

N° d'ordre :
N° de série :

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Présenté par : ROUABEH Youcef & BEN ZAMIT Abd Ellah

Thème

**Analyses énergétique et exergetique
du séchage solaire des fruits**

Soutenu publiquement

Le : 11 /06/2018

Devant le jury :

M. DERGHOUT Zoheir
M. KOURAS Sid Ali
M. KHAMA Réda

Maître Assistant A
Maître Assistant A
Maître de Conférences A

Président
Examineur
Rapporteur

Année universitaire : 2017 / 2018

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, pour le courage et la force qu'il nous a donné pour effectuer ce travail. Au moment d'achever ce travail modeste, nous remercions profondément le directeur de ce travail, notre enseignant :

Dr. Réda KHAMA

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à la poursuite de ce travail, en particulier les membres de Jury :

Mr. Zouheir DERGHOUT

&

Mr. Sid Ali KOURAS

Enfin, nous remercions tous ceux et toutes celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.

Nous remercions tous les étudiants et toutes les étudiantes de Master en Génie Mécanique. Nous remercions vivement nos parents pour leurs aides et leurs contributions à l'aboutissement de nos études et en témoignage de reconnaissance.

Dédicaces

A nos chers parents :

nos mères.

& nos pères qui sont nos modèles.

Que Dieu leur donne

longue vie et bonne santé.

A nos frères

A nos sœurs

A nos oncles et nos tantes

A tous nos amis d'enfance &

du parcours scolaire et universitaire,

*A tous nos enseignants depuis l'école
primaire jusqu'à l'université, surtout :*

Dr. Réda Khama.

A tous ceux qui ont cru en nous :

Nous dédions ce modeste mémoire

Youcef et Abd'Ellah

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Introduction générale	1
Chapitre I : Étude bibliographique	
I. 1 Le séchage	3
I.2. Les dispositifs solaire	3
I.2.1. Séchoirs naturels	3
I.2.2. Séchoirs solaires à chauffage direct (Séchoirs solaires directs)	3
I.2.3. Séchoirs solaires à chauffage indirect (Séchoirs solaires indirects)	4
1.3. L'Énergie	5
1.4. L'Exergie	5
I.5. Quelques travaux sur le séchage à l'université d'Ouargla	6
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Introduction	8
II.2. La matière première	8
II.3. Le séchoir solaire indirect	9
II.4. Mesures	10
II.4.1. Mesure de la teneur en eau initiale	10
II.4.2. Mesure de la vitesse de l'air asséchant	10
II.4.3. Mesure de la masse humide	11
II.4.4. Mesure des températures	11
II.4.5. Mesure de l'humidité et de la température ambiante	11
II.4.6. Mesure de la température des deux fruits	12
II.4.7. Station météo avec acquisition	12
II.5. Analyses énergétique	13
II.5.1. Analyse énergétique au niveau du capteur solaire	13
II.5.2. Analyse énergétique au niveau de la chambre de séchage	14
II.5.3. Rendement énergétique total du séchoir solaire	15
II.6. Analyse exergétique	15
II.6.1. Analyse exergétique au niveau du capteur solaire	15
II.6.2. Analyse exergétique au niveau de la chambre de séchage	16
II.6.3. Rendement exergétique total du séchoir solaire	16
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1. Introduction	18
III.2. Évolution des paramètres extérieurs	18
III.3. Variation des températures dans le séchoir solaire	20
III.4. Variation des humidités dans le séchoir solaire	23
III.4.1. Humidités de l'air	23

III.4.2.Humidité du produit	25
III.5.Analyse énergétique	26
III.6.Analyse exégétique	29
Conclusion général	31
Références Bibliographiques	32

Résumé

Ce travail est une étude expérimentale portant sur le séchage solaire indirect de deux fruits : la fraise et la tomate, réalisée dans un séchoir solaire indirect avec une analyse énergétique et une analyse exergetique qui sont l'objectif principal de cette étude. C'est d'une part, le calcul de la quantité d'énergie nécessaire au séchage et la détermination des différents rendements énergétiques (analyse énergétique), et le calcul exergetique à chaque étape du processus et la détermination des différents rendements exergetiques (analyse exergetique), de l'autre part, et ce pour l'amélioration de la performance du séchoir et afin d'obtenir la conception la plus efficace.

Mots clés : Séchage solaire indirect - Énergie - Exergie - Rendement - Fraise - Tomate.

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
\dot{m}	Débit massique	(Kg/s)
A	Surface du capteur	(m ²)
V	Vitesse	(m/S)
Q_v	Débit volumique	(m ³ /s)
\dot{Q}	Quantité d'énergie	(W)
S	Section	(m ²)
T	Température	(K)
t	Temps	(s)
h	enthalpie	(kJ/kg)
P_{vsat}	Pression	(Pa)
C_p	Chaleur spécifique	(J/kg .K)
W	Humidité absolue	[kg/kg air sec]
EX	Exergie	(W)
Ray	Rayonnement	(W/m ²)
Lettres grecques		
Φ		
η	Humidité relative	(%)
ρ	Rendement	(%)
	Masse volumique	(kg/m ³)
Indices		
e		
s	entrée	
c	sortie	
moy	capteur	
avant	moyenne	
après	avant la claie	
	après la claie	

Introduction générale

Les concepts d'énergie et d'exergie proviennent de la thermodynamique et sont applicables à tous les domaines de l'ingénierie. L'exergie peut jouer, en particulier, un rôle important dans l'obtention d'une utilisation d'énergie plus efficace, respectueuse de l'environnement, durable et économique dans les systèmes de séchage. Cependant, le séchage est largement utilisé dans une variété d'applications thermiques telles que le séchage des aliments ; une telle industrie utilise de grandes quantités d'énergie, ce qui en fait l'une des opérations industrielles les plus gourmandes en énergie.

La méthode exergetique peut aider à atteindre l'objectif d'une utilisation plus efficace des ressources énergétiques, car elle permet de déterminer les emplacements, les types et les amplitudes réelles des pertes.

Dans ce contexte, et afin d'estimer les rapports d'utilisation de l'énergie ainsi que les quantités de gain d'énergie d'un séchoir solaire indirect, une investigation expérimentale pourrait être menée en séchant un fruit. Le calcul de l'exergie, à des endroits précis de l'appareil, des pertes d'exergie et du rendement pendant le processus de séchage est, en outre, bénéfique lors d'une analyse de l'opération en question.

Existerait-il, en effet, des paramètres de fonctionnement possédant un effet sur la destruction et l'efficacité de l'exergie ?

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Le chapitre 1 est une étude bibliographique consacrée à quelques principales définitions et concepts de base relatifs au séchage et aux séchoirs solaires.

Dans le chapitre 2, la méthodologie suivie lors de l'élaboration expérimentale de ce travail est présentée avec le matériel et l'appareillage utilisés.

Le chapitre 3 est consacré à l'exposition des résultats.

Enfin une conclusion générale clôture ce mémoire.

Chapitre I :
Généralités &
Notions de base

I. Généralités & Notions de base

I.1. Le séchage

C'est l'opération d'un unitaire visant à éliminer l'eau du produit humide, ce dernier peut être solide ou liquide mais le produit fini est solide [1], ainsi l'élimination de l'eau est nécessaire à la croissance de micro-organismes et des enzymes responsables des dommages alimentaires [2]. L'opération de séchage ne consiste donc pas seulement à retirer de l'eau, mais c'est aussi souvent une opération de formulation et/ou de texturation, qui fixe en partie la qualité et les propriétés d'usage du produit. [3]

I.2. Les dispositifs solaires

Les dispositifs utilisés pour le séchage solaire des produits humides comme les fruits sont dits séchoirs solaires. On peut classer ces appareils suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire comme suit :

I.2.1. Séchoirs naturels

Ce sont des appareils qui utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit humide à sécher est réparti sur des claies ou disposé à même le sol. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre au problème de la conservation temporaire du produit en attendant la vente ou la consommation. [4]

I.2.2. Séchoirs solaires à chauffage direct (Séchoirs solaires directs)

Ce sont des appareils simples ne comportant qu'un châssis vitré, sous lequel les produits seront disposés. Le réchauffement causé par l'effet de serre diminue le taux d'humidité relative, ce qui accélère l'opération de séchage. (Voir Figure I.1 où (1) sont les trous d'aération (pour qu'il n'y ait pas de condensation et (2) est une plaque de verre ou de plastique transparente). [5]

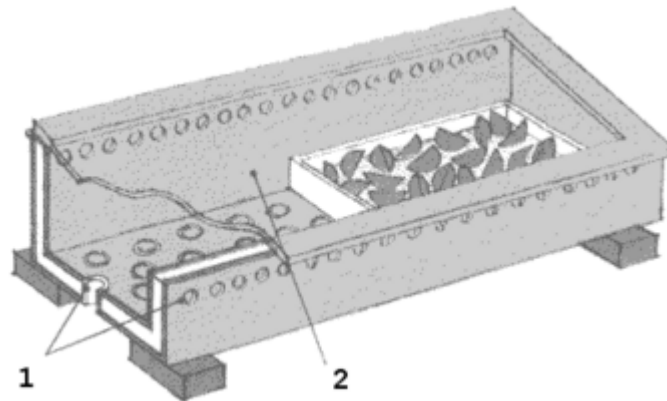


Figure I.1. Séchoir solaire à chauffage direct.[6]

I.2.3. Séchoirs solaires à chauffage indirect (Séchoirs solaires indirects)

Le principe est un peu plus compliqué consistant à chauffer l'air, et le faire circuler entre les aliments à sécher (Figure I.2). [5]

