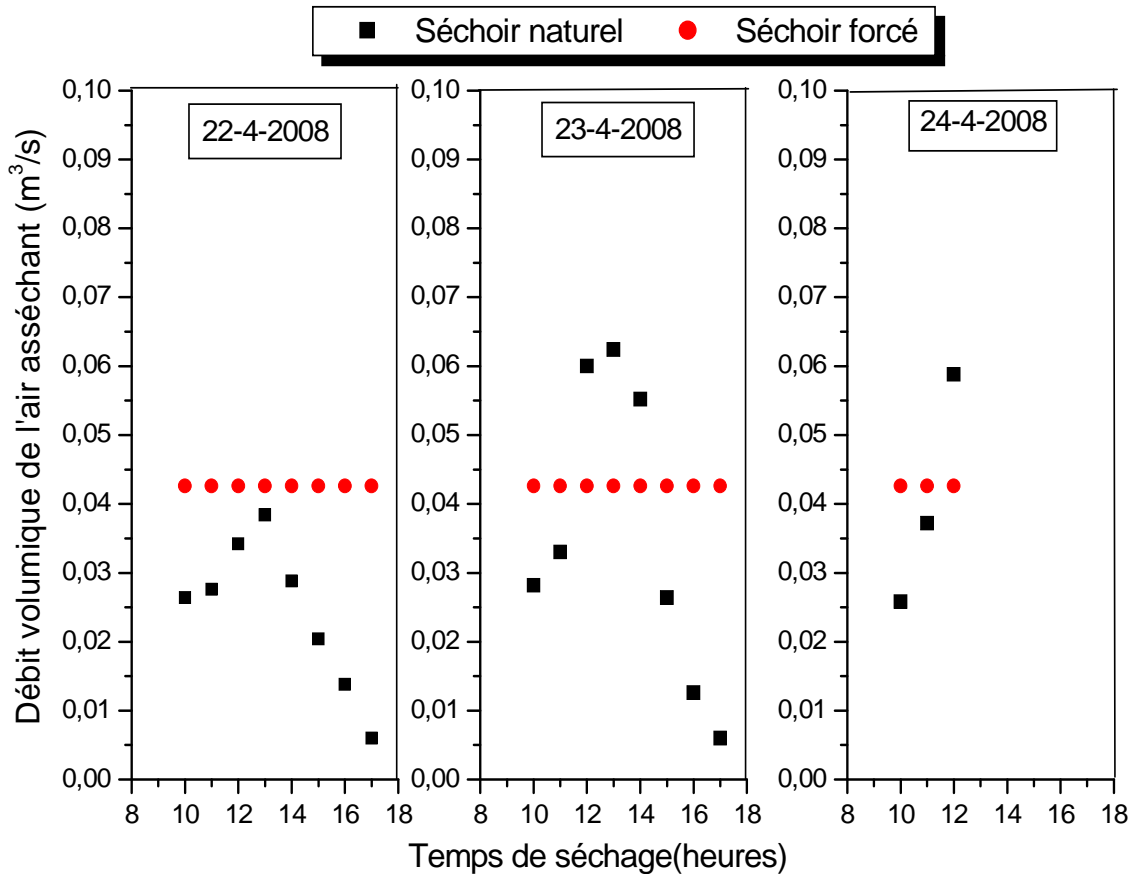
Les deux températures  $T_{s-cp}$  des séchoirs naturel et forcé prennent des valeurs maximales de  $68^\circ\text{C}$  et  $51^\circ\text{C}$  à  $12^{\text{h}30}$  à  $13^{\text{h}30}$  respectivement, la même constatation pour les 2<sup>èmes</sup> et 3<sup>ème</sup> jour.

On remarque que la  $T_{s-cp}$  du séchoir naturel est plus élevée que  $T_{s-cp}$  du séchoir forcé parce que le débit d'air est plus important et donc le chauffage est plus faible en régime forcé qu'en régime naturel.



### II.3.2. Comparaison du débit d'air de l'air asséchant

La figure 3-24 montre l'évolution de débit volumique d'air asséchant pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps.

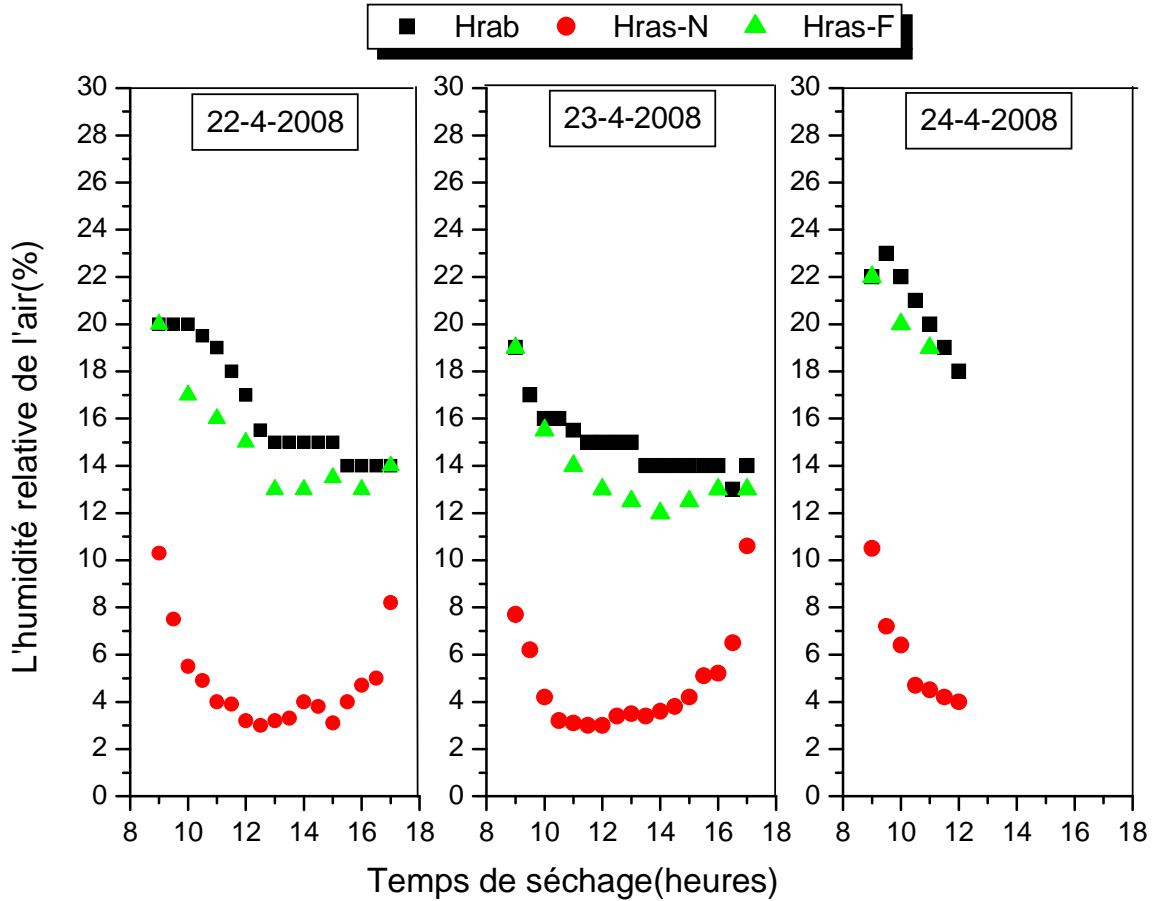


**Figure 3-24: Le débit volumique de l'air asséchant de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ ,  $v_{aF}=0,042\text{ m}^3/\text{s}$ )**

On observe que le débit d'air de séchoir naturel dépend directement de la température de séchage  $T_{s\text{-}cp}$ , donc il est augmenté avec  $T_{s\text{-}cp}$  et prend la valeur  $0,038\text{ m}^3/\text{s}$  maximale le 1<sup>er</sup> jour à 13<sup>h</sup> où le débit d'air du séchoir forcé est constant et il est égal à  $0,042\text{ m}^3/\text{s}$ . Les mêmes remarques sont observées durant le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> jour.

### II.3.3. Comparaison de l'humidité relative de l'air asséchant

La figure 3-25 montre la comparaison de l'humidité relative de l'air de séchage pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps de séchage.

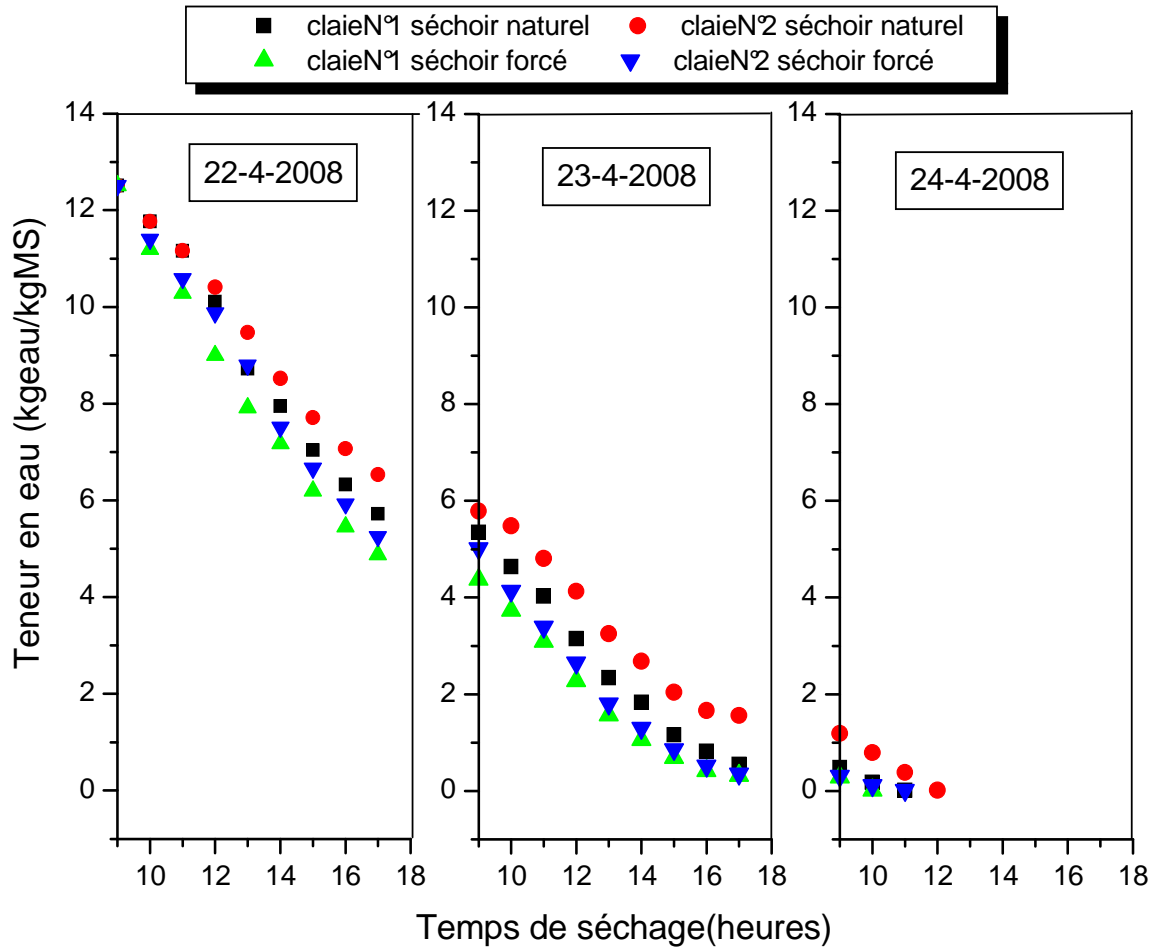


**Figure 3-25: Comparaison de l'humidité relative de l'air asséchant pour deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ ,  $v_{aF}=0,042\text{ m}^3/\text{s}$ )**

A partir de cette figure on constate que  $H_{\text{ras-N}}$  pour le séchoir naturel est plus faible que  $H_{\text{ras-F}}$  pour le séchoir forcé et elle diminue en fonction du temps jusqu'à une valeur minimale de 3% et 12% à 13h et 14<sup>h</sup> respectivement et où la  $T_{s\text{-cp}}$  présente des valeurs maximales.

#### II.3.4. Comparaison de la teneur en eau

La figure 3-26 montre la comparaison de la teneur en eau  $X$  de la tomate pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps de séchage.

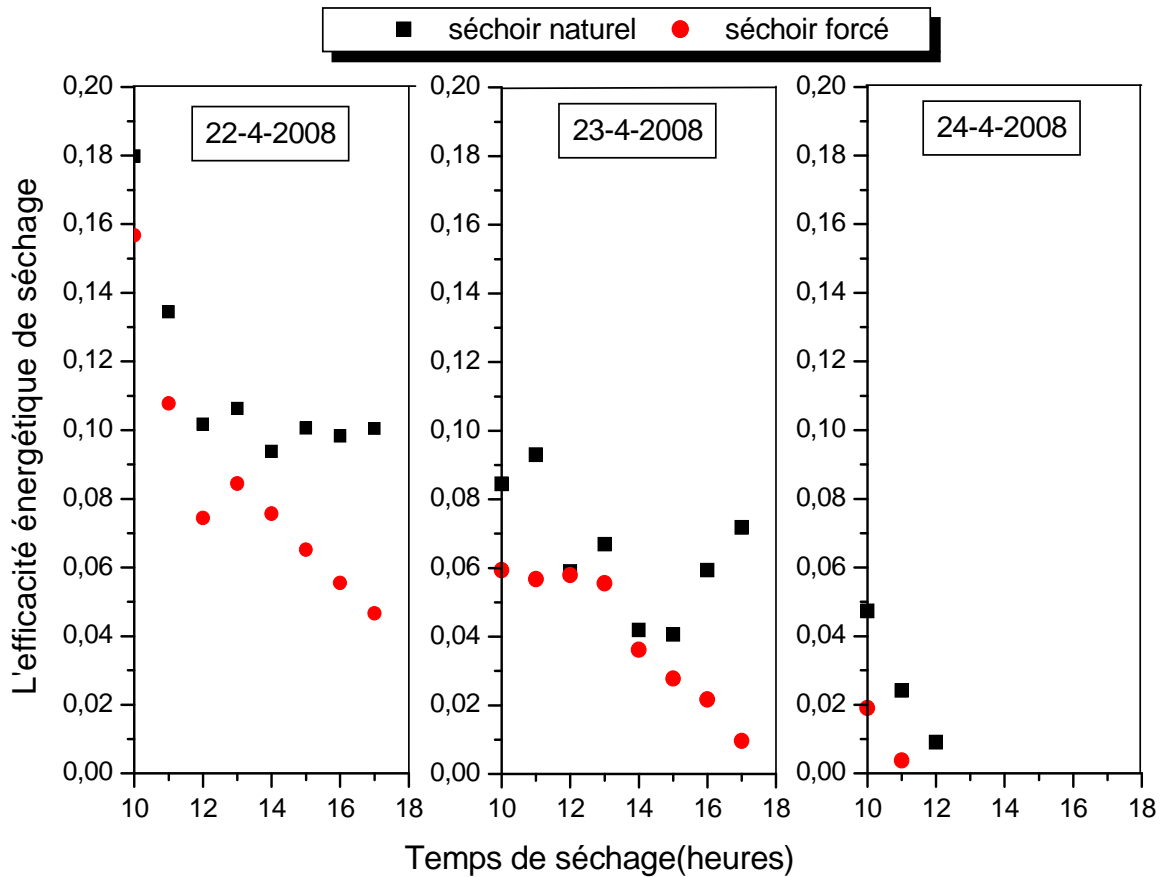


**Figure 3-26: Comparaison de la teneur en eau de la tomate dans les deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ ,  $v_{aF}=0,042\text{ m}^3/\text{s}$ )**

Les temps de séchage, pour avoir une teneur en eau finale  $X_f = 0,13\text{kg eau/kg MS}$  par les deux séchoirs, sont respectivement  $18^{\text{h}}$  et  $19^{\text{h}}$ . Ceci montre que le séchage forcé abaisse le temps de séchage de la tomate par rapport au séchage naturel. On peut expliquer cette différence par les valeurs de débit d'air (l'évacuation de l'air est forcée) et le rendement énergétique du capteur solaire durant le travail expérimental.

