

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Systèmes Energétiques et Développement Durable

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

Etude expérimentale du séchage des produits agro-alimentaires ; comparaison entre deux modes de séchage

Présenté par :

BETTAYBI AMMAR

Soutenu le : 04 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Pr. MOUMMI Abdelhafid

Dr. LABED Adnane

Mr. ZELLOUF Miloud

MCA

MAA

MCB

Président

Encadreur

Examinateur

Année universitaire : 2016 / 2017

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie maman

Mon cher père

Ma chère grand-mère

Mes chers frères

Mes chères amies

Tous mes enseignants

Toute la promotion de 2017.

Remerciements

Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

*Je remercie **ma mère** et toute ma famille pour leur encouragement, leur soutien et leur confiance que vous m'avez toujours accordée.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Dr. **Labed Adnane** pour son suivi, ses directives, ses lectures, et ses critiques constructives, qu'ils ont été très précieuses pour la réalisation finale de ce mémoire.*

*Je remercie les membres de jury, les professeurs **Abd elhafidh moumni** - et **Miloud Zellouf** pour leur présence et pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer pour l'évaluation de ce travail*

Je remercie également tous mes enseignants durant tout mon parcours universitaire.

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

Résumé :

Ce travail présente une étude expérimentale du séchage solaire des produits agro-alimentaires (le piment vert et la menthe) en utilisant de systèmes de circulation d'air ; cycle ouvert et cycle fermé. L'objectif essentiel de ce travail est d'améliorer le temps de séchage.

Les courbes présentant le rendement thermique du CSP, la perte de masse, la vitesse du séchage et la teneur en eau du produit durant le processus de séchage ont été présentées.

Il s'avère des résultats qu'il est plus intéressant de sécher avec un séchoir solaire travaillant en cycle fermé et un débit d'air proche de $50\text{m}^3/\text{h}$.

Mots Clés : Séchage solaire, convection forcée, cinétique de séchage, piment verte ,menthe ,perte de masse, teneur en eau, vitesse de séchage, température.

ملخص:

يعتبر هذا العمل مساهمة في تحسين عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية و الغذائية. إذ يقدم دراسة تجريبية لطريقة جديدة للتجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية و قد ركزنا على دراسة تأثير عاملين و هما نظام دوران الهواء (مغلق و مفتوح) و تدفق هواء في عملية التجفيف.

هذه الدراسة التجريبية تمت باستعمال مجفف شمسي يعمل على الحمل الحراري المدعم. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين مدة التجفيف

من خلال رسم المنحنيات المتعلقة بالضياح في الكتلة و سرعة التجفيف و محتوى الماء و كذا درجة الحرارة لكل من الفلفل الأخضر و النعناع خلال عملية التجفيف. يتبين أن استعمال نظام مغلق لدوران الهواء مع تدفق $50\text{ م}^3/\text{سا}$ قد يقلص زمن التجفيف إلى 50 بالمئة.

الكلمات المفتاحية : التجفيف الشمسي , الحمل الحراري القسري , حركية التجفيف , الفلفل الأخضر , النعناع , الضياح في الكتلة , محتوى الماء , سرعة التجفيف , درجة الحرارة

ABSTRACT

This work presents an experimental study of solar drying of agri-food products (green pepper and mint) using air circulation systems; Open cycle and closed cycle. The main objective of this work is to improve the drying time.

The curves showing the thermal efficiency of the CSP, the loss of mass, the rate of drying and the water content of the product during the drying process were presented.

It turns out that it is more interesting to dry with a solar dryer working in closed cycle and an air flow close to 50m³ / h.

Keywords: Solar drying, forced convection, drying kinetics, green pepper, mint, mass loss, water content, drying rate, temperature.