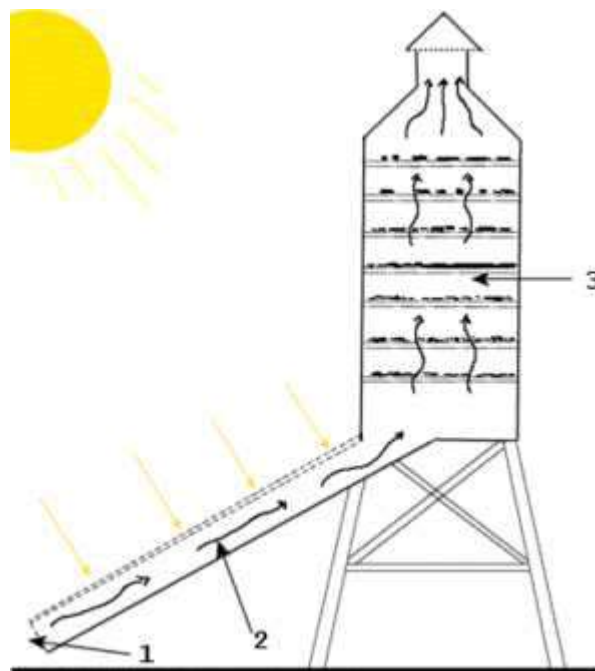


Figure I.2. Séchoir solaire à chauffage indirect.[7]

1.3. L'Énergie :

L'énergie est un concept relié à ceux d'action, de force et de durée : la mise en œuvre d'une action nécessite de maintenir une certaine force pendant une durée suffisante, pour vaincre les inerties et résistances qui s'opposent à ce changement. L'énergie qui aura été nécessaire pour accomplir finalement l'action envisagée rend compte à la fois de la force et de la durée pendant laquelle elle aura été exercée. Le sens premier est celui d'une vertu morale : l'énergie morale et physique que l'homme doit mettre en œuvre pour accomplir un travail donné. L'énergie est étudiée sous l'angle de la science physique, et sous l'angle de l'économie, pour évoquer notamment la production, la distribution et la consommation d'énergie.[8]

1.4. L'Exergie :

En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie. C'est la partie utilisable d'un joule. Si selon le premier principe de la thermodynamique la quantité d'énergie se conserve, la qualité de cette énergie, l'exergie, ne peut en revanche que diminuer lors d'une transformation. L'exergie détruite au cours d'une réaction est appelée anergie.[9]

Ce phénomène est lié à l'entropie du système et de son environnement, qui ne peut qu'augmenter au cours d'une transformation réelle, non réversible (deuxième principe de la thermodynamique), alors que l'exergie diminue au cours d'une transformation réelle.

L'analyse énergétique consiste à déterminer la quantité d'énergie solaire reçue par le capteur solaire utilisée dans le processus de séchage du produits, ainsi la détermination des différents rendements [10, 11].

Autrement dit, la seconde loi de la thermodynamique introduit le concept utile d'exergie dans l'analyse des systèmes thermiques et exergie est présente comme un outil dans la conception, l'évaluation, l'optimisation et l'amélioration des système énergétiques, cela peut être appliqué a la fois au niveau du système et du composant, la méthode d'exergie peut aider à poursuivre l'objectif d'une utilisation plus efficace des ressources énergétiques, par ce qu'il permet les emplacements types et grandeur réelles des pertes à déterminer, par conséquent l'analyse exergétique peut révéler où et par combien il est possible de concevoir de systèmes thermiques plus efficaces en réduisant le sources d'inefficacités existantes, l'analyse exergétique évalue l'énergie disponible à différents points d'un système [12] .

I.5. Quelques travaux sur le séchage à l'université d'Ouargla

- **Etude du séchage du deux produits agroalimentaire (tomate – menthe verte) djamel mennouche (2006) :**

Ce travail représente une étude expérimentale du procédé de séchage en vue de la valorisation des plantes médicinales (menthe verte) et les produits agro-alimentaires (tomates), dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle [13]

- **Etude du séchage de la pomme de terre bahadj ahmed (2014) :**

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de séchage solaire par convection forcée d'un produit agro-alimentaire (la pomme de terre) dans un séchoir solaire indirect [14].

- **Etude du séchage des grains de fève rezazga ahmed (2015) :**

Ce travail présent une contribution technique de l'étude expérimentale de séchage solaire des grains de fève par l'utilisation des deux séchoirs solaires de type direct et indirect fonctionnant en convection forcée [15].

En outre, le tableau suivant présente quelques recherches antérieures sur l'analyse énergétique et exergetique de l'opération de séchage :

Tableau I.1 : Recherches antérieures sur l'analyse énergétique et exergetique.

Chercheurs	Produit séché	Type de séchoir	Pays
A. Boulemtafes Boukadoum A. Benzaoui	Menthe	Séchoir indirect	Algérie
A .Akbulut A. Durmus	Mûre	Séchoir indirect forcé	Turkie
M.M.I.chowdhury B.K.bala M.a.haque	Jacquier	Séchoir tunnel	Bangladesh

Chapitre II :
Matériels & Méthodes

II. Matériels & Méthodes

II.1. Introduction

La partie expérimentale a été réalisée à l'Université de Ouargla au niveau de deux laboratoires : Le laboratoire de recherche de Génie des Procédés (LGP) et le laboratoire pédagogique de Physique. Il s'agit d'un séchage solaire de deux fruits : la fraise et la tomate et de deux analyses, l'une énergétique et l'autre exergetique.

L'objectif principal est cette analyse qui concerne le séchage solaire indirect des fraises et des tomates, mais pour y arriver il a bien fallu passer par une étude expérimentale afin d'utiliser de vraies valeurs pour un séchoir solaire indirect existant.

II.2. La matière première

Il s'agit de deux fruits choisis pour cette étude : La fraise et la tomate.

a- Le premier fruit : La fraise

La fraise qui fait partie des fruits qui changent de couleur plusieurs fois. Elle a belle forme et goût délicieux et une bonne odeur. [17]

La fraise est riche en vitamine C (antioxydants), en vitamine A (sous forme d'un précurseur, le β -carotène, mais pas en rétinol qui doit être synthétisé) pour stimuler les défenses immunitaires, en vitamine B9 (acide folique), important pour les femmes enceintes.

b- Le deuxième fruit : La tomate

La tomate est un fruit d'une importance particulière dans l'alimentation humaine. Elle a de bonnes perspectives économiques. La consommation des tomates contribue à un régime sain et équilibré. [18] La tomate est un aliment diététique, très riche en eau (93 à 95 %) et très pauvre en calories (17 kcal pour 100 grammes), riche en éléments minéraux et en vitamines (A, C et E). Les glucides, 2 à 3 %, sont constitués principalement de fructose et de glucose. Les sels minéraux, dont la teneur dépend aussi du sol et des apports d'engrais, sont composés pour près de la moitié de potassium, environ 235 mg pour 100 g de tomate. La tomate contient plusieurs vitamines hydrosolubles dont la principale est la vitamine C.

Nous avons réalisé des expériences de séchage solaire indirect sur des échantillons de fraises et de tomates dont la caractéristique principale est la teneur élevée en l'eau et l'appartenance à

la famille des produits agroalimentaires périssables. En outre, une bonne préparation du produit avant l'opération est quasiment nécessaire (Figures II.1 – II.4).



Figure II.1 : Préparation des fraises.



Figure II.2 : Fraises séchées.



Figure II.3 : Préparation des tomates.



Figure II.4 : Tomates sur la claie.

II.3. Le séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire utilisé durant les expériences de séchage est de type indirect. Le dispositif est composé d'un capteur solaire chauffant l'air ambiant par énergie solaire en la transformant en chaleur et d'une chambre de séchage où sont posés les échantillons des deux fruits. Le dispositif est, en effet, montré dans la figure II.5.

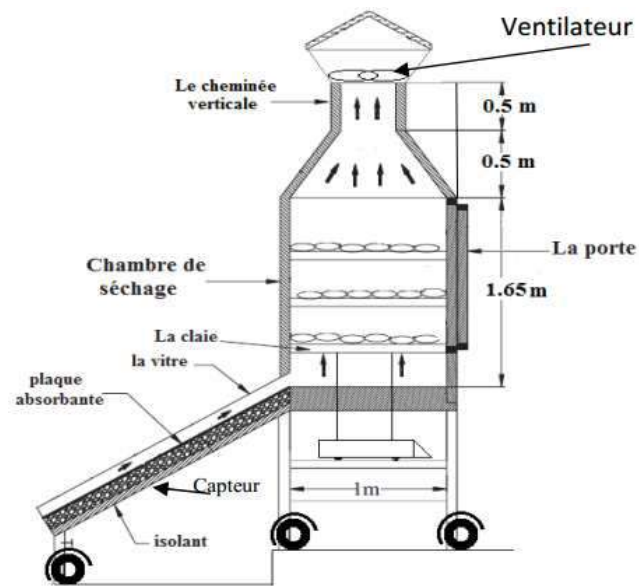


Figure II.5 : Schéma du séchoir solaire indirect utilisé. [19]

II .4. Mesures

II.4.1. Mesure de la teneur en eau initiale des fruits

La teneur en eau est mesurée avec l'analyseur de l'humidité de la figure II.6. C'est pour avoir les valeurs initiale et finale.



Figure II.6 : Analyseur de la teneur en eau utilisé.

II.4.2. Mesure de la vitesse de l'air asséchant

La vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (Figure II.7).



Figure II.7 : Appareil pour mesurer la vitesse de l'air asséchant.