### II.3.5. Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage

La figure 3-27 montre la comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage  $\eta_p$  pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps.



**Figure 3-27: Comparaison de l'efficacité énergétique maximale de séchage de deux séchoirs solaires en fonction du temps ( $M=4\text{kg}$ ,  $v_{aF}=0,042\text{ m}^3/\text{s}$ )**

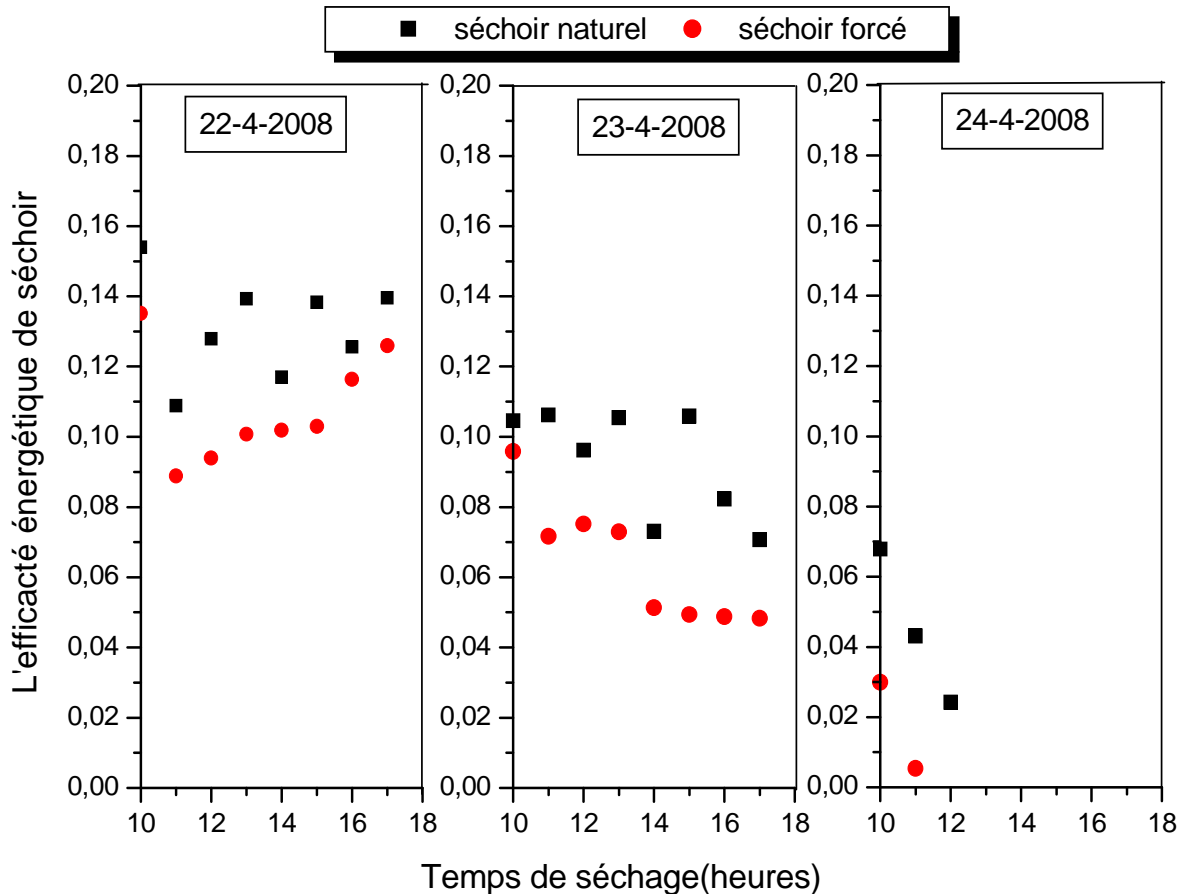
L'efficacité énergétique de séchage diminue quand la cinétique de séchage est décalée de période à allure constante à période de ralentissement. Le calcul d'efficacité pendant la période de séchage d'allure constante du produit a pu offrir une évaluation logique de la réalisation de l'efficacité du séchage. Cependant, en raison de l'absence d'une période à allure constante de séchage de la tomate et la difficulté en observant le changement du période à allure constante au séchage à période de ralentissement, on peut définir l'efficacité énergétique de séchage pendant le premier jour du séchage. [4]

On peut remarquer qu'au premier jour, les efficacités maximales prennent des valeurs maximales de 17,98% et 15,67% pour le séchoir naturel et forcé respectivement due à l'évaporation plus rapide de l'eau libre dans la surface externe de produit et aussi en raison de l'augmentation de la température de l'air asséchant.

Pendant le 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jour on a obtenu une diminution de l'efficacité maximale due à une diminution dans la masse de l'eau dans le produit.

**II.3.6. Comparaison de l'efficacité énergétique du séchoir**

La figure 3-28 montre une comparaison de l'efficacité énergétique de séchoir  $\eta_s$  pour les deux séchoirs solaires en fonction du temps.



**Figure 3-28: Comparaison de l'efficacité énergétique pour deux séchoirs solaires en fonction du temps de séchage (M=4kg,  $v_{aF}=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

On peut remarquer qu'au début de l'opération, l'efficacité énergétique du séchoir naturel et forcé prend des valeurs maximales variantes entre 12- 15% et 10- 13% respectivement. Elle diminue avec le temps et la masse d'eau  $m_e$  évaporé, on remarque que l'efficacité énergétique du séchoir naturel est plus élevée que celle du séchoir forcé parce que on a utilisé une source

électrique (ventilateur d'aspiration de l'air asséchant) c'est à dire une consommation en plus de l'énergie, par contre dans le séchoir naturel l'énergie utile est gratuite (l'énergie solaire).

### III. Résumé et discussion des résultats expérimentaux

#### III.1. Résumé des résultats expérimentaux de deux prototypes

On peut résumer les résultats expérimentaux des valeurs moyennes dans les tableaux suivants:

Le tableau 3-1 présente les valeurs moyennes des températures de l'air, débits volumique d'air et humidités relatives de l'air pour les deux séchoirs solaires pendant les 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jour d'expériences.

	Séchoir naturel					Séchoir forcé				
	$v_{as}$ $m^3/s$	$T_{e-cp}$ (°C)	$T_{s-cp}$ (°C)	$Hr_{as}$ %	$T_{s-ch}$ (°C)	$v_{as}$ $m^3/s$	$T_{e-cp}$ (°C)	$T_{s-cp}$ (°C)	$Hr_{as}$ %	$T_{s-ch}$ (°C)
<b>22-4-2008</b>	0,023	28,27	58,42	4,8	46,06	0,042	27,15	43,53	15,33	35,22
<b>23-4-2008</b>	0,038	30,44	62,45	4,68	50,85	0,042	29,75	46,02	14,05	38
<b>24-4-2008</b>	0,033	30,57	59,57	5,92	49,91	0,042	27,14	37,68	20	34,74
<b>Temps de séchage</b>	présence unique de la phase de ralentissement, t=19 heures					présence unique de la phase de ralentissement, t= 18heures				

**Tableau 3-1: les valeurs moyennes des températures de l'air, débits volumique d'air et humidités relatives de l'air**

Le tableau 3-2 présente les valeurs moyennes des efficacités énergétiques maximales de séchage et les efficacités énergétiques des séchoirs solaires pour les deux séchoirs solaires pendant les 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> jour.

système	1 <sup>er</sup> Jour		2 <sup>ème</sup> Jours		3 <sup>ème</sup> Jours	
	Efficacité énergétique de séchoir(%)	Efficacité énergétique maximale de séchage(%)	Efficacité énergétique de séchoir(%)	Efficacité énergétique maximale de séchage(%)	Efficacité énergétique de séchoir(%)	Efficacité énergétique maximale de séchage(%)
Séchoir solaire naturel	13	11	9	6	4	2
Séchoir solaire forcé $v_a=0,042$ $m^3/s$	10	8	6	4	1	1

**Tableau 3-2 : les valeurs moyennes des efficacités énergétiques maximales de séchage et des séchoirs solaires**

### III.2. Discussion des résultats expérimentaux

En utilisant les deux séchoirs solaires indirects naturel et forcé pour sécher la tomate, on a obtenu les résultats suivants:

- Les températures moyennes de l'air asséchant du séchoir naturel sont élevées, elles prennent les valeurs moyennes de 58, 62 et 59°C pour les trois jours de séchage successifs par rapport aux températures moyennes du séchoir forcé qui sont de 43, 46 et 37°C.
- Les humidités moyennes et les débits d'air de l'air asséchant moyens du séchoir forcé sont plus élevés par rapport aux humidités et débits d'air du séchoir naturel.
- Le temps de séchage avec le séchoir naturel est plus lent (19h) et il faut attendre 1 heures par rapport au temps de séchage avec le séchoir forcé, qui est égal à 18 heures.
- L'efficacité énergétique maximale du séchage du séchoir naturel est élevée et elle est prend la valeur de 11% par rapport à celle du séchoir forcé qui est égale 8%, cette déférence due de la valeur faible du débit d'air asséchant du séchoir forcé.
- L'efficacité énergétique de séchoir naturel est élevée et elle est prend la valeur 13% par rapport à celle du séchoir forcé qui est égale à 10%.

## CONCLUSIONS

Le séchage solaire est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires, il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels du produit. Les séchoirs solaires indirects sont adaptés à ce type de séchage notamment dans les régions arides et semi-arides qui disposent d'un gisement solaire important.

Dans notre travail, nous avons effectué des expériences sur le séchage de la tomate dans deux prototypes de séchoirs solaires indirects, à convection naturelle et à convection forcée.

L'objectif de ce travail est de connaître le comportement énergétique de nos séchoirs solaires, et pour faire une comparaison de leurs efficacité énergétique.

Les résultats expérimentaux obtenus sont résumés aux conclusions suivantes:

- Le rayonnement solaire, la température, l'humidité, les débits de l'air ambiant et asséchant, le temps de séchage, le rendement du capteur solaire, l'efficacité énergétique de séchage et l'efficacité énergétique du séchoir sont les paramètres principaux pour l'évaluation énergétique des séchoirs solaires;
- Le rayonnement solaire, la température, l'humidité, les débits de l'air asséchant, le temps de séchage et la masse initiale du produit à sécher sont les paramètres principaux influant directement sur l'efficacité énergétique du séchage solaire;
- L'efficacité énergétique du séchoir solaire dépend directement de l'efficacité énergétique de séchage et du rendement du capteur solaire, elle est importante dans le séchoir naturel par rapport au séchoir forcé;
- L'efficacité énergétique de deux séchoirs solaires est faible parce que:
  - la masse initiale du produit est petite.
  - L'ouverture traditionnelle et instantanée (l'ouverture du séchoir lors de chaque pesée) de la chambre de séchage pendant la charge /décharge de produit influe sur le produit par le refroidissement du produit et sur la chambre de séchage par la perte thermique d'énergie.

Par ailleurs, nous suggérons que le séchoir forcé est un système bien contrôlé (le ventilateur d'aspiration). Cet avantage participe dans l'abaissement du temps de séchage et



l'augmentation de l'efficacité énergétique de séchage. Par contre ce système influe négativement sur l'efficacité énergétique du séchoir puisqu'il consomme de l'énergie (l'énergie électrique).