Liste de tableaux

N°	Titre	Page
CHAPITRE I		
Tableau (I.1) :	Pertes de masse et temps de séchage de produits	23
	Agroalimentaires dans le Modèle direct (a) - et indirect (b).	16
CHAPITRE II		
Tableau (II.1):	Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct.	47
Tableau (II.2):	Avantages et inconvénients du séchoir solaire indirect.	51
Tableau (II.3):	Avantages et inconvénients du séchoir solaire hybride	53
CHAPIRE III		
Tableau (III.1) :	Avantages et inconvénients du séchage.	60

Liste de figures

N°	Titre	Page
CHAPITRE I		
Figure (I.1) :	Schémas des différentes configurations des CSPs étudiés	19
Figure (I.2) :	détail du capteur solaire utilisé et de la chambre de séchage	19
Figure (I.3) :	Teneur en eau (bs) du piment en fonction du temps de séchage comparaison des performances des séchoirs N2 et B2 avec la littérature.	20
Figure (I.4) :	Séchoir solaire direct à convection naturelle (SINGH)	21
Figure (I.5) :	Séchoir (a) direct et séchoir (b) indirect	21
Figure (I.6) :	Températures expérimentales dans le capteur à air (Séchoir indirect).	22
Figure (I.7) :	Représentation des courbes de perte d'humidité de différents Produits.	22
Figure (I.8) :	Schématisation des deux séchoirs étudiés.	24
Figure (I.9) :	Variation du rendement thermique des deux modèles étudiés.	25
Figure (I.10) :	Evolution de la teneur en eau du Henné en fonction du temps pour trois modes de séchage étudiés	25
Figure (I.11) :	Variation de la perte de charge en fonction du débit d'air des deux capteurs étudiés	26
Figure (I.12) :	Schéma de dispositif utilisé dans le travail.	26
Figure (I.13) :	Schéma descriptif des chicanes.	27
Figure (I.14) :	Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur en Fonction du temps.	27
Figure (I.15) :	Variation du rendement en fonction du paramètre réduit $(T_{fe}-T_a)/IG$.	28
Figure (I.16) :	Schéma descriptif du dispositif utilisé.	28
Figure (I.17) :	Schéma du séchoir solaire.	29
Figure (I.18) :	Distribution de l'humidité du produit.	30
Figure (I.19) :	Influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage.	30
Figure (I.20) :	Influence de la température d'entrée de l'air sur la vitesse de séchage	30

Figure (I.21) :	Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée (durant 32 h de séchage)	31
Figure (I.22) :	Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée durant 12 h de séchage.	31
Figure (I.23) :	L'influence de l'utilisation d'un appoint de chauffage sur L'humidité de produit (Avec un appoint de chauffage) (Sans appoint de chauffage).	32
Figure (I.24) :	Courbes de séchage des abricots.	33
Figure (I.25) :	Courbes de séchage (raisin, pêche, figue et prune).	33
Figure (I.26) :	Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau en base sèche.	34
Figure (I.27) :	Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.	34
Figure (I.28) :	Evolution de la masse volumique en fonction de la teneur en eau.	34
Figure (I.29) :	Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau.	34
Figure (I.30) :	La cinétique du séchage solaire d'une couche des abricots aux différents débits d'air [18].	35
Figure (I.31) :	Variation de taux d'humidité en fonction du temps pour les abricots	35
Figure(I.32) :	Dispositif expérimental	37
Figure (I.33) :	Mise sur claie des rondelles du produit à sécher	37
Figure (I.34) :	Variation des températures de l'ambiance et du ciel en fonction TSV Journée du 03/08/2016,	37
Figure(I.35) :	Variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée (simulée)	38
Figure (I.36) :	Variation du rendement instantané en fonction du débit d'air	38
Figure (I.37) :	Evolution de la teneur en eau à base sèche. $E_p = 10$ mm, capteur avec chicanes, journée du 01/08/2016.	39
CHAPITRE II		
Figure (II.1) :	types de circulation de l'air dans les capteurs plan à air.	42

Figure (II.2) :	Schéma d'un capteur solaire a absorbeur perméable.	43
Figure (II.3) :	Principales géométries d'absorbeur.	43
Figure (II.4) :	différents types d'absorbeurs poreux.	44
Figure (II.5) :	Principe de fonctionnement du capteur solaire plan.	45
Figure (II.6) :	Séchoir solaire direct.	46
Figure (II.7) :	Séchoir solaire coffre.	47
Figure (II.8) :	Le séchoir solaire intégral.	48
Figure (II.9) :	Le séchoir solaire coquillage à trois claies.	49
Figure (II.10) :	Séchoir solaire cabane.	50
Figure (II.11) :	Séchoir solaire indirect.	51
Figure (II.12) :	Séchoir solaire armoire.	52
Figure (II.13) :	Séchoir solaire hybride à convection forcée.	54
Figure (II.14) :	Séchoir hybride solaire à gaz.	55
Figure (II.15) :	Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1.	56
Figure (II.16) :	Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2	57
Figure (II.17) :	principe fonctionnement d'un séchoir solaire.	58