II.4.3. Mesure de la masse humide des deux fruits

La variation de la masse humide des fraises et des tomates utilisées en fonction du temps de séchage est suivie à l'aide d'une balance électronique à affichage numérique de précision 0.001g.

II.4.4. Mesure des températures

La mesure de toutes les températures nécessaires est effectuée à l'aide de thermocouples placés dans des endroits adéquats (Figure II.8).



Figure II.8 : Appareil type PHYW Testo 445.

II.4.5. Mesure de l'humidité et de la température ambiantes

La mesure des températures et des humidités relatives dans le séchoir solaire est faite par des sondes spécifiques : Entrée et sortie du capteur solaire, Avant et après la claie de séchage.



Figure II.9: Compteur température et de l'humidité utilisé.



Figure II.10 : Capteur Température - Humidité utilisé.

II.4.6. Mesure de la température des deux fruits

La mesure des températures des échantillons de chacun des deux fruits de notre étude au Laboratoire (LGP) a été effectuée à l'aide de thermocouples spécifiques et adéquats (avec le même appareil utilisé précédemment).

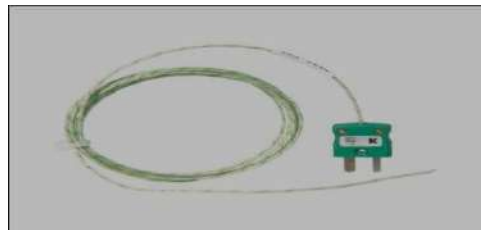


Figure II.11 : Thermocouple utilisé.

II.4.7. Station météo avec acquisition

Toute une station météo qui a été utilisée pour mesurer les paramètres extérieurs pendant les journées de séchage : le rayonnement solaire, l'humidité relative, la température et la vitesse de l'air ambiant. La station est reliée à un ordinateur puissant pour l'acquisition des données avec la plus grande précision soit-elle et avec un pas de temps égale à une minute (Figure II.11). Pour notre travail, nous avons opté pour des valeurs espacées de 60 minutes soit une heure de séchage.



Figure II.11 : Station météo (Laboratoire pédagogique de Physique, Université de Ouargla).

II.5. Analyse énergétique

Ce processus d'analyse de l'énergie utilisée et perdue (exergie) au cours du processus de séchage, en fonction de la première et la deuxième loi de la thermodynamique et l'application d'équation mathématiques trouvées dans la littérature.

II.5.1. Analyse énergétique au niveau du capteur solaire

$$P_{\text{vsat_capteur}} = 10^{[17.443 - (2795/T_{\text{capteur}}) - (3.868 \cdot \log(T_{\text{capteur}}))]} \quad [20] \quad (1)$$

$$T_{\text{capteur}} = ((T_{\text{ec}} + T_{\text{sc}})/2) + 273 \quad [20] \quad (2)$$

$$\Phi_{\text{capteur}} = ((\Phi_{\text{ec}} + \Phi_{\text{sc}})/2) \quad [20] \quad (3)$$

$$\rho_{\text{capteur}} = (348.3/T_{\text{capteur}}) - (\Phi_{\text{capteur}}/100) * P_{\text{vsat_capteur}} * (131.6/T_{\text{capteur}}) \quad [20] \quad (4)$$

$$\dot{m}_{\text{capteur}} = \rho_{\text{capteur}} * v_{\text{capteur}} * S_{\text{capteur}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{capteur}} = \dot{m}_{\text{capteur}} * C_p * (T_{\text{sc}} - T_{\text{ec}}) \quad [11] \quad (6)$$

$$\eta_{\text{énergétique (capteur)}} = (\dot{Q}_{\text{capteur}} / \text{Ray} * A_{\text{capteur}}) \quad [11] \quad (7)$$

II.5.2. Analyse énergétique au niveau de la chambre de séchage

$$\dot{Q}_{\text{chambre}} = \dot{m}_{\text{chambre}} * (h_{\text{avant}} - h_{\text{après}}) \quad [11] \quad (8)$$

$$\dot{m}_{\text{chambre}} = \dot{m}_{\text{capteur}} \quad (9)$$

$$h = C_p T \quad [11] \quad (10)$$

$$C_p = 1005 \text{ J/kg.K} \quad [20] \quad (11)$$

donc :

$$\dot{Q}_{\text{chambre}} = \dot{m}_{\text{chambre}} * C_p * (T_{\text{avant}} - T_{\text{après}}) \quad [11] \quad (12)$$

$$P_{\text{vsat_chambre}} = 10^{[17.443 - (2795/T_{\text{moy_chambre}}) - (3.868 * \log(T_{\text{moy_chambre}}))]} \quad [20] \quad (13)$$

$$T_{\text{moy_chambre}} = ((T_{\text{avant}} + T_{\text{après}})/2) + 273 \quad (14)$$

$$\rho_{\text{chambre}} = (348.3/T_{\text{moy_chambre}}) - (\Phi_{\text{chambre}}/100) * P_{\text{vsat_chambre}} * (131.6/T_{\text{moy_chambre}}) \quad (15)$$

$$\eta_{\text{énergétique (chambre)}} = W_{\text{chambre}} / (\rho_{\text{chambre}} * V_{\text{chambre}} * (h_{\text{avant}} - h_{\text{après}})) \quad [12] \quad (16)$$

$$\eta_{\text{énergétique (chambre)}} = W_{\text{chambre}} / (\dot{m}_{\text{chambre}} * C_p * (T_{\text{avant}} - T_{\text{après}})) \quad (17)$$

$$W_{\text{chambre}} = 0.622 * ((\Phi_{\text{chambre}} * P_{\text{vsat_chambre}}) / (1 - \Phi_{\text{chambre}} * P_{\text{vsat_chambre}})) \quad [20] \quad (18)$$

$$\Phi_{\text{chambre}} = ((\Phi_{\text{après}} + \Phi_{\text{avant}}) / 2) / 100 \quad (19)$$

II.5.3 Rendement énergétique total du séchoir solaire

$$\eta_{\text{énergétique}} = (\dot{Q}_{\text{chambre}} / \dot{Q}_{\text{capteur}}) \quad [11] \quad (20)$$

II.6. Analyse exergetique

II.6.1. Analyse exergetique au niveau du capteur solaire

- **A l'entrée du capteur solaire :**

$$P_{\text{vsat_capteur (entrée)}} = 10^{[17.443 - (2795/T_{\text{capteur (entrée)}}) - (3.868 * \log(T_{\text{capteur (entrée)}}))]} \quad (21)$$

$$\rho_{\text{capteur (entrée)}} = (348.3/T_{\text{capteur (entrée)}} - (\Phi_{\text{capteur (entrée)}}/100) * P_{\text{vsat_capteur (entrée)}} * (131.6/T_{\text{capteur (entrée)}})) \quad (22)$$

$$\dot{m}_{\text{capteur (entrée)}} = \rho_{\text{capteur (entrée)}} * v_{\text{capteur (entrée)}} * S_{\text{capteur}} \quad (23)$$

$$EX_{\text{capteur (entrée)}} = \dot{m}_{\text{entrée}} * C_p * [(T_{\text{capteur (entrée)}} - T_{\text{ambiante}}) - T_{\text{ambiante}} \ln (T_{\text{capteur (entrée)}} / T_{\text{ambiante}})] \quad [12] \quad (24)$$

- **A la sortie du capteur solaire :**

$$P_{\text{vsat_capteur (sortie)}} = 10^{[17.443 - (2795/T_{\text{capteur (sortie)}}) - (3.868 * \log(T_{\text{capteur (sortie)}}))]} \quad (25)$$

$$\rho_{\text{capteur (sortie)}} = (348.3/T_{\text{capteur (sortie)}} - (\Phi_{\text{capteur (sortie)}}/100) * P_{\text{vsat_capteur (sortie)}} * (131.6/T_{\text{capteur (sortie)}})) \quad (26)$$

$$\dot{m}_{\text{capteur (sortie)}} = \rho_{\text{capteur (sortie)}} * v_{\text{capteur (sortie)}} * S_{\text{capteur}} \quad (27)$$

$$EX_{\text{capteur (sortie)}} = \dot{m}_{\text{sortie}} * C_p * [(T_{\text{capteur (sortie)}} - T_{\text{ambiante}}) - T_{\text{ambiante}} \ln (T_{\text{capteur (sortie)}} / T_{\text{ambiante}})] \quad [12] \quad (28)$$

$$EX_{\text{solaire}} = Ray[1 - (4 * T_{\text{ambiante}} / 3 T_{\text{moy}}) + (1/3) * (T_{\text{ambiante}}^4 / T_{\text{moy}})] * A_{\text{capteur}} \quad (29)$$

$$EX_{\text{perte (capteur)}} = EX_{\text{capteur (entrée)}} - EX_{\text{capteur (sortie)}} \quad (30)$$

$$\eta_{\text{exergetique (capteur)}} = 1 - (EX_{\text{perte (capteur)}} / EX_{\text{capteur (entrée)}}) \quad (31)$$

II.6.2. Analyse exergetique au niveau de la chambre de séchage

$$\dot{m}_{\text{ sortie du capteur}} = \dot{m}_{\text{chambre}} \quad (32)$$

$$EX_{\text{ avant}} = \dot{m}_{\text{chambre}} * C_p * [(T_{\text{ avant}} - T_{\text{ ambiante}}) - T_{\text{ ambiante}} \ln (T_{\text{ avant}} / T_{\text{ ambiante}})] \quad (33)$$

$$EX_{\text{ après}} = \dot{m}_{\text{chambre}} * C_p * [(T_{\text{ après}} - T_{\text{ ambiante}}) - T_{\text{ ambiante}} \ln (T_{\text{ après}} / T_{\text{ ambiante}})] \quad (34)$$

$$EX_{\text{ perte (chambre)}} = EX_{\text{chambre (entrée)}} - EX_{\text{chambre (sortie)}} \quad (35)$$

$$\eta_{\text{ exergetique (chambre)}} = 1 - (EX_{\text{perte (chambre)}} / EX_{\text{chambre (sortie)}}) \quad [11] \quad (36)$$

II.6.3. Rendement exergetique total du séchoir solaire

$$\eta_{\text{ exergetique}} = 1 - (EX_{\text{perte (chambre)}} / EX_{\text{capteur (entrée)}}) \quad [12] \quad (37)$$

Chapitre III :
Résultats & Discussion

III. Résultats & Discussion

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de l'étude expérimentale pour les analyses énergétique et exergetique du séchoir solaire indirect, présenté dans le chapitre 2, au cours du séchage solaire de deux fruits : la tomate et la fraise.