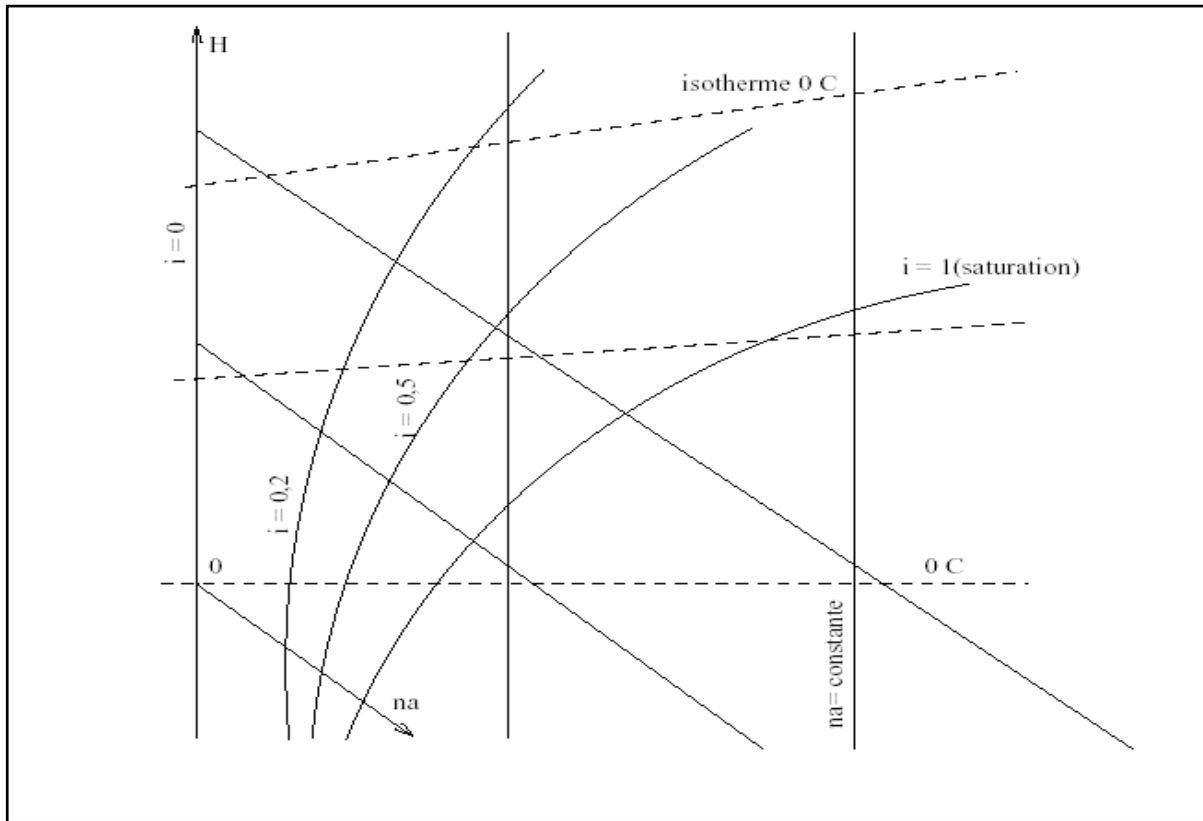
---

**BIBLIOGRAPHIE**

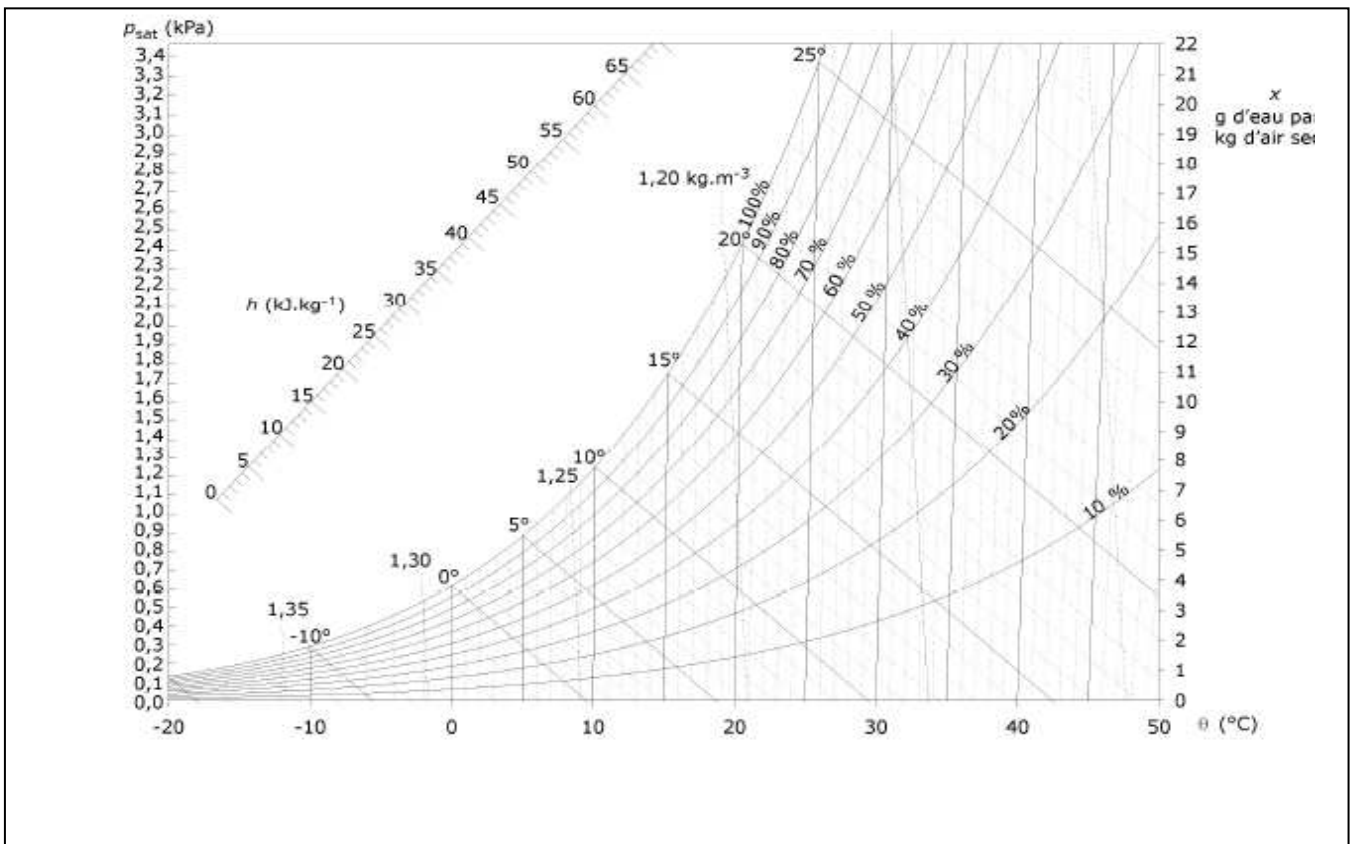
- [1]. M. A.A. El-Sebaï, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, H.G. El-Gohary, "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer", *Energy Conversion and Management* 43 (2251–2266), Egypt, 2002.
- [2]. D. Mennouche, "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire ", *Mémoire de Magistère, Université de Ouargla*, 2006.
- [3]. T. Togrul, D. Pehlivan, "Mathematical modeling of solar drying of apricots in the layers", *Journal of food engineering* 55 (209-216) 2002.
- [4]. M. Augustus Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, "A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (367–393) 2002.
- [5]. N. Benaouda et al. A.Boulemtafes, M. Belhamel " Etude du Comportement thermique et dynamique d'un séchoir solaire", 12èmes Journées Internationales de Thermique Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [6]. W. Maake, H. J. Echert, et J. L. Cauchepin, "Manuel technique du froid", Tome I, PYC Edition, Alamand 2001.
- [7]. F. Aroudj, K. Laouini, "Séchage solaire des produits agro-alimentaires", *Mémoire de PFE d'Ingénieur en Génie Chimique Ouargla*, 2006.
- [8]. J. Nadeau. P, Puiggali. J. R, "Séchage : des processus physiques aux procédés industriels", *Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France*, 1995.
- [9]. Y. Jannot, "Isotherme de sorption : modèles et détermination" Janvier 2003.
- [10]. M. Kouhila, A. Belghit, M. Kaoua et M. Daguénet, "Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire", *Rev. Energ. Ren : Physique énergétique*, 1998.
- [11]. Y. Jannot, "L'air humide" *Techniques de l'ingénieur*, Septembre 2005.
- [12]. McCabe. W. L, Smith. J. C and Harriott. P, "Unit operation of Chemical Engineering", *Hill Book Company*, 1985.
- [13]. Schnell, D. "Techniques de séchage", 1983.
- [14]. N. Saifi, "Simulation numérique du processus de séchage des matériaux poreux par séchage à convection forcée", *Mémoire d'Ingénieur de Génie Mécanique, Ouargla*, 2002.

- 
- [15]. B. Touati, "Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe", Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie, 2001.
- [16]. J.,J., Bimbenet, "Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires", Paris, 1978.
- [17]. R. B. Eyclument, "Manuel de thermique, Théorie et pratique", 2<sup>ème</sup> Edition revue et augmentée, Paris, 1997.
- [18]. R. Leleu, " Transferts de chaleur", Techniques de l'ingénieur, 1981.
- [19]. L. Khezzar, "Procédés de transfert de chaleur et de masse", Université de Constantine, Office de publications universitaires, Alger, 1998.
- [20]. Daguene. M., "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France, 1985.
- [21]. A. Belghit, M. Belhamidi, A. Bennis, B. C. Boutaleb, S. Benet, "Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée" Rev. Gén. Therm., 36, 1997, 837-850, Elsevier Paris
- [22]. O. V. Ekechukwu, B. Norton, "Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology", Energy Conversion and Management, 40, 1999, 615 – 655
- [23]. P. Duzde, "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés", Edition du Gret, France, 1999.
- [24]. A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar drying with convective heat flow" Solar Energy Vol. 59, Nos. 4-6, pp. 121-126, Ghana, 1997.
- [25]. S. Malenguinza, " Conception, réalisation et expérimentation d'un séchoir solaire pliable et portable", Mémoire d'Ingénieur d'Energétique et Environnement, Université d'Abomey-Calavi, 2005.
- [26]. T. V.,Vargas, S. A. Camacho "Drying of fruits and vegetables", Experiences in Bolivia. Publication of Energetica (Bolivia) and FAKT (Germany), 1996.
- [27]. C. Tiris, M. Tiris, and I. Dincer "Investing of the thermal efficienies of a solar drayer" Energy convers. *Mgmt* Vol. 36, No. 3, pp. 205-212, Turkey, 1995.
- [28]. C. Tiris, N. Ozbalta "Thermal performance of new solar air heater", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 22, No. 3, pp. 411-423, Ege University, Bornova, Izmir-Turkey, 1995.

- [29]. P. Gbaha, H. Yobout Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua, S. Touré, "Experimental investigation of solar dryer with natural convective heat flow", *Renewable Energy* 32(2007) 1817-1829
- [30]. Khalil E.J. Al-Juamily, Abdul Jabbar N. Khalifa, Tadahmun A. Yassen, "Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq", *Desalination*, 209 (163–170) Al-Nahrin University, Baghdad, Iraq, 2007.
- [31]. O. C. Headley and W. Hinds "Medium scale solar crop dryers for agricultural products", the Technical Design of Barbados Solar Dryer, Centre for Resource Management and Environmental Studies, University of the West Indies, 1973.
- [32]. V. Shanmugam, E. Natarajan, "Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without erective mirror", *Applied Thermal Engineering* 27, 1543–1551, Anna University India, 2007.
- [33]. B. Bena and R. J. Fuller, "Natural convection solar dryer with biomass back-up heater", *Solar Energy* Vol. 72, No. 1, pp. 75–83, Australia, 2002.
- [34]. A. Madhlopa, G. Ngwalo, "Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater" *Solar Energy* 81, 449–462, Malawi, 2007.
- [35]. I. Gallali Y.M, Abujnah Y.S, Bannani F.K. "Preservation of fruits and vegetables using solar dryer : a comparative study of natural and solar drying, III: Chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions)", *Renewable Energy*; 19:203–212, 1999.
- [36]. Ranganna. "Handbook of analysis and quality control for fruits and vegetable products", New Delhi : Central Food Technological Research Institute, Mysore. Tata McGraw-Hill Pub. Co., 1986.
- [37]. D. M. Khedkar, S.K. Roy, "Histological evidence for the reconstititional property of dried/dehydrated raw mango slices", *J. Food Sci. Tech.*; 25(47) India, 1990
- [38]. V. Shanmugama, E. Natarajan, "Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer", *Renewable Energy* 31,1239–1251, India, 2006.
- [39]. L. Zhimin, H. Zhong, T. Runsheng, T. Liu, G. Wenfeng, Y. Zhang, "Experimental investigation on solar drying of salted greengages", *Renewable Energy*, (1-11), 2005.
- [40]. N. Coalk, A. Hepbasli, "Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer", *Journal of Food Engineering* 80 (2007) 1188-1193
- [41]. C. Tiris, M. Tiris, and I. Dincer. "Investigation of the thermal efficiencies of a solar dryer", *Energy Convers. Mgmt* Vol. 36, No. 3, pp. 205-212, 1995.