CHAPITRE III

Figure (III.1) :	Représentations graphiques des étapes de séchage.	62
Figure (III.2) :	Courbe de séchage $n_s=f(t)$	67
Figure (III.3) :	Courbe de séchage $dn_s/dt= f(t)$	67
Figure (III.4) :	Courbe de séchage $dn_s/dt= f(n_s)$	67

CHAPITRE IV

Figure(IV.1) :	Dispositif expérimental utilisé.	70
Figure (IV.2) :	Schéma du séchoir solaire utilisé.	70
Figure (IV.3) :	Feuilles de piment vert et de la menthe verte avant et après séchage	71
Figure (IV.4) :	Instruments de mesure	72
Figure (IV.5) :	Schématisation du processus de séchage en cycle ouvert	73
Figure (IV.6) :	Schématisation du processus de séchage en cycle fermé	74
Figure (IV.7) :	Variation du rayonnement solaire en fonction de temps (Journées de séchage du piment)	75

Figure (IV.8) :	Variation des températures (amb, de sortie, chambre de séchage) en fonction du temps (Journées de séchage de la menthe).	75
Figure (IV.9) :	Variation du rayonnement solaire en fonction du temps (Journée de séchage du piment)	76
Figure (IV.10) :	Variation des températures (amb, de sortie, chambre) en fonction du temps (Journées de séchage de la menthe)	77
Figure (IV.11) :	Variation du rendement en fonction du temps pour différents débits	78
Figure (IV.12) :	Variation du rendement en fonction de temps pour différents débits ($Qv1=25m^3/h$ et $Qv2=30m^3/h$).	78
Figure (IV.13) :	Evolution de la perte de masse en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) $V=2.5$ m/s.	79
Figure (IV.14) :	Evolution de la perte de masse en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) $V= 5$ m/s.	79
Figure (IV.15) :	Evolution de teneur en eau en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert). $V=2.5$ (m/s)	79
Figure (IV.16) :	Evolution de teneur en eau en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert). $v=5$ (m/s)	81
Figure (IV.17) :	Evolution de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (piment vert) $V=2.5m/s$.	81
Figure (IV.18) :	Evolution de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (piment vert) $V=5$ m/s	82
Figure (IV.19) :	Evolution du poids de la menthe en fonction du temps pour deux les deux cycles ($V=2.5m/s$).	83
Figure (IV.20) :	Evolution du poids de la menthe en fonction du temps pour deux les deux cycles ($V=5m/s$).	84
Figure (IV.21) :	Evolution de la perte de masse de la menthe en fonction du temps pour les deux systèmes ($v=2.5$ m/s).	84
Figure (IV.22) :	Evolution de teneur en eau de la menthe en fonction de temps pour les deux systèmes ($v=2.5$ m/s).	85
Figure (IV.23) :	Evolution de la vitesse de séchage de la menthe pour les deux systèmes ($v=2.5$ m/s).	86

Notation :

Symboles	Désignations	Unités
T	Température	K
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg _{eau} / Kg _(MS)
X _r	Teneur en eau du produit à base humide	kg _{eau} / Kg _(Mh)
X _f	Teneur en eau finale	kg _{eau} / Kg _(MS)
X _s	L'humidité absolue d'un solide	%
X _h	L'humidité relative d'un solide	kg _{eau} / Kg _(as)
M _s	Masse sèche du produit	kg
M _h	Masse humide du produit	kg
M _a	Masse du gaz	kg
M _e	Masse de l'eau	kg
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit	kg _{eau} / (Kg _(MS) .h)
V	Vitesse de l'air	m/s
H _r	Humidité relative	%
H _a	Humidité absolue	kg _{eau} / Kg _(as)
H _{as}	Humidité absolue de saturation	kg _{eau} / Kg _(as)
P _s	Pression de saturation	Pascal
P	Pression totale	Pascal
P _v	pression de vapeur	Pascal
P _{vs}	pression de vapeur saturante	pascal
H _r	Humidité relative	kg _{eau} /Kg _(as)
C	Compacité	m ² /m ³
A	Surface d'échange	m ²
A _w	l'activité de l'eau	
C	Fraction massique	

Lettres grecques :