III.2. Évolution des paramètres extérieurs

Les variations des paramètres extérieurs essentiels concernant la journée de séchage du 08-mai-18 sont représentées sur la figure III.1. Le rayonnement solaire atteint des valeurs maximales voisines de 1000 W/m^2 , la température maximale de l'air ambiant est voisine de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'humidité relative est faible pendant le jour de séchage, sa plus faible valeur étant de 12% , environ.

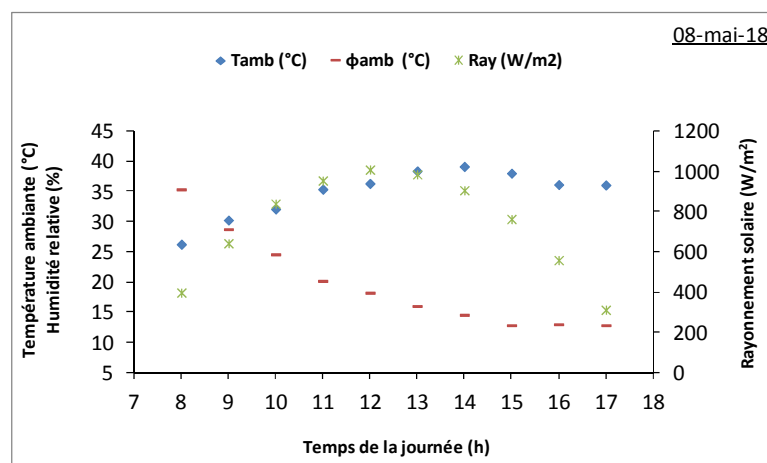


Figure III.1 : Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 08-mai-18.

Les variations des paramètres extérieurs essentiels concernant la journée du 09-mai-18 sont représentées sur la figure III.2. En effet, le rayonnement solaire atteint des valeurs maximales de 900 W/m^2 et la température maximale de l'air ambiant sont voisines de $38 \text{ }^\circ\text{C}$. la plus faible valeur de l'humidité relative de l'air extérieur est de 18% .

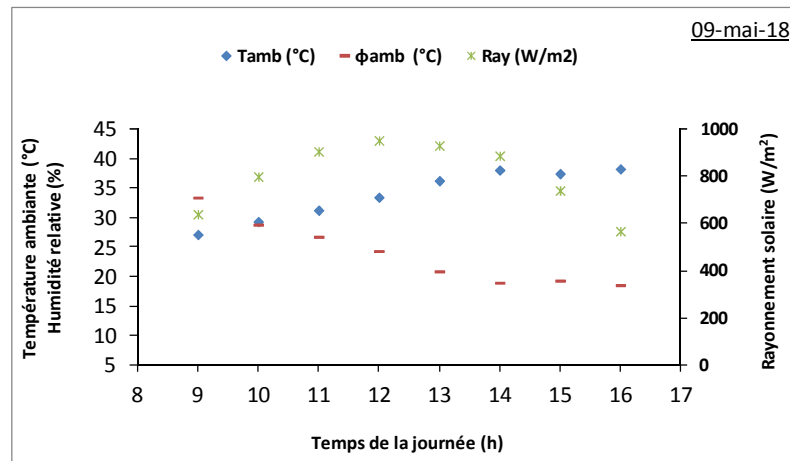


Figure III.2 : Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 09-mai-18.

Les variations des paramètres extérieurs essentiels concernant le 10-mai-18 sont sur la figure III.3. Le rayonnement atteint une valeur égale à 1000 W/m^2 et la température atteint les 37 °C . L'humidité relative touche 18% comme valeur minimale.

La figure III.3 montre, également, que la température ambiante et le rayonnement solaire sont faibles au début et à la fin de la journée.

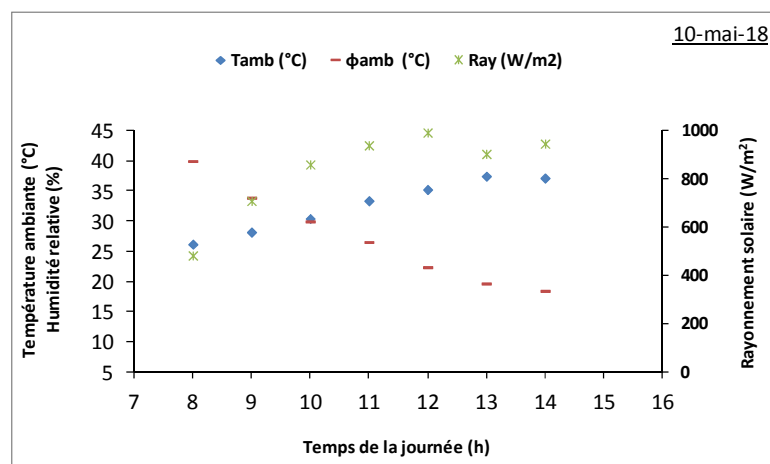


Figure III.3 : Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 10-mai-18.

Les variations des paramètres extérieurs essentiels concernant cette journée du 11-mai-18 sont lisibles sur la figure III.4. Le rayonnement solaire atteint les 1100 W/m^2 et les températures sont voisines de 40 °C par contre l'humidité relative était faible avec 14% comme plus faible valeur journalière.

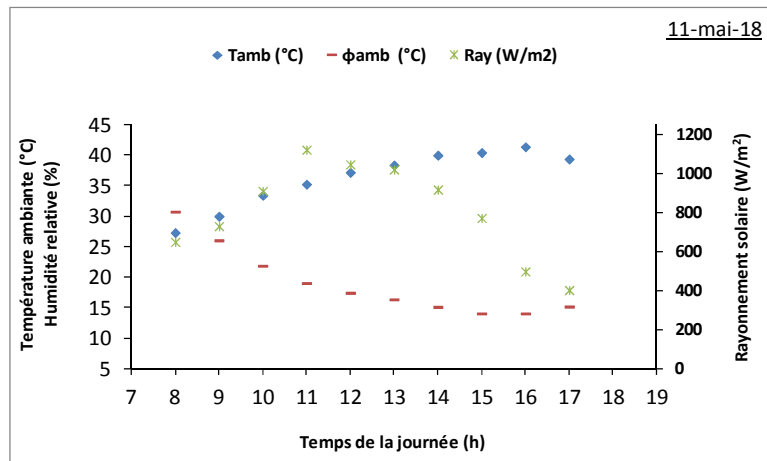


Figure III.4 : Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 11-mai-18.

Les variations des paramètres extérieurs du 12-mai-18 sont représentées sur la figure III.5. En effet, le rayonnement solaire atteint des valeurs maximales voisines de 900 W/m², la température maximale de l'air ambiant sont voisines de 39 °C.

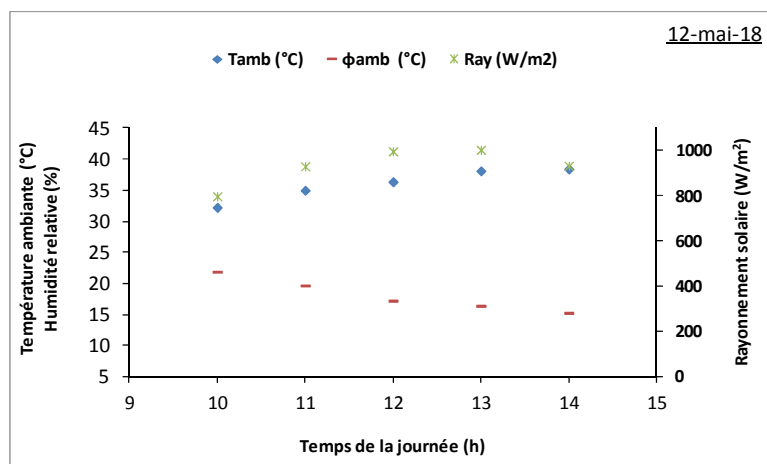


Figure III.5 : Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 12-mai-18.

III.3. Variation des températures dans le séchoir solaire

a- Cas du séchage solaire des fraises Journée : 08-mai-18

La figure III.6 représente la variation de la température de l'air de séchage dans la chambre de séchage ($T_{avant} - T_{après}$) et dans le capteur solaire et la température du produit en fonction du changement temporelle. Une augmentation de la température de l'air à la sortie du capteur solaire par rapport à l'entrée est notable ; à 13h elle est de 55°C. La température du fraises appartient à l'intervalle (25°C - 35°C) d'où l'augmentation de la température de l'air asséchant ascendant.