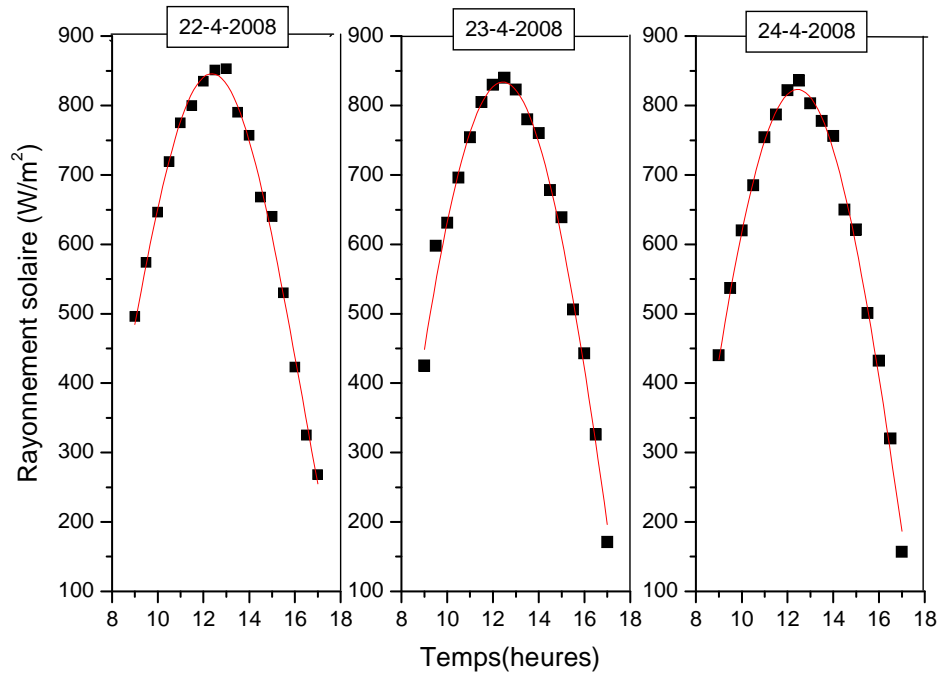
**Diagramme de Mollier**



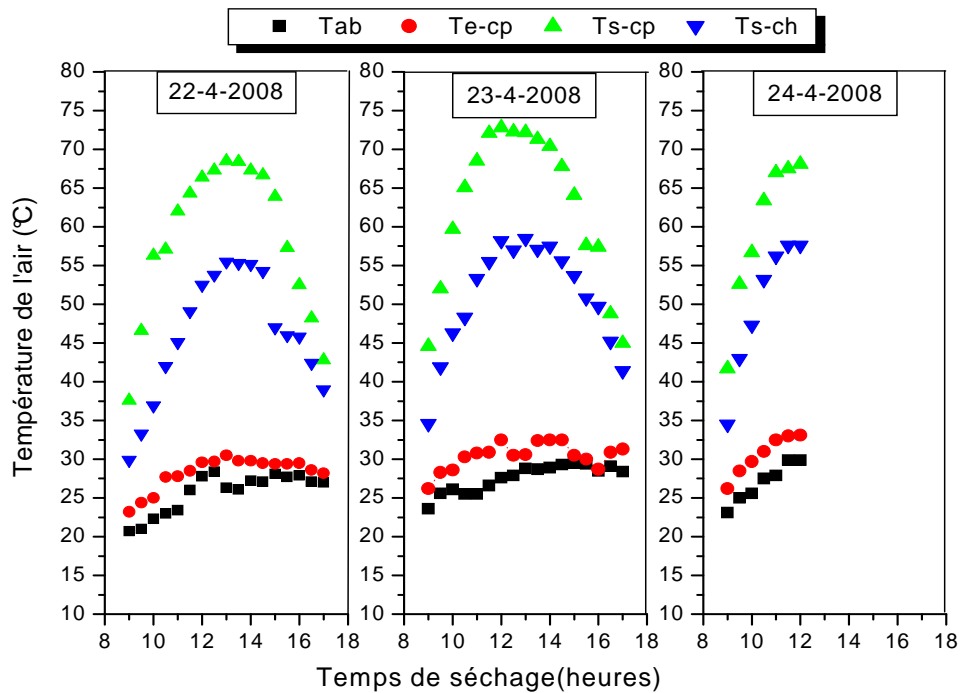
**Diagramme psychrométrique**

# 1. Résultats expérimentaux du séchage de la tomate dans le séchoir naturel

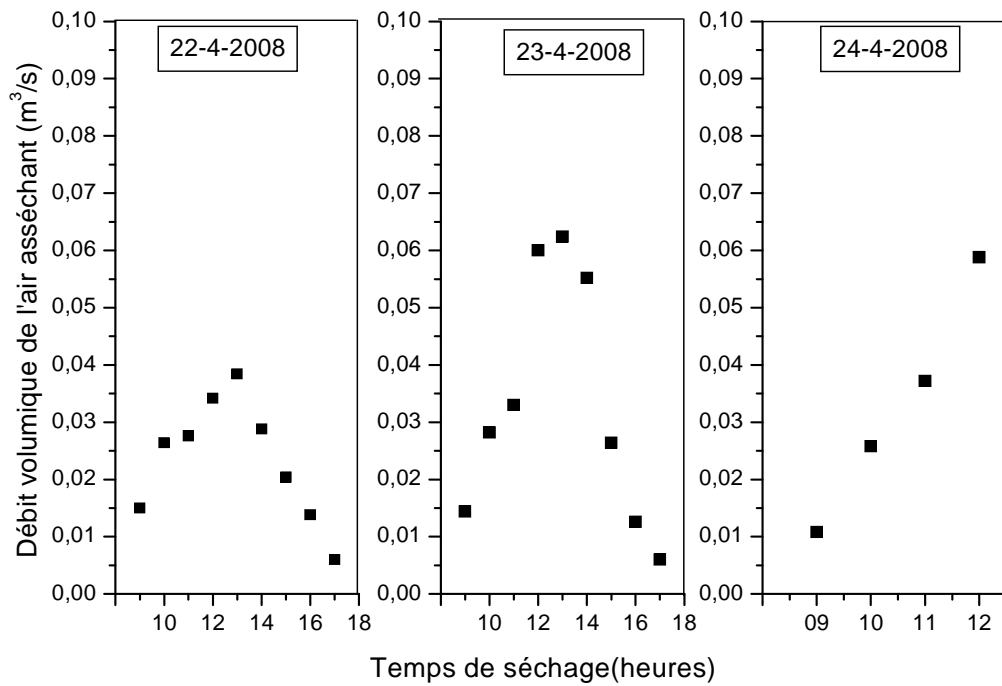
## 1.1. Deuxième expérience



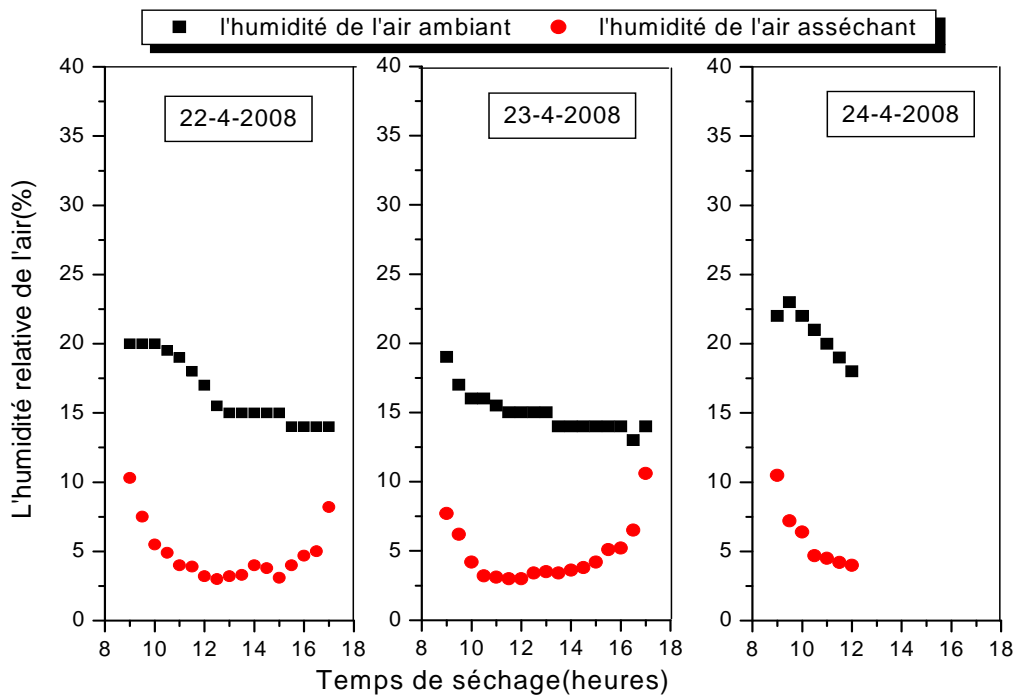
Variation du rayonnement global en fonction du temps



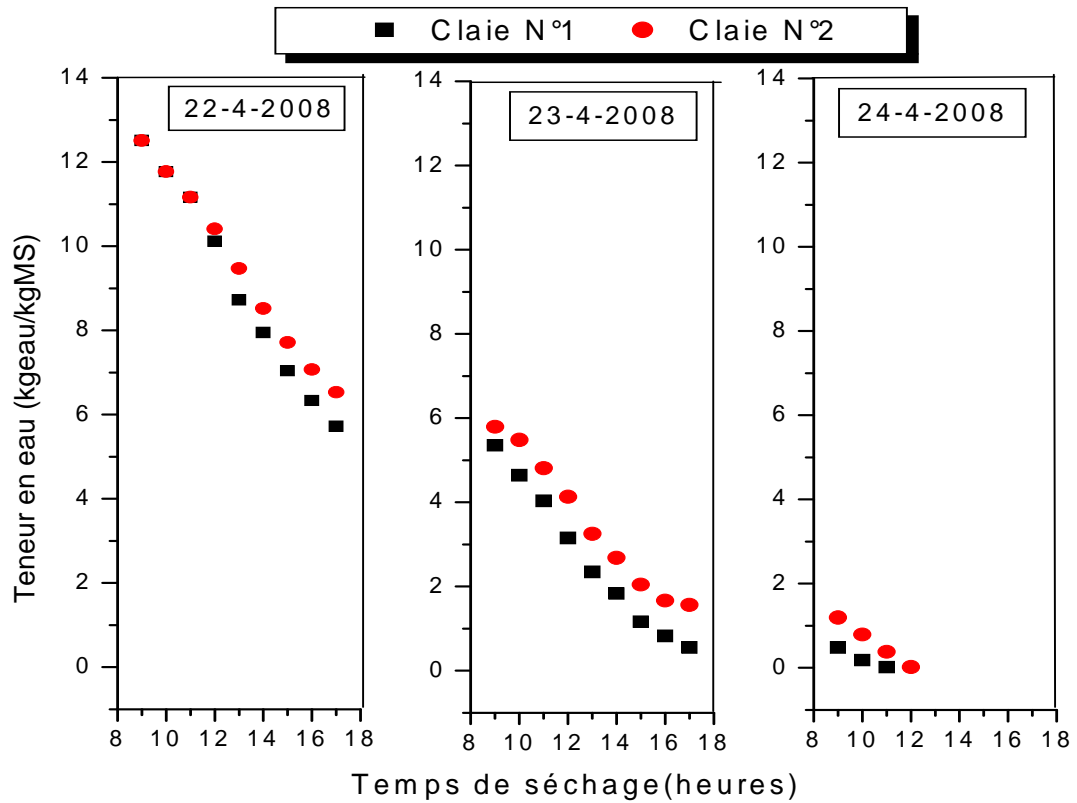
Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage  $M=4kg$



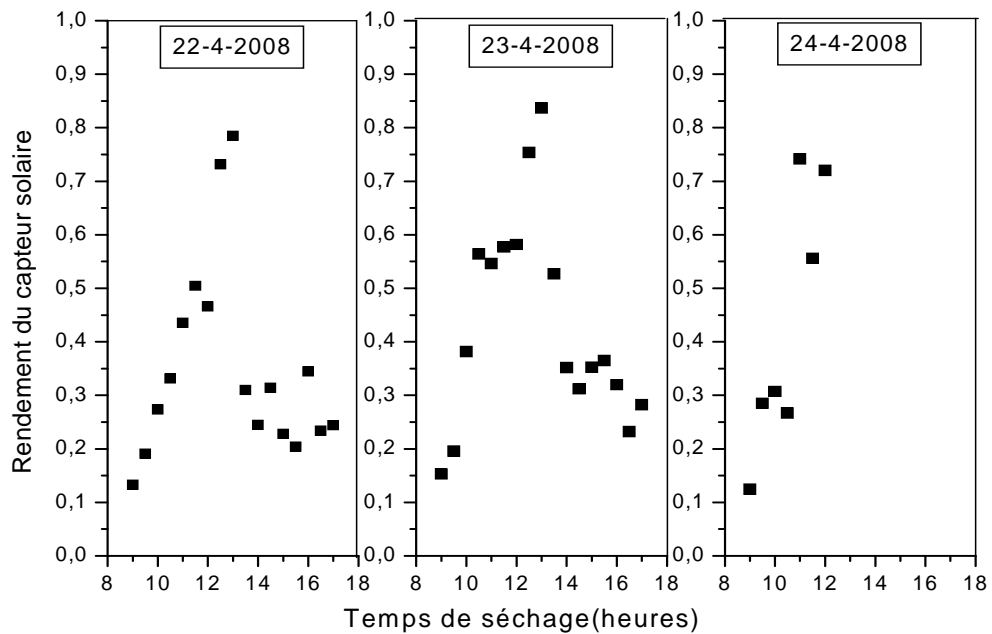
**Variation de débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage M=4kg**



**Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=4kg**

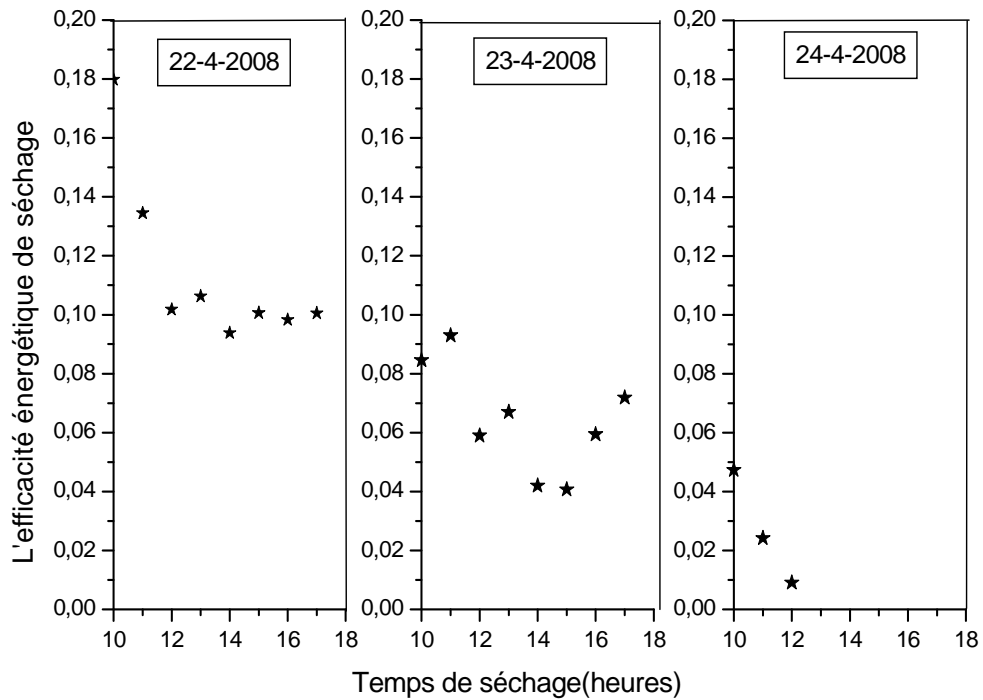


**Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage M=4kg**

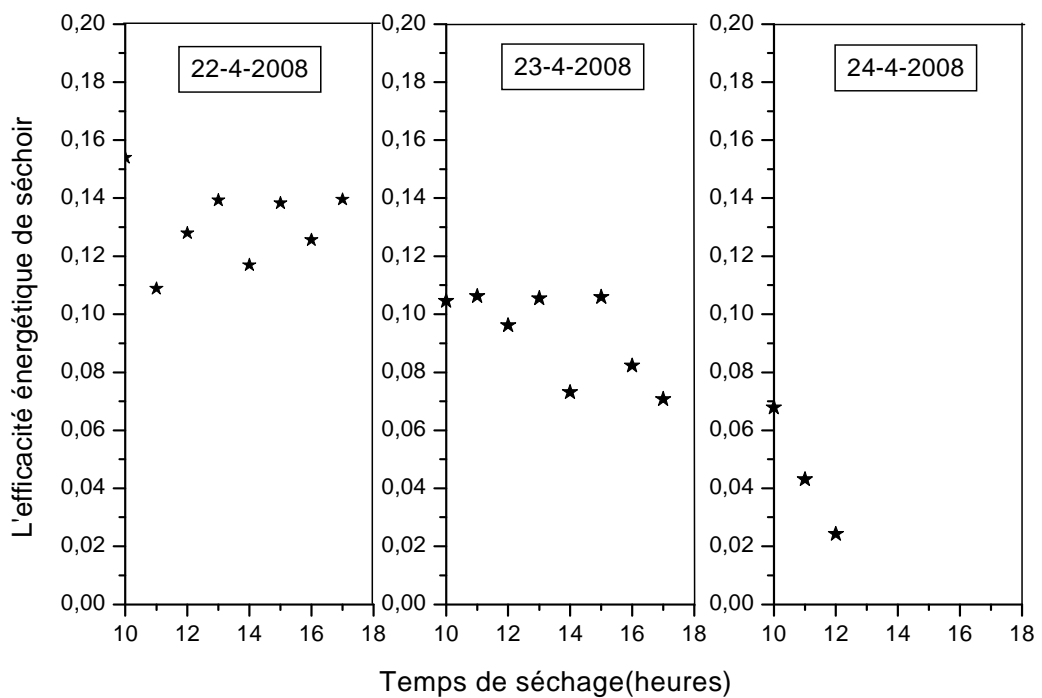


**Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps M=4kg**



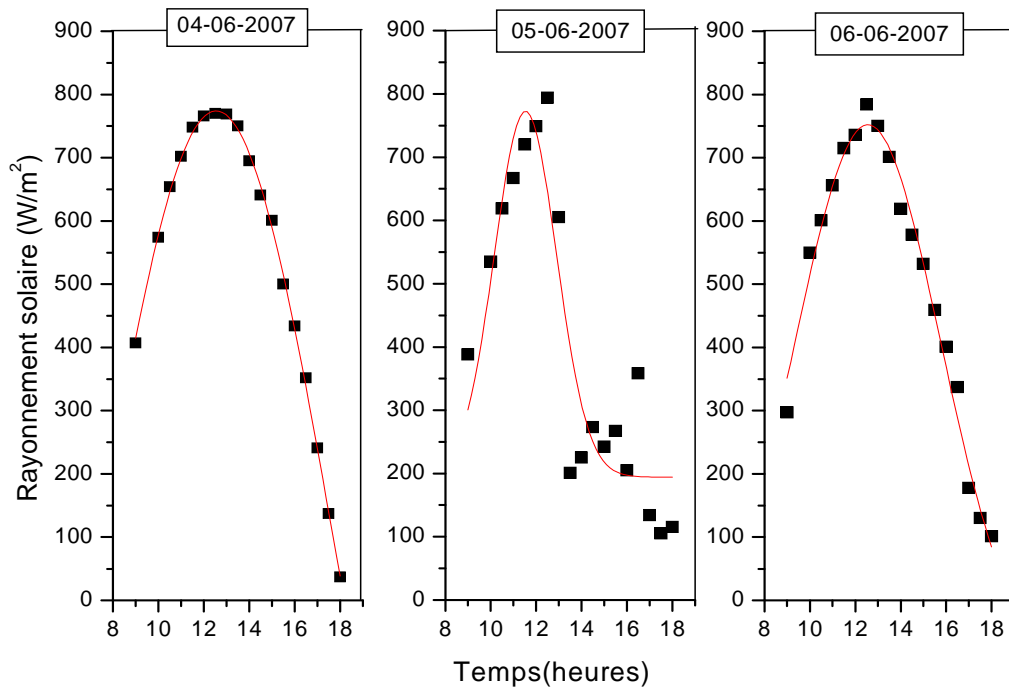


**Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps M=4kg**

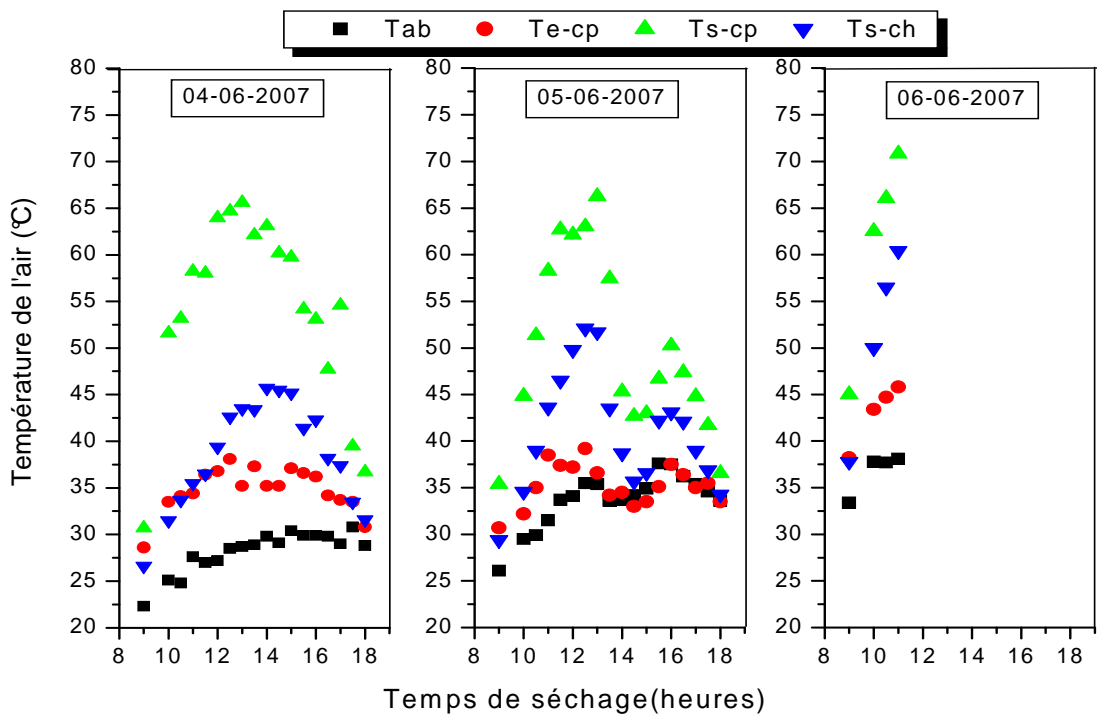


**Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage M=4kg**

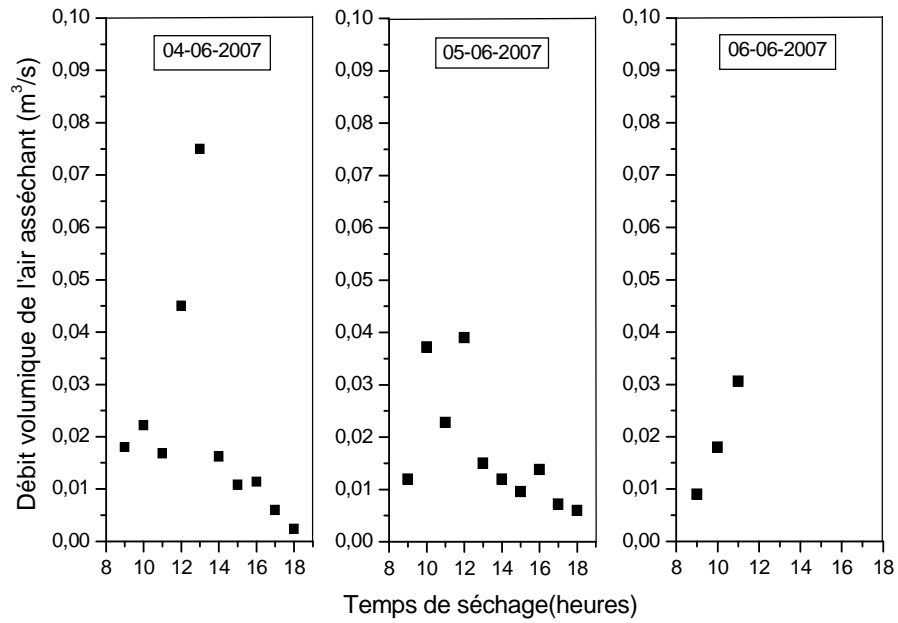
## 1.2. Troisième expérience



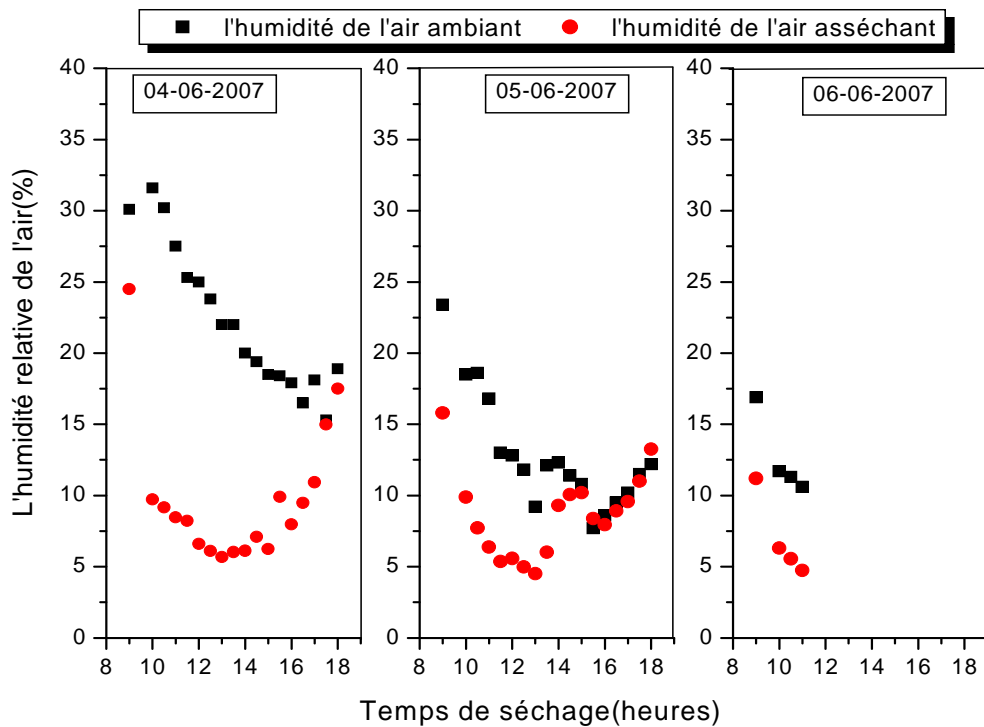
Variation du rayonnement global en fonction du temps



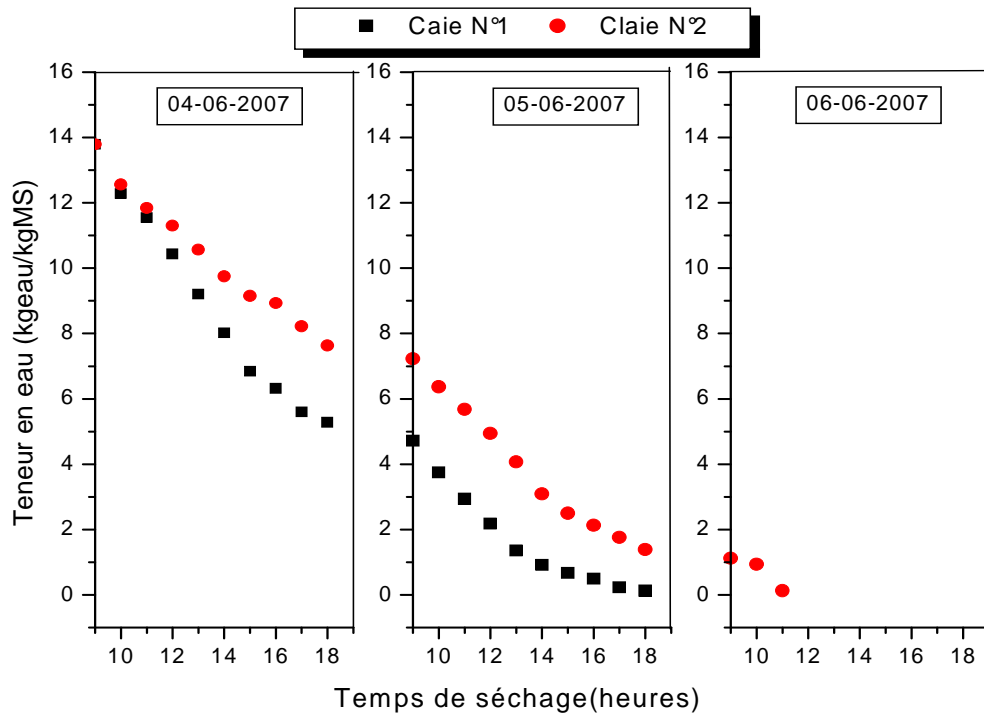
Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=6kg



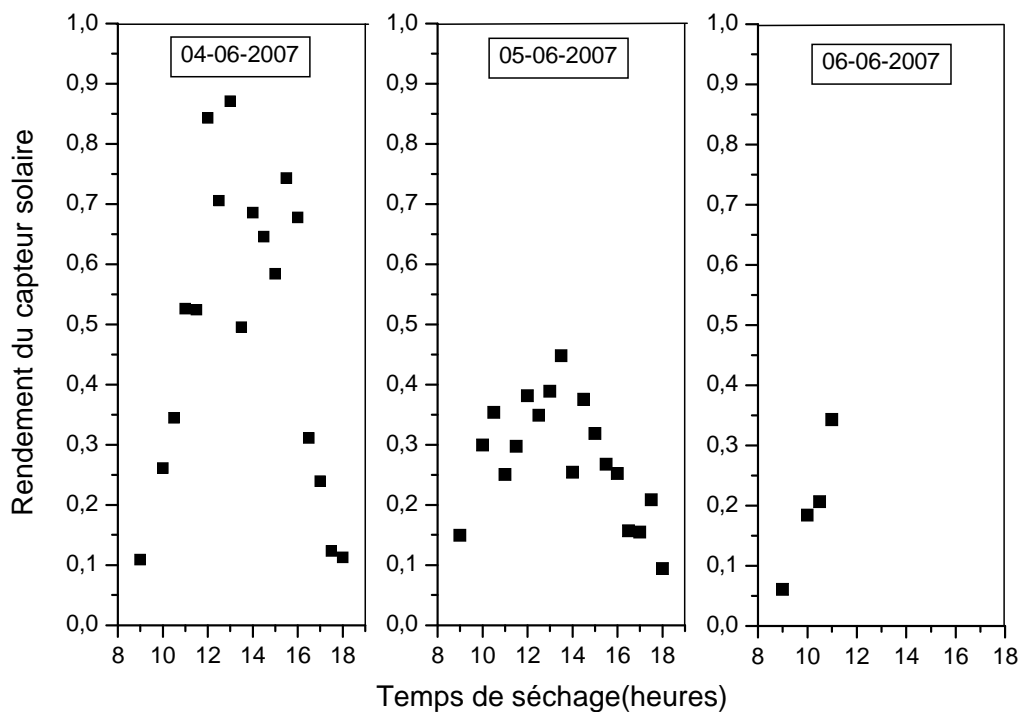
**Variation de débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage M=6kg**



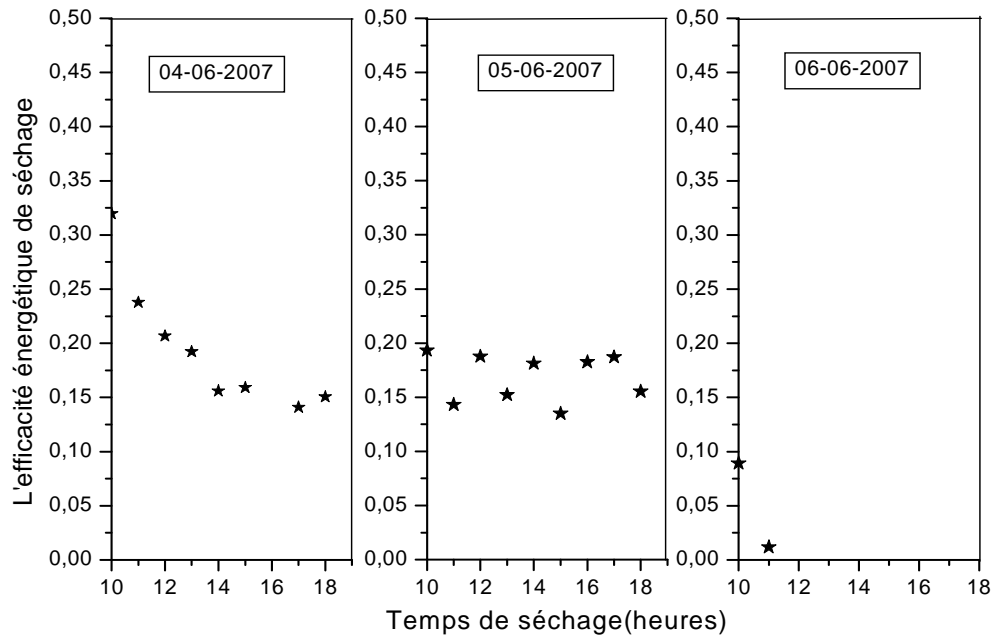
**Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage M=6kg**



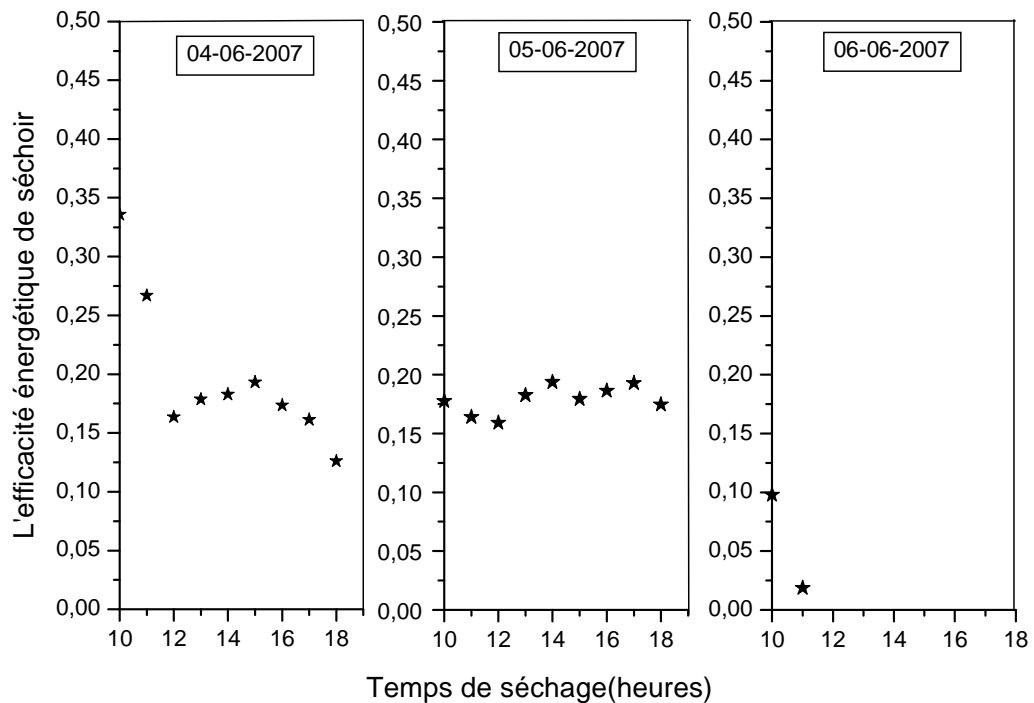
**Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage M=6kg**



**Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps M=6kg**



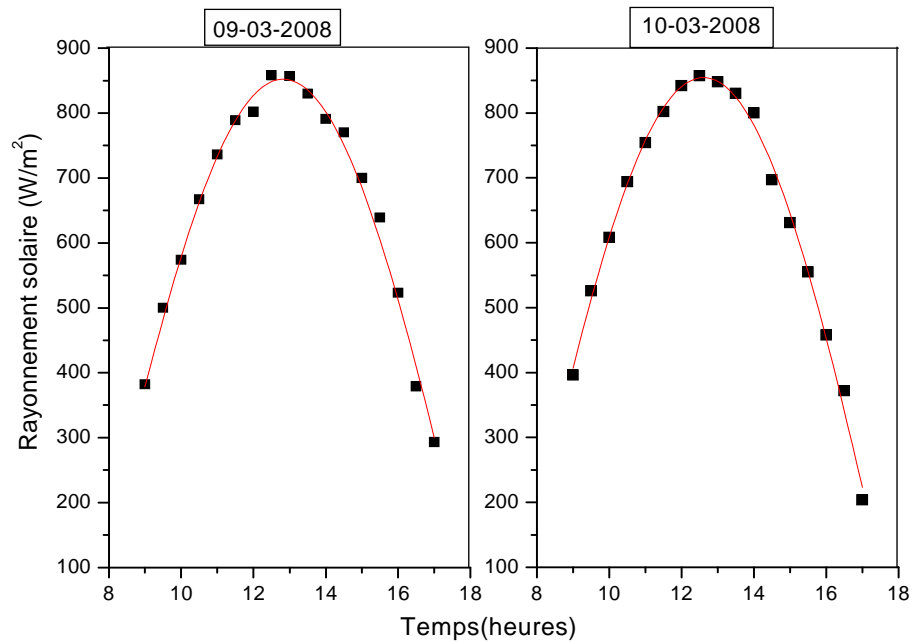
**Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps M=6kg**



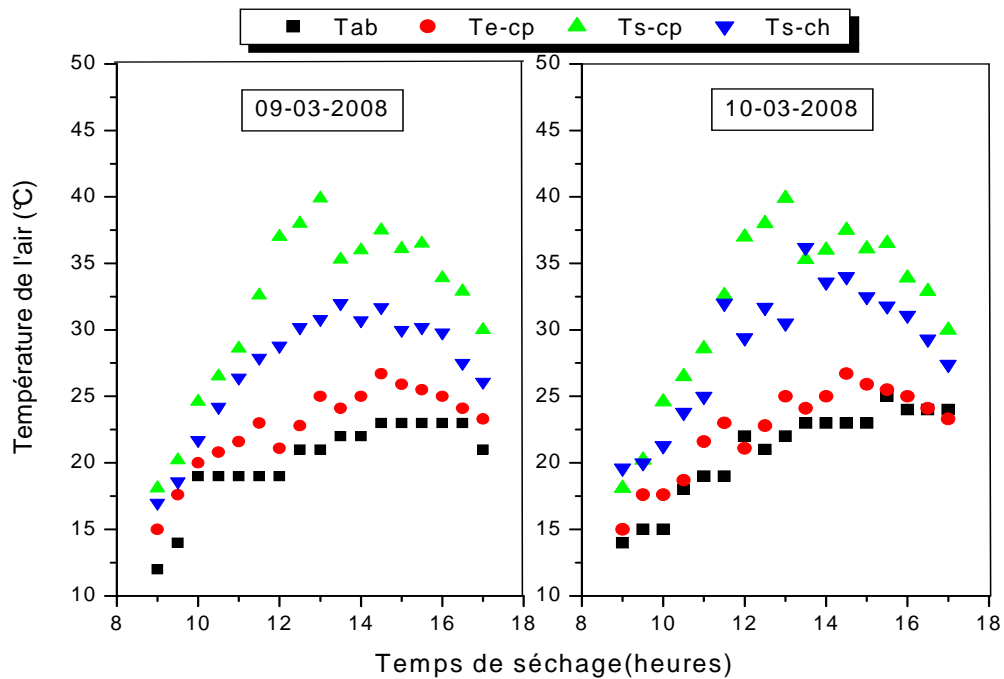
**Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage M=6kg**

## 2. Résultats expérimentaux du séchage de la tomate dans le séchoir forcé

### 2.1. Deuxième expérience

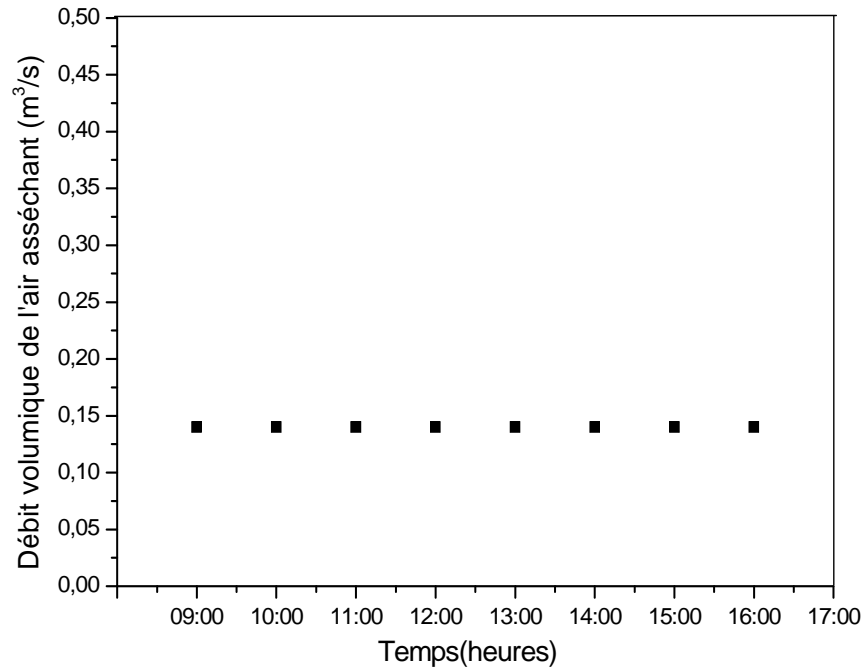


Variation du rayonnement global en fonction du temps



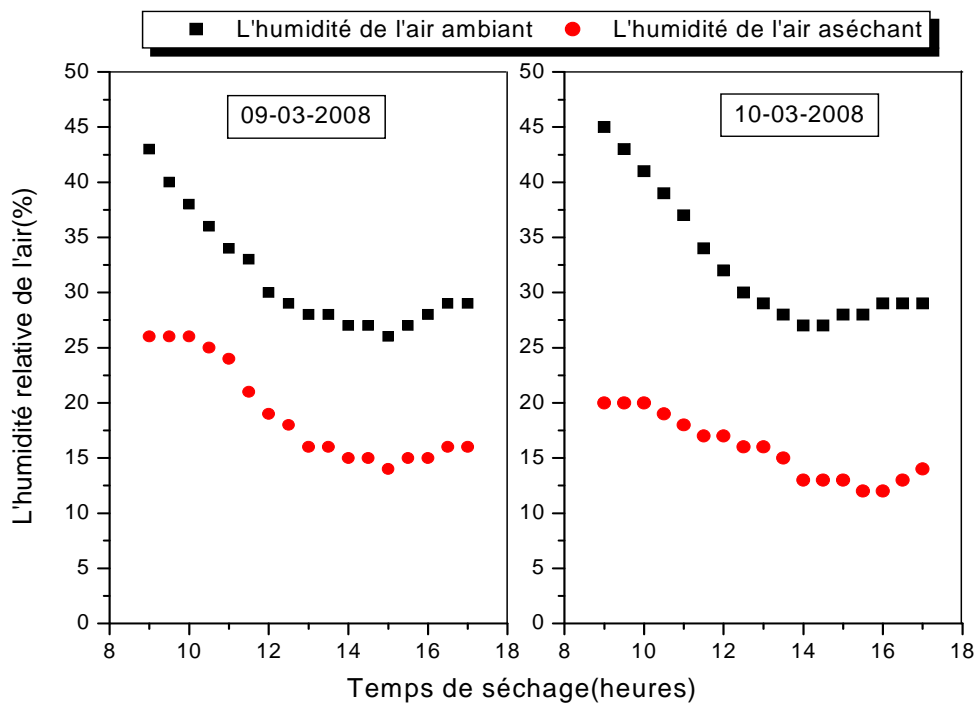
Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage

$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$



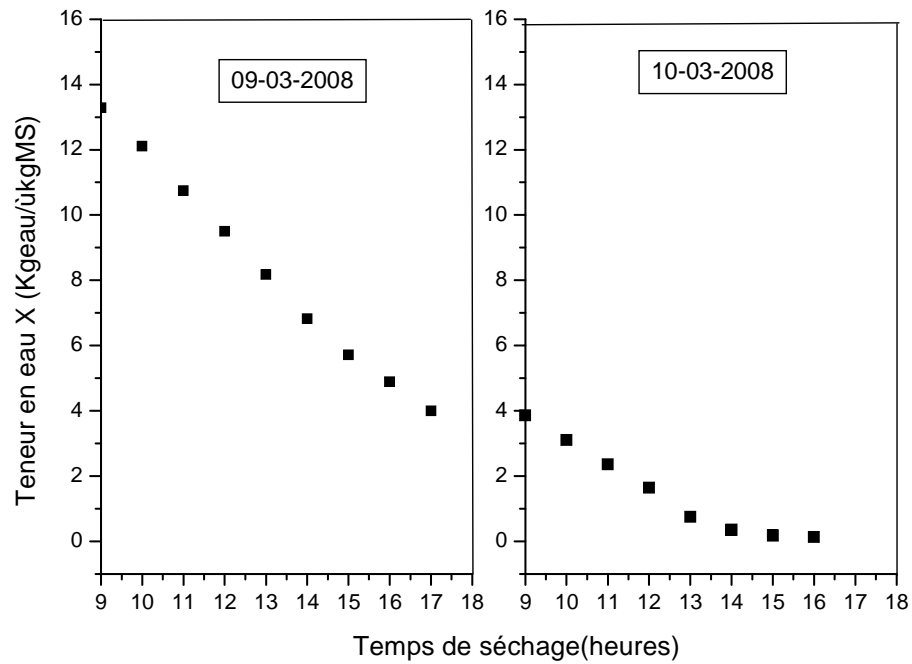
**Le débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage**

$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$



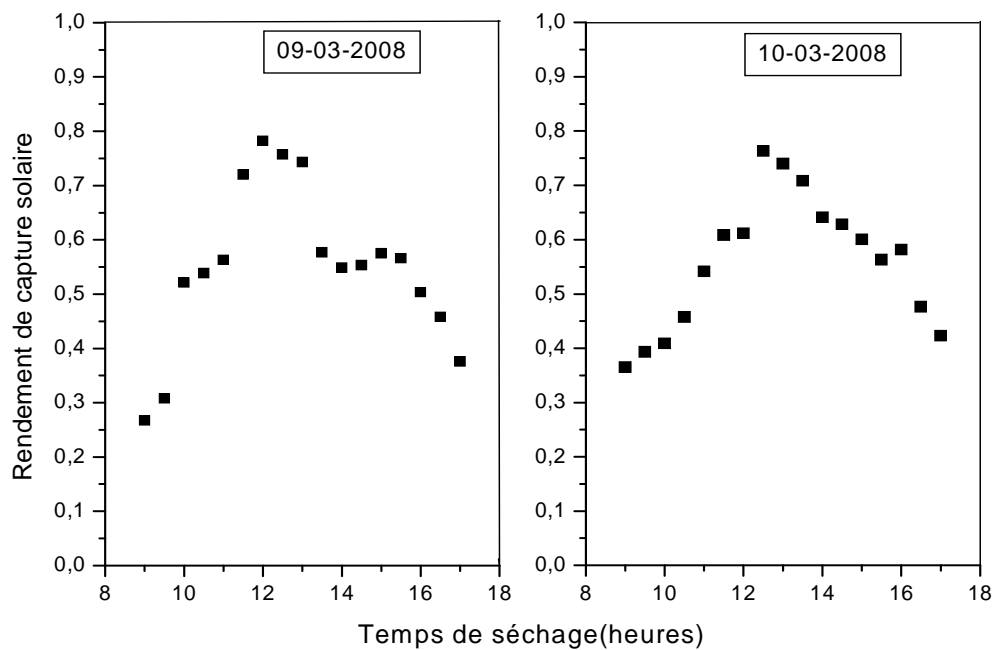
**Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage**

$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$



**Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage**

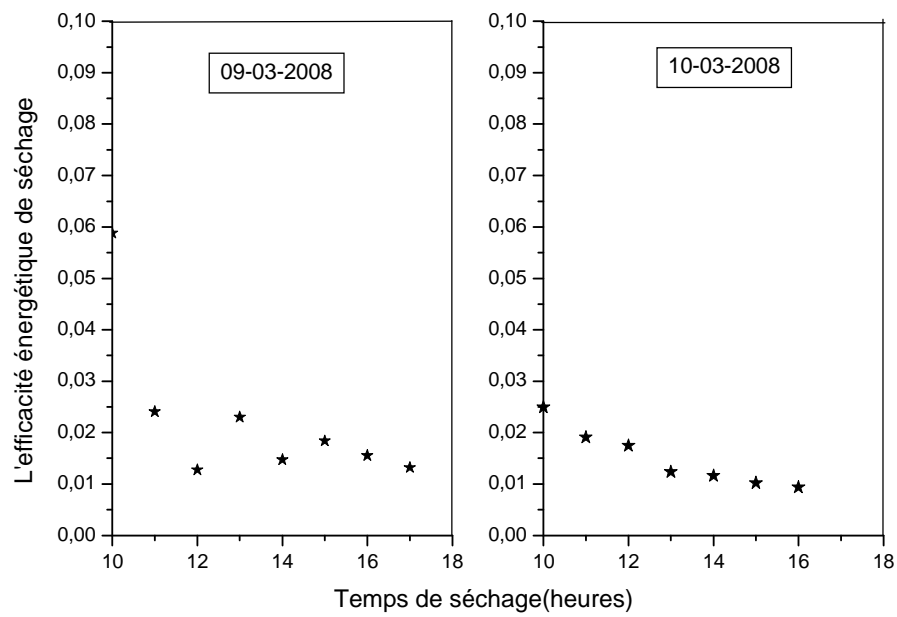
$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$



**Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps**

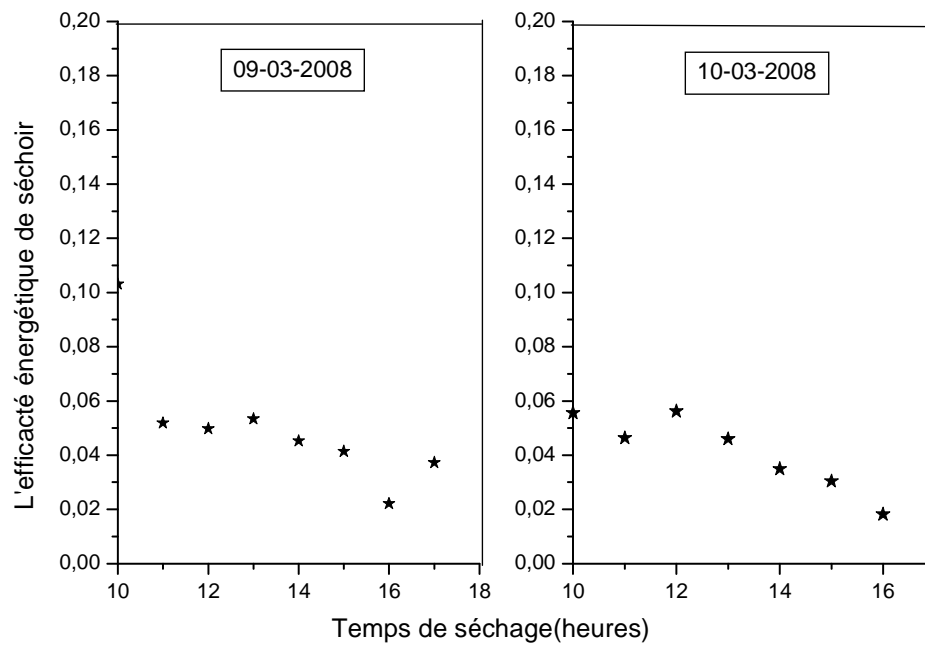
$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$





**Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps**

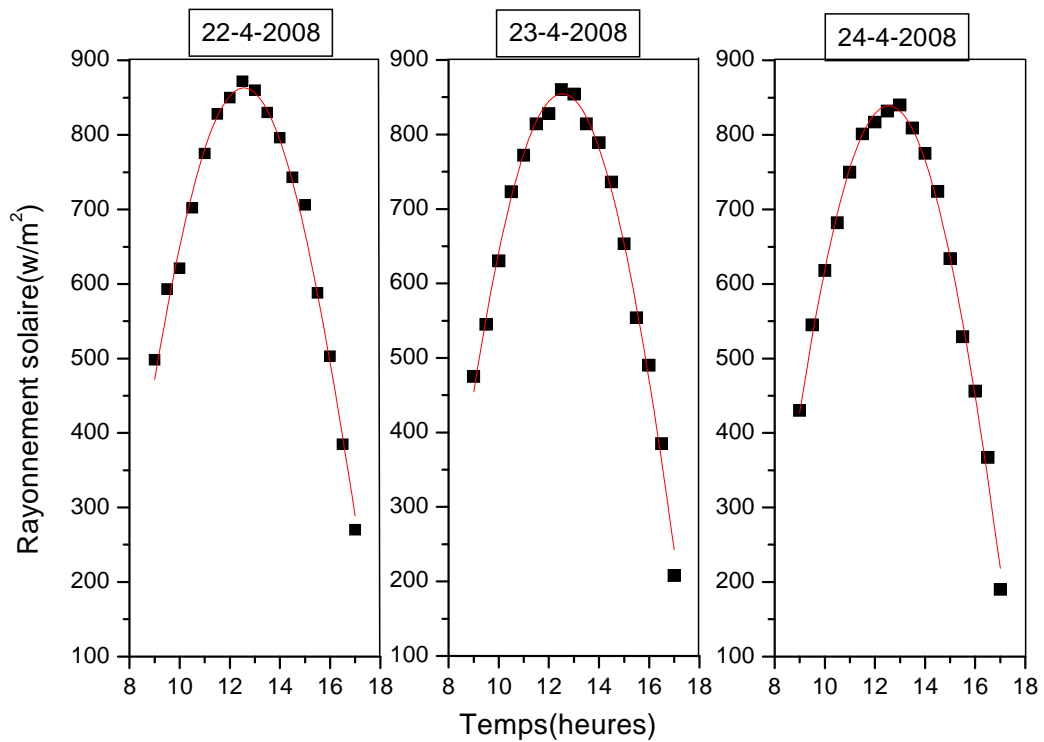
$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$



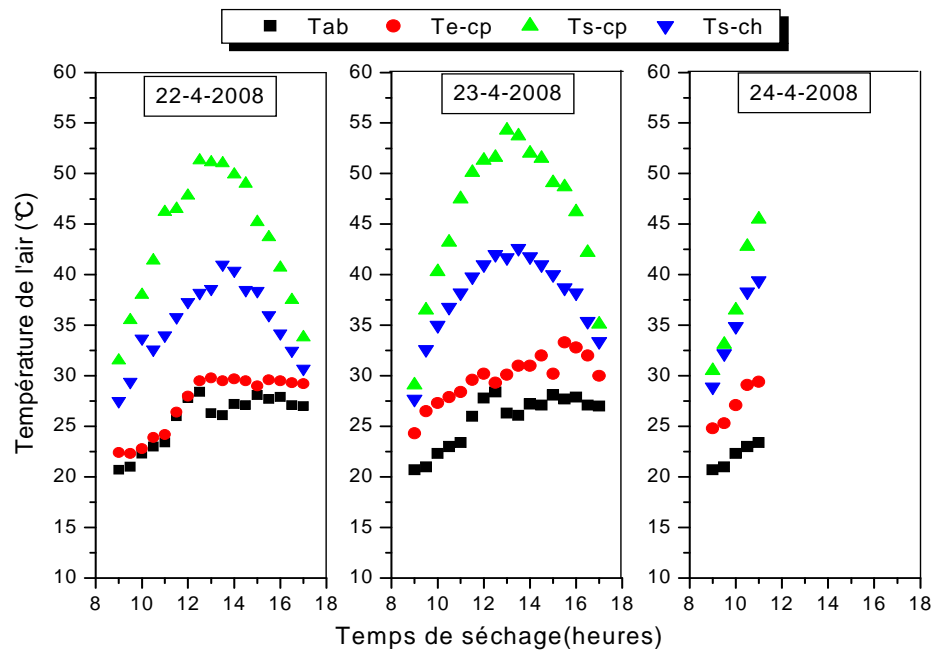
**Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage**

$$M=2\text{kg}, v_a=0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 2.2. Troisième expérience

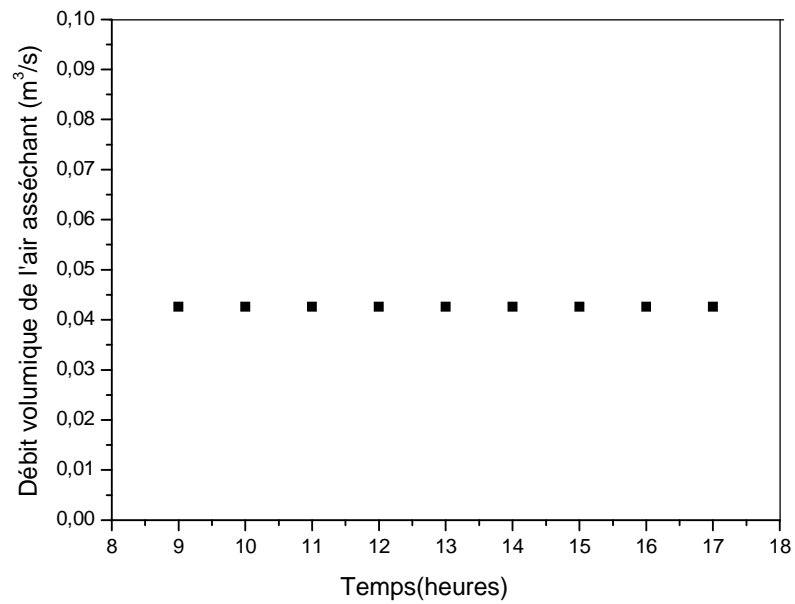


Variation du rayonnement global en fonction du temps



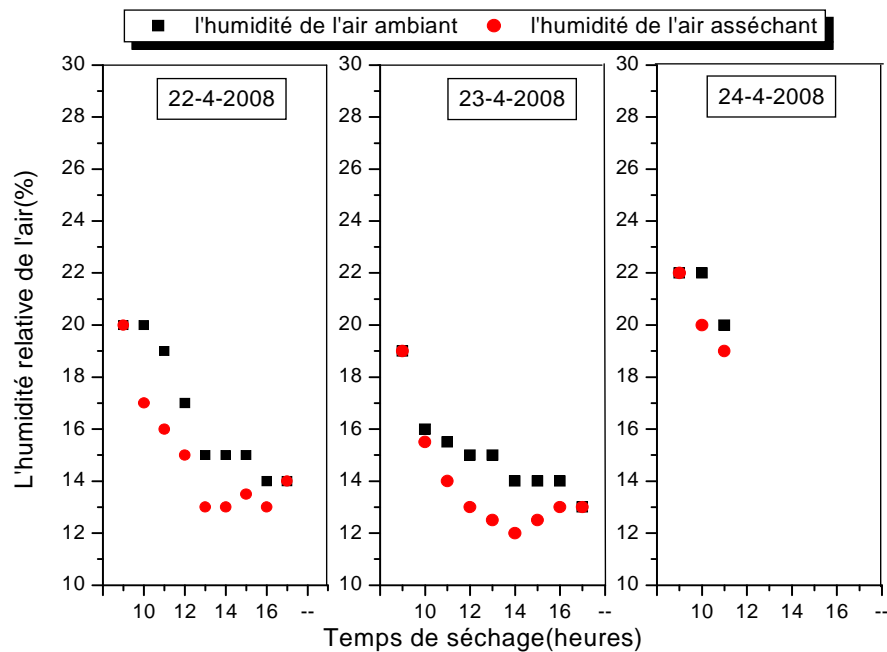
Evolution de la température de l'air asséchant en fonction du temps de séchage

$$M=2\text{kg}, v_a=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$$



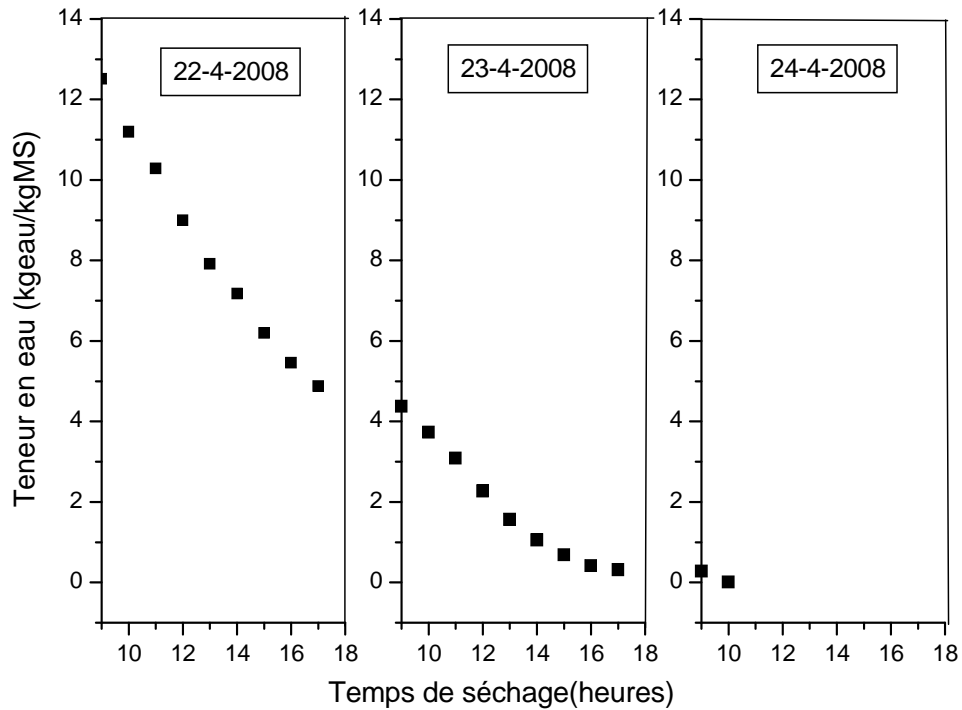
**Le débit volumique d'air asséchant en fonction du temps de séchage**

$$M=2kg, v_a=0,042 m^3/s$$



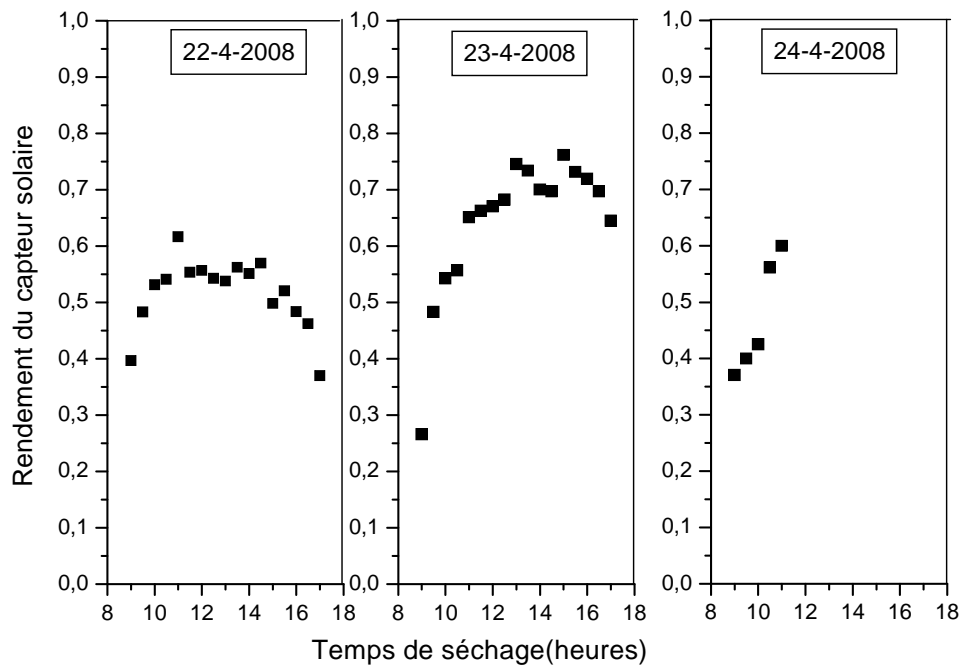
**Variation de l'humidité de l'air asséchant en fonction du temps de séchage**

$$M=2kg, v_a=0,042 m^3/s$$



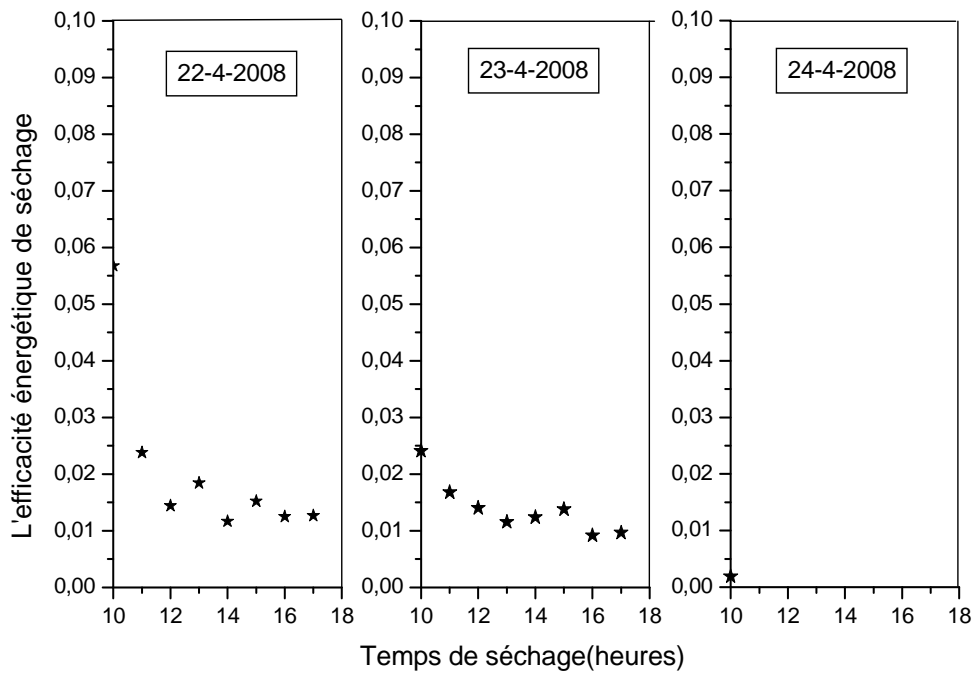
**Variation de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps de séchage**

$$M=2\text{kg}, v_a=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$$

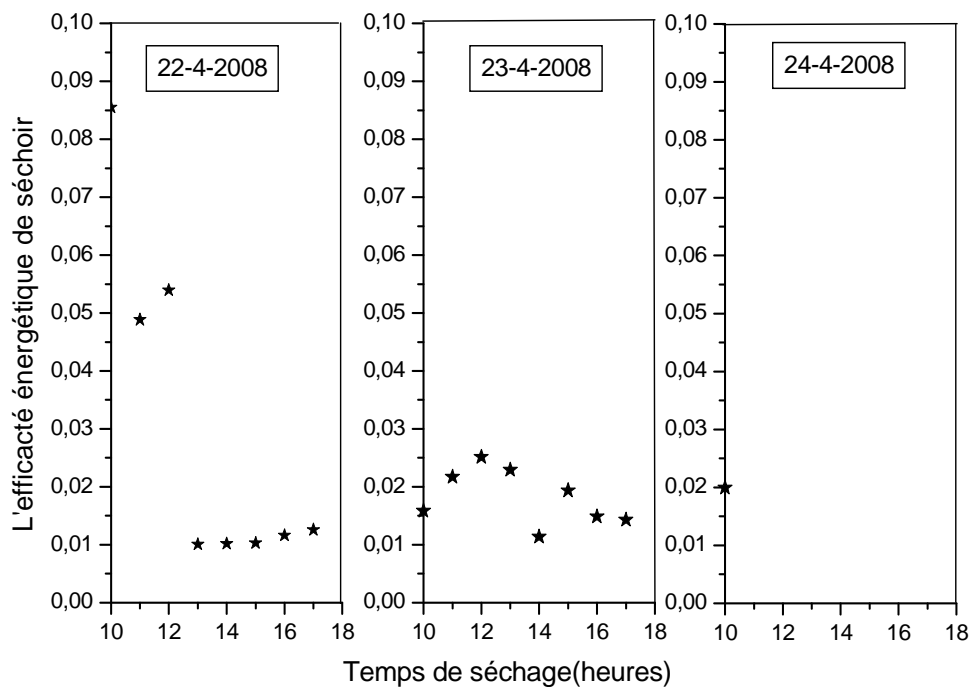


**Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du temps**

$$M=2\text{kg}, v_a=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$$



**Variation de l'efficacité énergétique maximale de séchage en fonction du temps de séchage  $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,042\text{ m}^3/\text{s}$**