α	coefficient d'absorption (rayonnement)	Sans
ε	coefficient d'émissivité (rayonnement)	Sans
λ	conductivité thermique	w/m.k
μ	viscosité dynamique	kg/m.s
ρ	masse volumique	kg/m ³
σ	constante de Stephan – Boltzmann	w/m ² .k ⁴
τ	coefficient de transmission (rayonnement)	sans
ψ	Degré de saturation	%

SOMMAIRE
INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Introduction générale.....	15
2. Référence.....	17

CHAPITRE N°1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	18
I.2 Etude bibliographique :.....	19
I.4 Référence	40

CHAPITRE N° II : LES SECHOIRS SOLAIRES

II.1 Introduction	41
II.2 Définition.....	41
II.3 Différents types des capteurs solaires plans à air	41
II.3.1 Les capteurs à absorbeur plan	42
II.3.2 Les capteurs à absorbeur perméable	42
II.3.3 Les capteurs à absorbeur à géométrie variable	43
II.3.4 Capteur à absorbeur poreux	44
II.4 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à	44
II.5. Les séchoirs solaires	45
II.6 La classification des séchoirs	45
II.6.1 Les séchoirs solaires directs	46
II.6.1.1 Type des séchoirs solaires direct	46
II.6.1.1.1 La boîte de séchage ou séchoir coffre.....	47
II.6.1.1.2 Le séchoir intégral à convection naturelle.....	48
II.6.1.1.3 Le séchoir coquillage.....	49
II.6.1.1.4 Le séchoir cabane.....	49
II.6.2 Les séchoirs solaires indirects.....	50

II.6.2.1 Type du séchoir indirect (le séchoir armoire).....	51
II.6.3 Les séchoirs hybrides	52
II.6.3.1 Type du séchoir hybride.....	53
II.6.3.1.1 Séchoir hybride à convection forcée	53
II.6.3.1.2 Le séchoir hybride solaire – gaz	54
II.6.4 Les séchoirs mixtes.....	55
II.7 principe fonctionnement des séchoirs solaires.....	57
II.8 Référence.....	59

CHAPITRE N° III : ETUDE THEORIQUE DE SECHAGE

III.1 Introduction.....	60
III.2 Définition	60
III.3 Avantages et inconvénients du séchage.....	61
III.4 Terminologie de séchage	61
III.4.1 Humidité.....	61
III.4.2 Taux d’humidité.....	61
III.4.3 États de siccité.....	61
III.4.4 Taux d’humidité à l’équilibre.....	61
III.4.5 Corps hygroscopique.....	62
III.5 Les caractéristiques de l’air de séchage.....	63
III.5.1 Humidité absolue.....	63
III.5.2 Humidité relative	63
III.5.3 Degré de saturation (Arditti 1972).....	63
III.5.4 Température humide du gaz	63
III.6 Caractéristiques des solides humides	64
III.6.1 Humidité absolue.....	64
III.6.2 Humidité relative.....	64
III.7 Mode de séchage.....	64
III.7.1 Séchage par convection	64

III.7.2 Séchage par conduction	65
III.7.3 Séchage par rayonnement	65
III.7.4 Séchage par perte diélectrique	66
III.7.5 Lyophilisation.....	66
III.7.6 Séchage a l'air libre.....	66
III.8 Cinétique de séchage	66
III.8.1 Périodes de séchage.....	68
III.8.1.1 Phase initial (A-B).....	68
III.8.1.2 Période (b-c)	68
III.8.1.3 Phase à vitesse de séchage décroissante (CD)	68
III.9 Référence	69

CHAPITRE N° IV : RESULTATS DE DISCUSSION

IV.2. Description du dispositif expérimental	70
IV.2.1 Description du capteur solaire.....	70
IV.2.2 La chambre de séchage	71
IV.3 Produits séchés	72
IV.3.1 La menthe verte	72
IV.3.2 le piment.....	72
IV.3.3Préparation du produit	73
IV.4 Instruments de mesure	74
IV.5 Protocole expérimentale	75
IV.6 Etude des performances du CSP en fonction du débit.....	76
IV. 7 Etude de la cinétique de séchage des différents produits pour les deux cycles	80
IV.7.1 Cas du piment.....	80
IV.7.2 Cas de la menthe.....	85