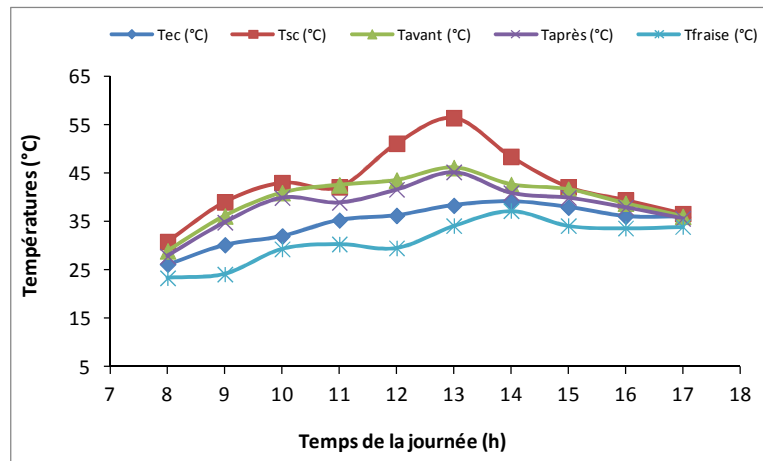


Figure III.6 : la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit.

Cas du séchage solaire des fraises

Journées : 09-mai-18 & 10-mai-18

La figure III.7 représente la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire, ainsi que la température des fruits en fonction du temps. A la sortie du capteur solaire touche les 55°C (à 12h). La cause est l’augmentation de l’humidité de l’air de séchage qui a absorbé l’eau dans le produit. L’augmentation de la température des fraises où les changements étaient presque (22°C – 33°C) ce qui a donné une élévation de la température de l’air asséchant dans la chambre de séchage.

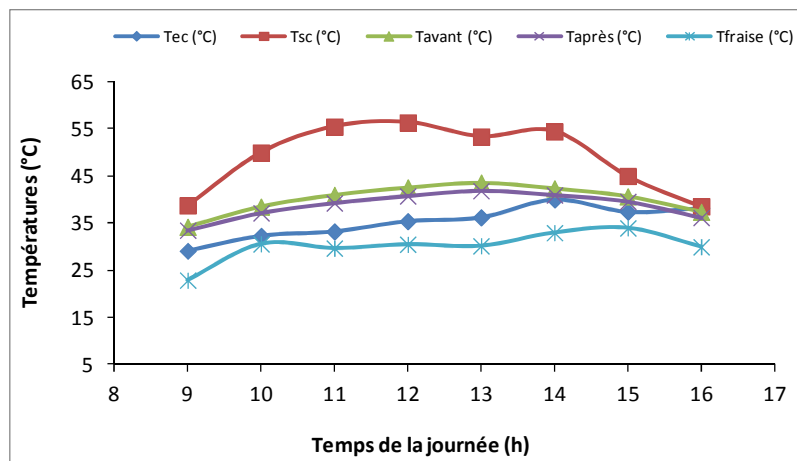


Figure III.7 : la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit.

La figure III.8 représente les variations des différentes température vues ci-haut. La température de sortie du capteur touche les 60°C à 14h. $T_{après}$ est voisine de T_{avant} et l’augmentation de la température des fraises est remarquable (de 30°C à 39°C).

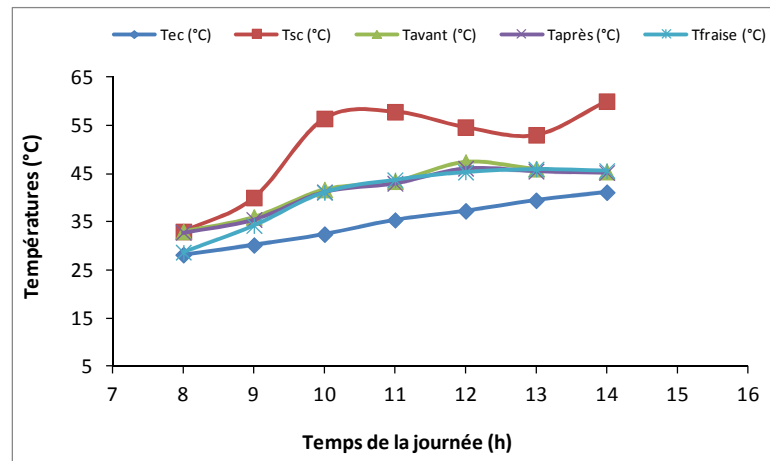


Figure III.8 : la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit.

b- Cas de la tomate Journées : 11-mai-18 & 12-mai-18

Les courbes de la figure III.9 ne sont que la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage, la température de l’air à travers le capteur solaire et la température des fruits. Comme pour les cas vus ci-haut, la température de la sortie du capteur solaire atteint des valeurs supérieures à celles d’entrée avec 50°C à 14h comme valeur maximale. La température après la claie de séchage est inférieure à la température avant et l’augmentation de la température du fruit est bien enregistrée et est dans la fourchette (22°C - 32°C).

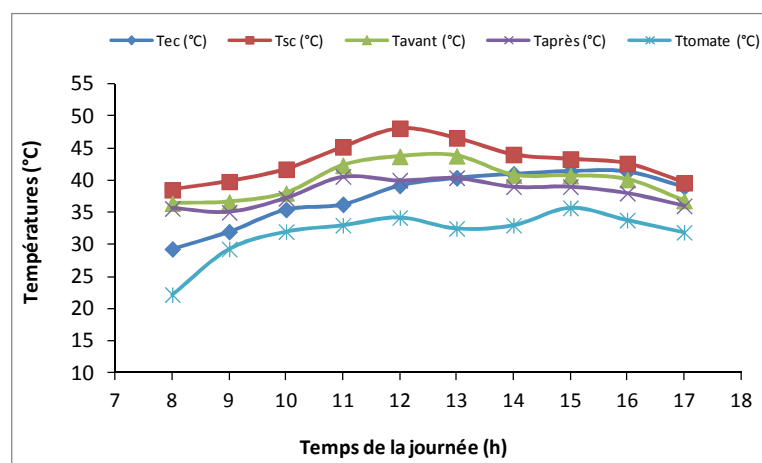


Figure III.9: la variation de la température de l’air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit.

La figure III.10 représente, à son tour, les variations des différentes températures mesurées. Les mêmes constatations restent, en effet, valables.

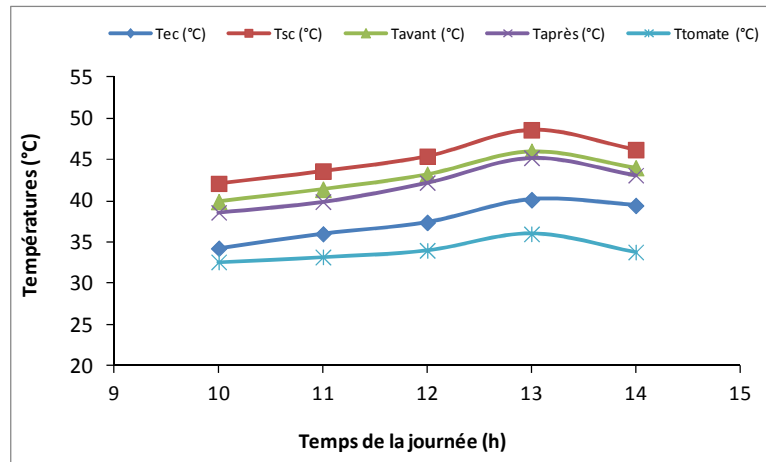


Figure III.10 : Variations de la température de l'air du séchage dans chambre de séchage et dans le capteur solaire.

III.4. Variation des humidités dans le séchoir solaire

III.4.1. Humidités de l'air

a- Cas du séchage solaire des fraises

Journée du 08-mai-18

Cette fois-ci, la figure III.11 représente la variation en fonction du temps de l'humidité dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire. L'humidité de l'air diminue à partir de 9h du matin jusqu'à 15h de l'après midi. L'humidité de l'air asséchant dans la chambre de séchage est telle que $\Phi_{\text{après}}$ dépasse Φ_{avant} d'où le transfert de masse entre cet air ascendant et le fruit humide à sécher déposé sur la claie de séchage.

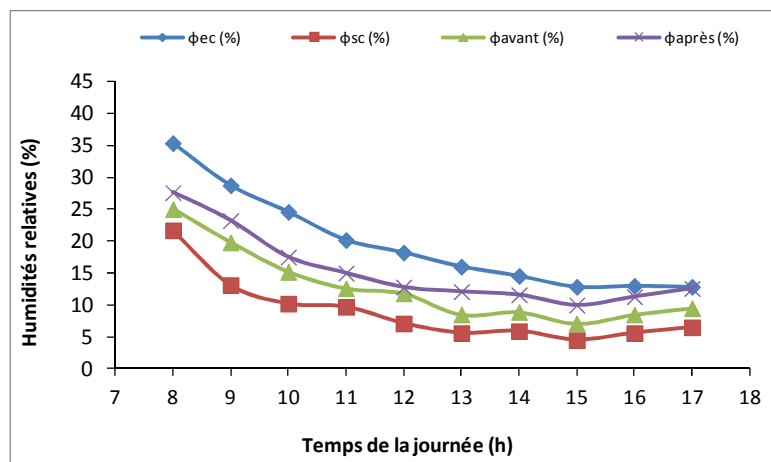


Figure III.11 : Variation de l'humidité dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire.

a- Cas du séchage solaire des fraises **Journée du 09-mai-18**

La figure III.12 représente également l'évolution des différentes humidités relatives de l'air asséchant prises en considération lors de cette étude et citées ci-haut. Les constatations sont les mêmes.