**Variation de l'efficacité énergétique du séchoir en fonction du temps de séchage  $M=2\text{kg}$ ,  $v_a=0,042\text{ m}^3/\text{s}$**

## 1. Les dispositifs expérimentaux

### 1.1. Séchoir naturel



Le séchoir solaire naturel



Le capteur solaire



La chambre de séchage



Les clais de la chambre de séchage

## 1.2. Séchoir forcé



Le séchoir solaire forcé



Le capteur solaire

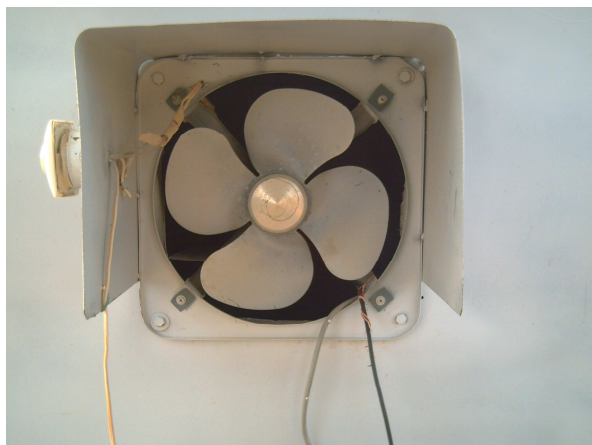




La chambre de séchage



Les clais de la chambre de séchage



Le ventilateur d'aspiration

## 2. Les instruments de mesures



Appareil d'affichage



Solarimètre



Appareil Testo 645



Analyseur d'humidité



Appareil Testo 445



Appareil Testo 425



Appareil KIMO de type LV 110



Balance

Mode de séchage (électrique solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect (forcé) Algérien	Oignon janne avec M=1034g  Hareng avec M=1470g	Pour l'oignon T=55°C V=31,3m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> V=70m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> X <sub>i</sub> =7,34kg eau/kgMS X <sub>f</sub> =0,04kg eau/kgMS  Pour l'hareng T=50°C V=31,3m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> V=70m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> X <sub>i</sub> =4kg eau/kgMS X <sub>f</sub> =0,35kg eau/kgMS	Pour l'oignon et pour V=31,3m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> t=12h Pour V=70m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> t= 8h  Pour l'hareng pour V=31,3m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> t=12h Pour V=70m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> t= 10h	Pour V=31,3m <sup>3</sup> /h. m <sup>2</sup> η <sub>c</sub> =32%  Pour V=70m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> η <sub>c</sub> =54%			"Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air, Application au séchage de l'Oignon et du Hareng" A. Ahmed- Zaid, A.Moulla, MS. Hantala, et J. Y. Desmons. Rev. Energ. Ren 4(2001)69-78

Mode de séchage (électrique solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage hybride (solaire et biomasse) Delhi in India	Zingiber officinale M=18kg Sliced into 8mm Curcuma longal M=15kg Sliced into 8mm Tinospora cordifolia M=15kg cut into 2,5 Cm pieces cut piece into two equal parts	Zingiber officinale X <sub>i</sub> =319,74% X <sub>f</sub> =11,8% Curcuma longal X <sub>i</sub> =257,45% X <sub>f</sub> =9,67% Tinospora cordifolia X <sub>i</sub> =358,36% X <sub>f</sub> =8,8% β= 28,5°	Zingiber officinale t= 33h Curcuma longal t= 36h Tinospora cordifolia t= 48h			Zingiber officinale η <sub>s</sub> =15,59% Curcuma longal η <sub>s</sub> =14,74% Tinospora cordifolia η <sub>s</sub> = 7,5%	"Experimental studies on drying of Zingiber officinale, Curcuma longa I. and Tinospora cordifolia in solar-biomass hybrid drier" Jaishree Prasad, V.K. Vijay, Renewable Energy 30 (2005) 2097–2109

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage $T$ , $V$ , $H_r$ de l'air, $X_i$ , $X_f$ du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect Séchage solaire direct (l'air libre) China	Greengages $M=60\text{kg}$	Séchage solaire indirect $T=32^\circ\text{C}$ à $50^\circ\text{C}$  Séchage solaire direct $T=17^\circ\text{C}$ à $25^\circ\text{C}$  $X_i=67\%$ $X_f=31,25\%$  $\beta=30^\circ$	Séchage solaire indirect $t=15\text{jours}$  Séchage solaire direct $t=48\text{jours}$			$\eta_{S\text{max}}=18,6\%$ $\eta_{S\text{min}}=5,4\%$	"Experimental investigation on solar drying of salted greengages" Li. Zhimin, H. Zhong, T. Runsheng, T. Liu, G. Wenfeng, Y. Zhang Renewable Energy (1-11), 2005



Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>r</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect (forcé)	Hay M=14,42.10 <sup>3</sup> kg	T= 40°C à 45°C X <sub>a</sub> = 0,0141kg eau/kg air sec	7jours et 8 heures				Medium scale solar crop dryers for agricultural products" O.St C.Headley and William Hinds the technical design of Barbados solar dryer, University of the west Indies, 1973

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect en convection naturelle Algérie	Menthe M=200g  Piment M= 300g  Raisin M=500g  Laurier M=300g  Verveine M=300g	T=30°C à 80°C	Menthe t=30h  Piment t= 2430h  Raisin t=318h  Laurier t=28h  Verveine t=30h			$\eta_s = 40\%$	"Etude expérimentale d'un séchoir solaire" R. Miri, O. Mokrani, F. Saïd et M. Belhamel Rev Energ Ren Zones Arides (2002)41-48

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Comparaison avec les model théorique	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire direct (convection naturel) Ankara	Tomate Coupe en 2 M=4,5kg	T= 22,4°C à 35,6°C H <sub>r</sub> = 14,5% à 50,9% X <sub>i</sub> =93,35% X <sub>f</sub> =11,5%	Séchage solaire direct 4jours	Comparer avec Approximation of diffusion				Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato K. Sqcilik, R. Keskim, A. Konuralp Elicin Journal of food Engineering 73(2006)231-238

Mode de séchage (électriques olaire...) et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect	Chilli peppers M=0,3062kg Halve	T=53,2°C à 58,4°C V=0,042, 0,055, 0,07kg/m <sup>2</sup> s H=27% à 90%	Between 2 and 5days	V=0,042kg/m <sup>2</sup> s η <sub>c</sub> =18% à 78%	V=0,042kg/m <sup>2</sup> s η <sub>p</sub> =28% à 90%		"Investigation of the thermal efficiencies of a solar dryer", C. Tiris, M. Tiris, and I. Dincer Energy Convers. Mgmt Vol. 36, No. 3, pp. 205-212, 1995.
Turkey	Green beans M=0,7034kg Slice		V=0,055kg/m <sup>2</sup> s η <sub>c</sub> =38% à 79%	V=0,055kg/m <sup>2</sup> s η <sub>p</sub> =7% à 87%			
	Sweet peppers M=0,506kg Halve	β=30°	V=0,07kg/m <sup>2</sup> s η <sub>c</sub> =60% à 80%	V=0,07kg/m <sup>2</sup> s η <sub>p</sub> =20% à 89%			
	Sultana grapes M=0,606kg Halve						

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage $T$ , $V$ , $H_r$ de l'air, $X_i$ , $X_f$ du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect à convection forcé India	Green peas $M=20\text{kg}$	$V=0,03$ , $0,02$ , $0,01\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ $X_i=80\%$ $X_f=5\%$ $\beta=30^\circ$	$V=0,03\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ $t=14\text{h}$ $V=0,02\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ $t=18\text{h}$ $V=0,01\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ $t=21\text{h}$		$\eta_p=20\%$ à $63\%$		"Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer" V. Shanmugama,, E. Natarajan Renewable Energy 31 (1239–1251) India, 2006.

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire indirect à convection forcé  India	Green peas and pineapple slices M=20kg	V=0,03-0,01kg/m <sup>2</sup> s X <sub>i</sub> =80% X <sub>f</sub> =5%  β=30°	With reflective mirror Green peas t= 19h pineapple t= 28h  Without reflective mirror Green peas t= 21h pineapple t= 32h		Green peas between η <sub>p</sub> =15% à 45% pineapple slices between η <sub>p</sub> =52% à 62%	between η <sub>s</sub> =43% and 55%	"Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without erective mirror", V. Shanmugam a, E. Natarajan Applied Thermal Engineering 27, 1543–1551, Anna University India , 2007.

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage hybride à convection naturel (solar and biomass) Australia	pineapple slices M=20-22kg	X <sub>i</sub> =559% X <sub>f</sub> =11% β=28°	t=3,5 days			solar η <sub>s</sub> =22% and biomass η <sub>s</sub> = 6%  solar- biomass η <sub>s</sub> = 9%	"Natural convection solar dryer with Biomass back-up heater", BENON BENA and R. J. FULLER Solar Energy Vol. 72, No. 1, pp. 75–83, Australia, 2002.

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage $T$ , $V$ , $H_r$ de l'air, $X_i$ , $X_f$ du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage hybride à convection naturel (solar-biomass)	pineapple slices $M=20\text{kg}$	$T=40^\circ\text{C}$ $H=80\%$ $V=0,017$ to $0,036\text{ m}^3/\text{s}$ $X_i=85\%$ $X_f=10\%$  $\beta=16^\circ$	$t=4$ days			solar $\eta_s=15-20\%$ and biomass $\eta_s=11-15\%$  solar-biomass $\eta_s=17-13\%$	"Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater" A. Madhlopa a, G. Ngwalo b Solar Energy 81 (449–462), Malawi, 2007.



Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire mixte  Ghana	Cassava M=50kg	T=45°C H=80% V=0,024 m <sup>3</sup> /s  X <sub>i</sub> =70% X <sub>f</sub> =14%  β=15°	t=72h	η <sub>c</sub> =21%			"Dehydration of food corps using a solar drying with convective heat flow" A. Ayensu Solar Energy Vol. 59, Nos. 4-6, pp 121-126, Ghana, 1997.

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage $T$ , $V$ , $H$ , de l'air, $X_i$ , $X_f$ du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire à convection forcé Iraq	<p>Grapes <math>M=10\text{kg}</math></p> <p>Apricots <math>M=10\text{kg}</math></p> <p>Beans</p>	<p><math>T=60</math> to <math>65^\circ\text{C}</math></p> <p><math>H=10\text{-}80\%</math></p> <p><math>V=0,07655</math>,</p> <p><math>0,063</math>, <math>0,046</math></p> <p><math>\text{m}^3/\text{s}</math></p> <p>Grapes <math>X_i=80\%</math> <math>X_f=18\%</math></p> <p>Apricots <math>X_i=80\%</math> <math>X_f=13\%</math></p> <p>Beans <math>X_i=65\%</math> <math>X_f=18\%</math></p>	<p>Grapes <math>t=2,5</math> days</p> <p>Apricots <math>t=1,5</math> days</p> <p>Beans <math>t=1</math> days</p>		<p>Grapes <math>\eta_p=20\%</math></p> <p>Apricots <math>\eta_p=33\%</math></p>		<p>"Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq", Khalil E.J. Al-Juamily, Abdul Jabbar N. Khalifa, Tadahmun A. Yassen, Energy Conversion and Management, Desalination 209 (163–170) Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq, 2007.</p>

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage $T$ , $V$ , $H_r$ de l'air, $X_i$ , $X_f$ du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Comparaison avec les model théorique	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage électrique	Okra $M=100g$	$T=50^{\circ}C$ $T=60^{\circ}C$ $T=70^{\circ}C$ $V=1m/s$ $H_r=25\%$ $H_r=15\%$ $H_r=8\%$ $X_i=89,53\%$ $X_f=15\%$	$T=50^{\circ}C$ $t=15,5h$ $T=60^{\circ}C$ $t=10,5h$ $T=70^{\circ}C$ $t=8h$	The simple exponential model and the Page modele			Drying characteristics and kinetics of Okra Ibrahim Doymaz, journal of food Engineering 69(2005) 275-279

Mode de séchage (électrique, solaire...), et lieu de séchage	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Comparaison avec les model théorique	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage électrique  Turkey	Olive M=4,48kg	T=40°C T=50°C T=60°C T=70°C  V=1m/s  H <sub>r</sub> =15%				T=40°C, V=0,01kg/s η <sub>s</sub> =68,65%  T=70°C, V=0,015kg/s η <sub>s</sub> =91,79%	"Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer", N. Coalk, A. Hepbasli, journal of food Engineering 80(2007)1188-1193

Mode de séchage (électriques (olaire...) et lieu de séchage)	Nature du produit et forme de la coupe, et la quantité de produit à sécher	Paramètre de séchage T, V, H <sub>r</sub> de l'air, X <sub>i</sub> , X <sub>f</sub> du produit et l'inclinaison du capteur	Temps de séchage	Rendement du capteur	Efficacité énergétique de séchage	Efficacité énergétique de séchoir	référence
Séchage solaire direct à convection naturel Yamousoukro	Cassava Sweet banana Plantain banana Mango	T=39°C à 59°C V=0,1 à 0,456 kg/m <sup>2</sup> s Cassava X <sub>i</sub> =64,278% X <sub>f</sub> =13% Sweet banana X <sub>i</sub> =63,834% X <sub>f</sub> =13% Plantain banana X <sub>i</sub> =60,841% X <sub>f</sub> =13% Mango X <sub>i</sub> =93,563% X <sub>f</sub> =13% β=7°	Cassava t=19h Sweet banana t=22h Plantain banana t=26h Mango t=27h			V=0,456kg/m <sup>2</sup> s η <sub>p</sub> =42% V=0,10kg/m <sup>2</sup> s η <sub>p</sub> =13,65%	"Experimental investigation of solar dryer with natural convective heat flow", P. Gbaha, H. Yobout Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua, S. Touré Renewable Energy 32(2007) 1817-1829.