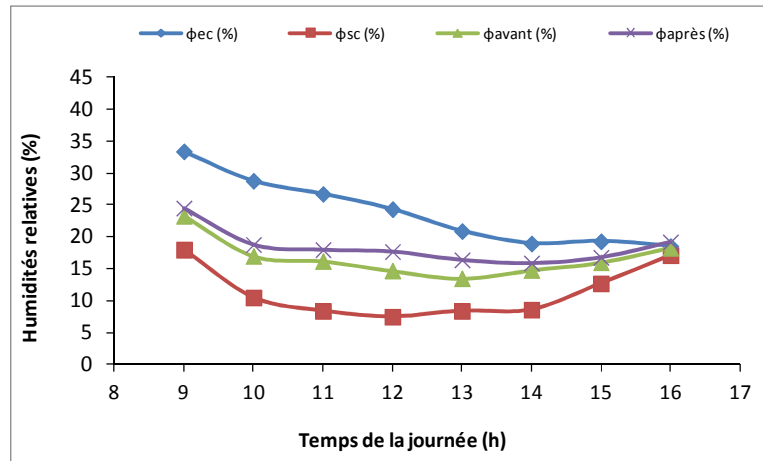


Figure III.12 : Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire.

c-Cas du séchage solaire de la tomate **Journée du 11-mai-18**

La figure III.13 représente également l'évolution des différentes humidités relatives de l'air asséchant prises en considération lors de cette étude et citées ci-haut. Les constatations sont les mêmes.

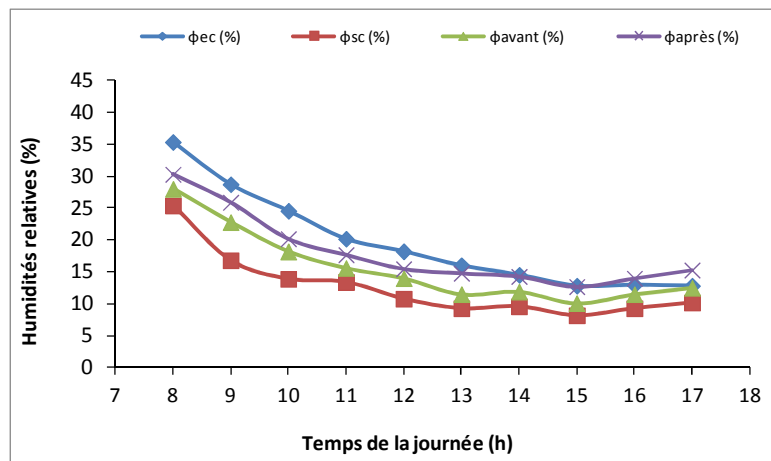


Figure III.13 : Variation de l'humidité de l'air dans le séchoir solaire.

III.4.2. Humidité du produit

a- Cas des fraises :

La figure III.14 représente, cette fois-ci, la variation de l'humidité du fruit lui-même (fraise), c'est-à-dire sa teneur en eau en fonction du temps de séchage. lors du processus, la diminution est importante en teneur en l'eau (de 10.5 à 0.2).

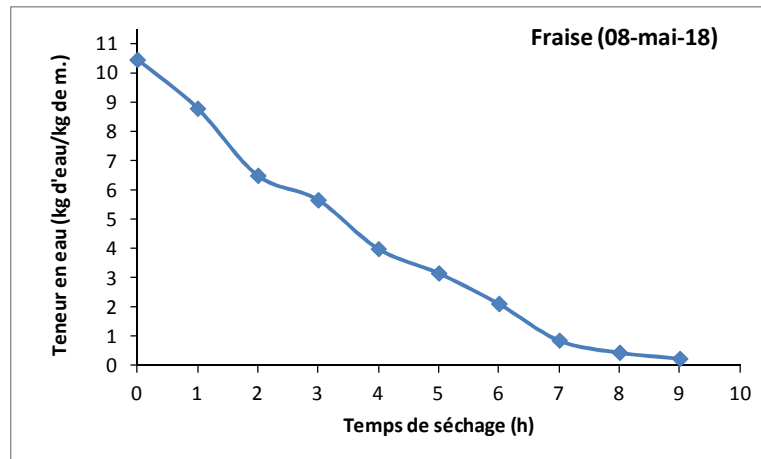


Figure III.14 : Variation de la teneur d'eau des fraises durant la journée du 08-mai-18.

La figure III.15 représente la variation temporelle de la teneur d'eau durant deux jours de séchage (08 et 09-mai-18). La grandeur finale calculée atteint 0.6 kg d'eau/ kg de matière sèche, environ et cela durant 11 heures de séchage.

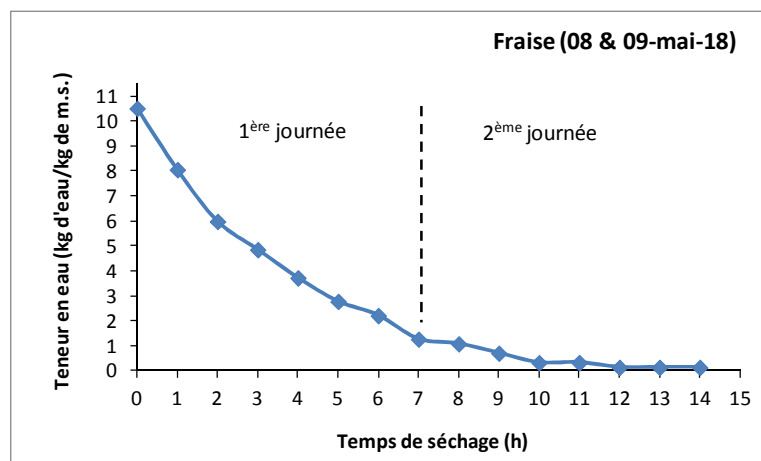


Figure III.15 : Variation de la teneur d'eau des fraises durant les journées du (09 & du 10 mai-18).

b- Cas de la tomate

La figure III.16 représente la variation de la teneur d'eau en fonction du temps pour deux jours de séchage (11 et 12-mai-18) des tomates. La teneur en eau finale est égale à 1.5 après 14 heures de séchage.

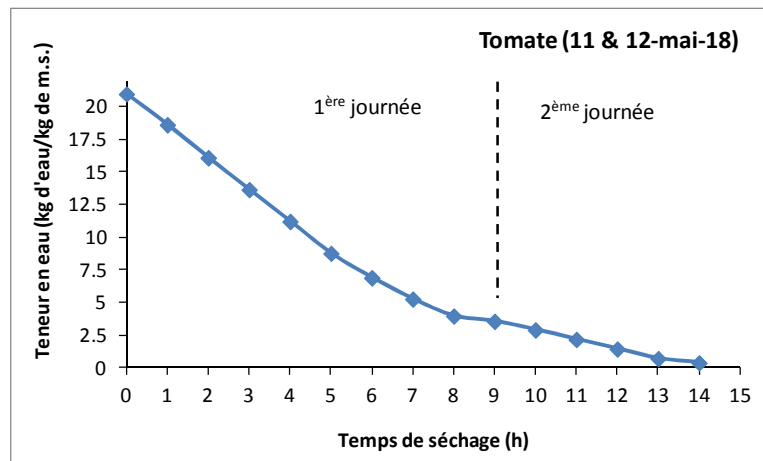


Figure III.16: Variation de la teneur d'eau des tomates durant les journées du 11-mai-18 & du 12-mai-18.

III.5. Analyse énergétique

a- Energie dans le capteur solaire

La figure III.17 représente la variation d'énergie dans le capteur en fonction du temps. Le 08 Mai 2018 à 8h, la valeur ($Q_{ch} = 800$ J) atteint maximum à la limite à 15h ; quant au 09 Mai 2018, nous avons enregistré une valeur ($Q_{ch} = 1350$ J) qui atteint le maximum à 13h ($Q_{ch} = 1200$ J) et progressivement a diminué à 17h.

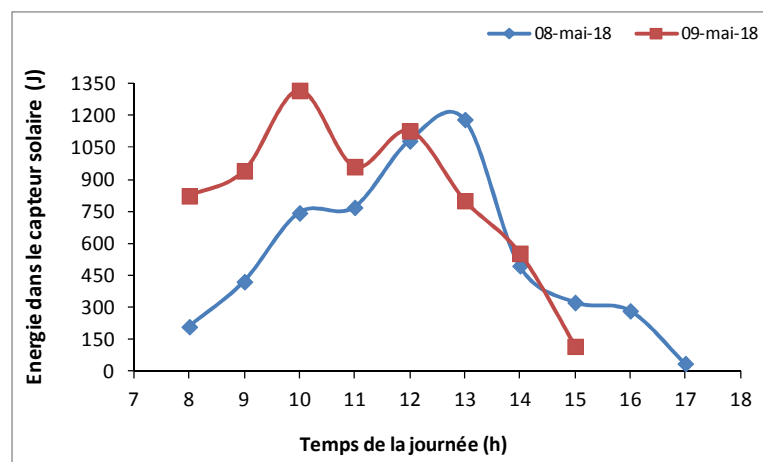


Figure III.17 : Variation de l'énergie (chaleur) dans le capteur solaire pendant la journée de séchage.

Energie (Chaleur) utilisée dans la chambre de séchage

La figure III.18 montre la variation temporelle dans l'énergie utilisée dans la chambre de séchage enregistrée le 08-mai-18 à 8h que l'utilisation de l'énergie était à une plus bas valeur d'énergie ($Q=50J$) jusqu'à une valeur maximale ($Q_{ch} = 725 J$) à 12h30 puis la valeur diminu à ($Q_{ch} = 0J$) dans les limites à 17h et cette quantité d'énergie utilisée extrait l'humidité entre 9h jusqu'à 14h. La température extérieure est élevée le 09 Mai 2018 à 8h l'utilisation de l'énergie était ($Q_{ch} = 200 J$) et après cela, la courbe d'énergie en attendant ils descendent à 16h par rapport à la température externe.

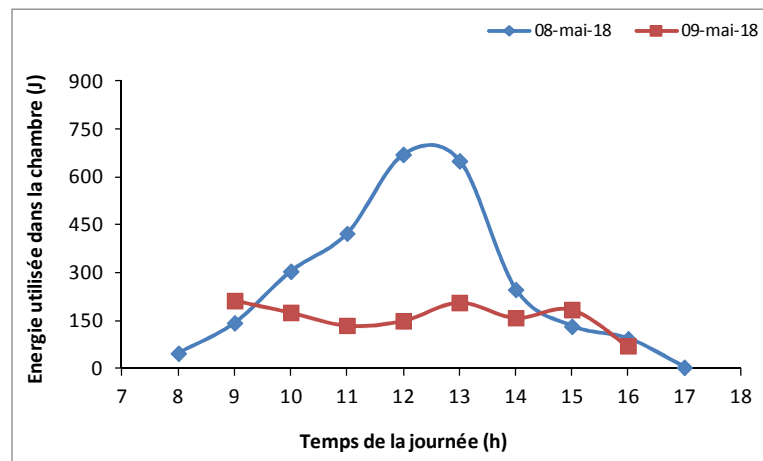


Figure III.18 : Chaleur utilisée durant l'extraction de l'humidité dans la chambre de séchage.

b- Variation du rendement énergétique du capteur solaire

La figure III.19 représente, à son tour, la variation du rendement énergétique en fonction du temps de séchage dans plusieurs jours du mois de Mai (du 08 au 12). L'augmentation du rendement est remarquable où il atteint son maximum le 10-mai-18 (= 90%), la plus basse valeur sont atteintes le 12-mai-18 (= 45%).

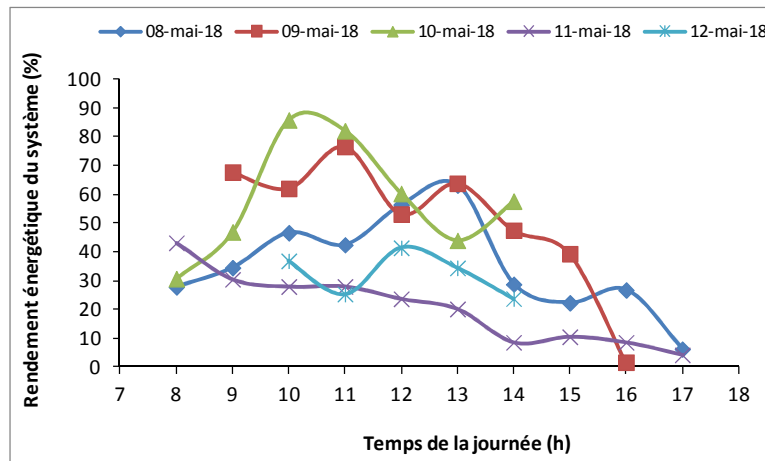


Figure III.19 : Variation du rendement énergétique du capteur solaire.

La figure III.20 montre la variation du rendement du capteur solaire et celle du rayonnement solaire durant l’expérience du 08-mai-18. Le rayonnement solaire augmente continuellement jusqu’à son pique puis redescend de cette valeur journalière maximale. La même constatation pour du rendement. Leurs valeurs maximales sont atteintes vers à 13h (1000W/m² et 80%) et leurs valeurs minimales sont enregistrées à 17h.

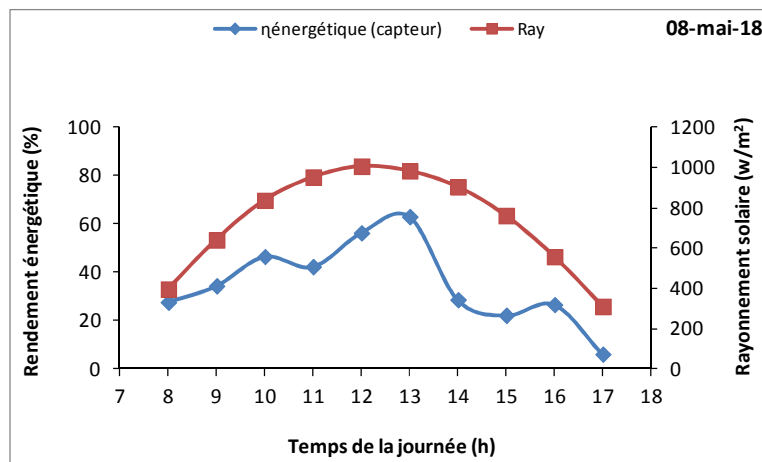


Figure III.20 : Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire (Journée du 08-mai-18).

La figure III.21 n’est que la variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire pour la journée du 09-mai-18. Les constatations et les interprétations ne diffèrent pas beaucoup de celle vues sur la figure précédente (figure III.20) correspondante à la journée du 08-mai-18.

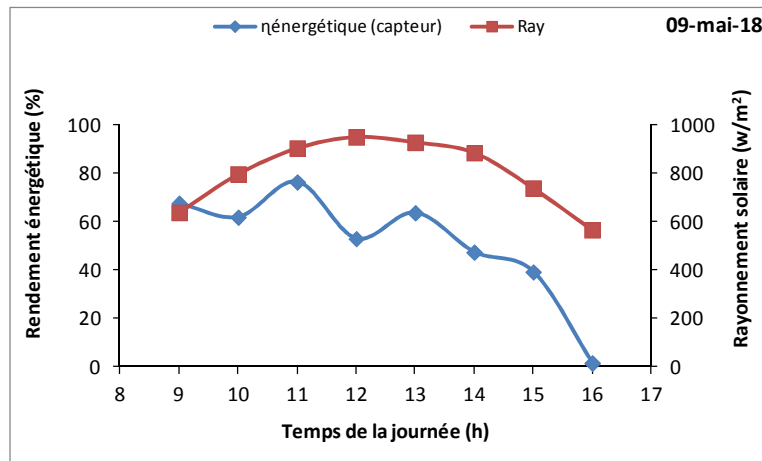


Figure III.21 : Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire (Journée du 09-mai-18).

d-Variation du rendement énergétique global du système (séchoir solaire)

La figure III.22 montre la variation du rendement énergétique global du séchoir solaire en fonction du temps. La valeur de rendement passe de 20% à la valeur maximale de 60% vers 12h, à ce moment là le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale (le pic).

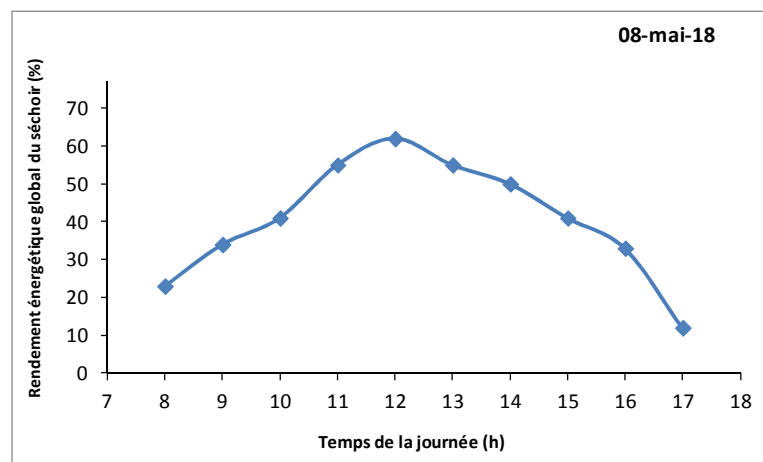


Figure (III.22) : Variation du rendement énergétique global du séchoir solaire pendant la journée.

III.6. Analyse exergetique

La figure III.23 représente les trois courbes qui correspondent aux variations de EX_{ec} , EX_{sc} , et de EX_{perte} relatives au capteur solaire. La valeur de la perte à l'entrée et à la sortie du capteur solaire à 8h du matin sont : $EX_{ec} = 110$ W, $EX_{sc} = 75$ W, $EX_{perte} = 25$ W. Les plus grandes valeurs de l'après midi sont : $EX_{ec} = 180$ W, $EX_{sc} = 125$ W, $EX_{perte} = 50$ W.

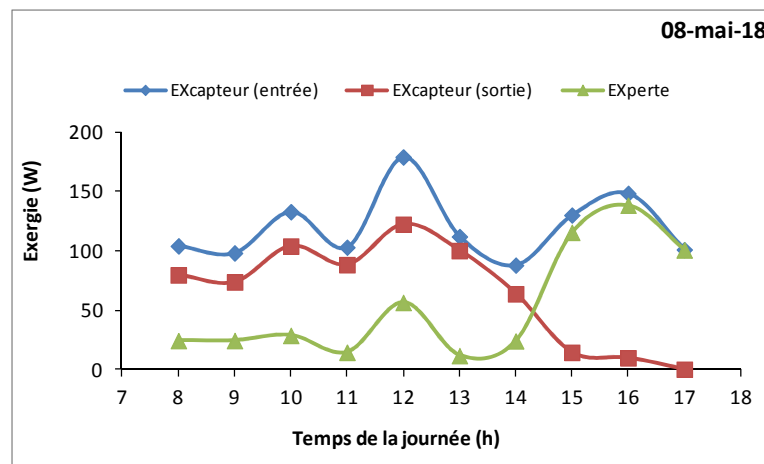


Figure III.23 : Variation de l'exergie du capteur solaire durant la journée du 08-mai-18.

En fin, la figure III.24 montre la variation du rendement exergetique du capteur solaire en fonction du temps (journée du 08-mai-18). Vers 8h du matin, la valeur de ce rendement est égale à 80%. Les valeurs sont juste après constantes, ou presque, jusqu'à midi. Ensuite, vient une diminution voire une chute continues jusqu'à 17h.

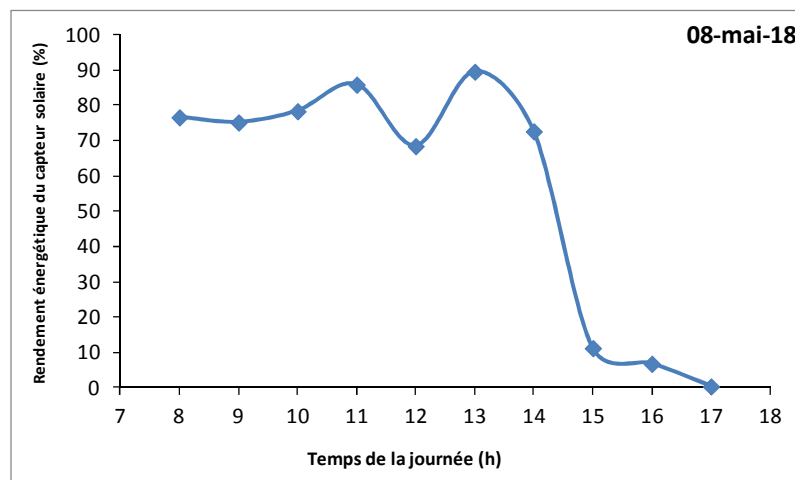


Figure III.24 : Variation du rendement exergetique du capteur solaire durant la journée du 08-mai-18.

Liste des figures

N° de figure	Désignation	Page
Figure (I.1)	Séchoir solaire à chauffage direct	4
Figure(I.2)	Séchoir solaire à chauffage indirect	4
Figure (II.1)	Préparation des fraises.	9
Figure (II.2)	Fraises séchées.	9
Figure (II.3)	Préparation des tomates.	9
Figure(II.4)	Tomates sur la claie.	9
Figure (II.5)	Schéma du séchoir solaire indirect utilisé	10
Figure (II.6)	Analyseur de la teneur	10
Figure (II.7)	Appareil mesure de la vitesse de l'air asséchant	11
Figure (II.8)	Appareil type PHYW testo 445	11
Figure (II.9)	Compteur température et de l'humidité Lutron HT-3006A	12
Figure (II. 10)	Capteur Temp-Humidité	12
Figure (II. 11)	thermocouples de type PHYWE	12
Figure III.1	Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 08-mai-18	18
Figure III.2	Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 09-mai-18	19
Figure III.3	Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 10-mai-18	19
Figure III.4	Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 11-mai-18	20
Figure III.5	Variation des paramètres extérieurs au cours de la journée du 12-mai-18	20
Figure III.6	la variation de la température de l'air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit	21
Figure III.7	la variation de la température de l'air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit	21
Figure III.8	la variation de la température de l'air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit	22
Figure III.9	la variation de la température de l'air de séchage dans la chambre de séchage et dans le capteur solaire et la température du produit	22
Figure III.10	les variations de la température de l'air du séchage dans chambre du séchage et le capteur solaire	23
Figure III.11	la variation de l'humidité dans la chambre de séchage et capteur solaire	23
Figure III.12	la variation d' humidité dans la chambre de séchage et le	24

	capteur solaire	
Figure III.13	_la variation de l'humidité dans l'air du séchoir à l'intérieur de la chambre et le capteur solaire	24
Figure III.14	la variation de la teneur d'eau des fraises durant la journée du 08-mai-18	25
Figure III.15	variation de la teneur d'eau des fraises durant les journées du (09 & du 10)mai-18	25
Figure III.16	variation de la teneur d'eau des tomates durant les journées du 11-mai-18 & du 12-mai-18	26
Figure III.17	Variation de l'énergie (chaleur) dans le capteur solaire pendant la journée	26
Figure III.18	Chaleur utilisée durant l'extraction de l'humidité dans la chambre de séchage	27
Figure III.19	Variation du rendement énergétique du capteur solaire pendant la journée	28
Figure III.20	Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire (Journée du 08-mai-18)	28
Figure III.21	Variation du rendement énergétique du capteur solaire en fonction du rayonnement solaire (Journée du 09-mai-18)	29
Figure (III.22)	Variation du rendement énergétique global du séchoir solaire pendant la journée	29
Figure III.23	Variation de l'exergie du capteur solaire durant la journée du 08-mai-18	30
Figure III.24	Variation du rendement exergetique du capteur solaire durant la journée du 08-mai-18	30

Références

- [1] A. Charreau & R. Cavaillé. Théorie et calculs. Techniques de l'Ingénieur, (1995).
- [2] M.S.A. Shtayeh & R.M. Jamous. Solar drying of fruits and vegetables, biodiversity and environmental research Center (Berc), (2010).
- [3] J. Vasseur. Séchage : principes et calcul d'appareils - Séchage convectif par air chaud (Partie 1), Techniques de l'Ingénieur, (2009).
- [4] http://www.secaar.org/documents/documentation/T8_SOLAI.pdf
- [5] http://www.ekopedia.fr/wiki/S%C3%A9choir_solaire
- [6] <http://www.ekopedia.fr/wiki/Fichier:Sechoir-simple.png>
- [7] <http://www.ekopedia.fr/wiki/Fichier:Sechoir-solaire.png>
- [8] <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie>.
- [9] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Exergie>.
- [10] A. Boulemtafes & A. Benzaoui, energy and exergy analyses of solar drying process of mint. Energy Procedia 6 (2011) : 583-591.
- [11] A. Akbulut & A. Durmus, Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer, Energy (Oxford) Vol.35 No.4 pp.1754-1763 ref.19. (2010).
- [12] L. Bennamoun, An overview on application of exergy and energy for determination of solar drying efficiency, International Journal of Energy Engineering : 2163-1891; 2(5) : 184-194, (2012).
- [13] Djamel Mennouche , Valorisation Des Produits Agro-Alimentaires Et Des Plantes Medicinales Par Les Procédés De Séchage Solaire , Mémoire Magister Département De Génie Des Procédés université Kasdi Merbah Ouargla 21 / 06 / 2006..
- [14] A. Bahadj , Etude Expérimentale De Séchage Solaire De Pomme De Terre , Mmoire Master En Génie Des Procédés ,Université Kasdi Merbah Ouargla 07 /06 /2014
- [15] Rezazga Ahmed , Etude Experimental De Séchage Solaire Direct Et Indirect De La Fèvecontribution Technico-Economique , Mémoire De Master Université Kasdi Merbah Ouargla 10/06/2015
- [16] B. Dadda, S. Kherrouf & L. Serir. Réalisation d'un séchoir solaire indirect. Revue des énergies renouvelables SMSTS'08 Alger (2008).
- [17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraise#Valeur_nutritive.
- [18] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tomate#Utilisation>

[19] R. Khama, F. Aissani, R. Alkama, L. Bennamoun, L. Fraikin, T. Salmon, E. Plougonven & A. Léonard. Convective drying of cherry tomato: study of skin effect. *Journal of Engineering Science & Technology*, 11, 443-457, (2016).

[20] M. Daguinet. "Les séchoirs solaires: théorie et pratique", UNESCO. (1975).

Résumé

Ce travail est une étude expérimentale portant sur le séchage solaire indirect de deux fruits : la fraise et la tomate, réalisée dans un séchoir solaire indirect avec une analyse énergétique et une analyse exergetique qui sont l'objectif principal de cette étude. C'est d'une part, le calcul de la quantité d'énergie nécessaire au séchage et la détermination des différents rendements énergétiques (analyse énergétique), et le calcul exergetique à chaque étape du processus et la détermination des différents rendements exergetiques (analyse exergetique), de l'autre part, et ce pour l'amélioration de la performance du séchoir et afin d'obtenir la conception la plus efficace.

Mots clés : Séchage solaire indirect - Énergie - Exergie - Rendement - Fraise - Tomate.

ملخص

هذا العمل عبارة عن دراسة تجريبية في إطار التجفيف الشمسي الطبيعي لنوعين من الفاكهة: الفراولة والطماطم، أجريت في مجفف شمسي غير مباشر مع تحليل الطاقة والضياع الذي هو الهدف الرئيسي لهذه الدراسة. فمن جهة، هو حساب كمية الطاقة اللازمة لعملية التجفيف و تحديد التغير في الكفاءة الطاقوية (تحليل الطاقة)، وحساب الضياع في كل خطوة من العملية (تحليل الضياع)، من جهة أخرى، من أجل تحسين أداء المجفف والحصول على التصميم الأكثر كفاءة.

الكلمات المفتاحية : التجفيف الشمسي غير المباشر - الطاقة - الضياع - الكفاءة - الفراولة - الطماطم.

Abstract

This work is an experimental study of the solar drying by natural convection of two fruits: the strawberry and the tomato, carried out in an indirect solar dryer with an energy and exergy analysis which is the main objective of this study. It is on the one hand, the calculation of the quantity of energy necessary for the drying process and the determination of the different energy efficiencies (energy analysis), and the exergy calculation at each stage of the process and the determination of the different exergy efficiencies (exergy analysis), on the other hand, and this for the improvement of the performance of the dryer and in order to obtain the most efficient design.

Key words: Indirect solar drying - Energy - Exergy - Efficiency - Strawberry - Tomato.