CONCLUSION GENERAL

INTRODUCTION

GENERAL

Introduction général

Le potentiel en énergie solaire thermique en Algérie, représente 60 fois des besoins énergétiques de l'Europe de l'ouest, selon le ministère Algérien de l'énergie. Ce même potentiel représente quatre fois la consommation énergétique mondiale d'après NEAL (New Energy Algeria).[1]

L'énergie solaire nous permet la construction de systèmes indépendants (autonomes). Néanmoins, nous pouvons dire que cette énergie possède un mode de conversion thermique sans concentration. La mise en œuvre pour la récupération de cette énergie nécessite une technologie simple et qui peut s'adapter simplement au site et à la région considérée et dans de très nombreuses utilisations.[2]

Les capteurs solaires plans à air ont pour but la transformation de l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans l'insolateur. Cette énergie est ensuite utilisée dans diverses applications, à savoir ; le chauffage des habitations, le chauffage de l'eau sanitaire, le séchage des produits alimentaires etc. [3]

C'est dans ce contexte précis que nous nous intéressons dans ce travail à l'étude de cette chaîne énergétique. Pour ce faire nous avons procédé à la mise en place d'un séchoir solaire monobloc à double passage d'air avec trois (03) claies horizontales.

L'objectif de ce travail, est d'étudier l'influence de quelques paramètres sur le séchage de quelques produits agro-alimentaires tels le piment vert et la menthe. L'intérêt est porté sur l'étude de l'influence du débit d'air et de l'application des cycles ouvert et fermé sur le temps du séchage.

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

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique du processus de séchage et des différentes recherches sur les procédés utilisés.

Le deuxième chapitre est réservé à l'établissement des différents types d'un capteur solaire à air, leurs principes fonctionnement ainsi qu'aux différents types des séchoirs solaires et leurs principes de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre nous présentons quelques notions théoriques sur le séchage.

Les résultats expérimentaux et leurs interprétations sont présentés dans le quatrième chapitre.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats expérimentaux de ce travail.

Références

- [1] Labed, A, et al, « Etude expérimentale de l'efficacité d'une nouvelle forme de rugosité artificielle sur les performances d'un capteur solaire plan à air-application au séchage du Henné. », *Premier Séminaire Nationale de Génie Mécanique, 7–8 December, Biskra, Algeria.* 2011.
- [2] Labed A., Moumami N., Aoues K., Zellouf M., Moumami A, « *Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle* », *Revue des Energies Renouvelables* 12: (2009) 551-561.
- [3] Labed A., Moumami N., Benchabane A, « *Experimental investigation of various designs of solar dryer: Application for the drying of hot chili* », *Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, 29au 1^{er} juin 2012, Istanbul, Turkey.*

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



Introduction :

Depuis les premiers travaux de **W.K Lewis** et **T.K Sherwood** la technique de séchage a fait l'objet de nombreuses communications scientifiques et demeure encore de nos jours un domaine de recherche privilégié notamment dans les pays où l'utilisation des méthodes de séchage solaire s'imposent toujours.

Des efforts considérables ont été faits pour développer les séchoirs solaires pour le séchage des produits agricoles. Un grand nombre de configurations de séchoirs solaires avec les détails, de capacité et de coûts des produits secs ont été présentés. Une comparaison de leurs performances et domaines d'application ont été entreprises [4].

I .1. Présentation de quelques travaux antérieurs sur le Séchage solaire :

Dans cette partie, nous en citons seulement quelques travaux sur le séchage et les séchoirs solaires :

Commençons par l'étude de **Labed et al [5]**, réalisé à l'université de Biskra pour l'étude des performances de six (06) configurations de capteurs solaires plans à air. Ces capteurs se différencient par le sens de l'écoulement (direction d'entrée) ; vers le haut ou vers le bas ainsi que le type de chicane monté dans la veine d'air mobile (Fig. 1). Il s'avère à travers les résultats expérimentaux que le capteur muni de chicanes trapézoïdales, avec un écoulement dirigé du haut vers le bas (B2), présente le meilleur rendement thermique. Ce dernier capteur a été utilisé pour des applications de séchage du piment vert (Fig. 2). Les résultats sont comparés avec ceux de Hossain et Bala (2007), Mohanraj et Chandrasekar (2009) et ceux issus du capteur sans chicane avec écoulement dirigé vers le bas (N2). Il est clair que les deux capteurs réalisés à l'université de Biskra présentent un meilleur temps de séchage (Fig. 3).

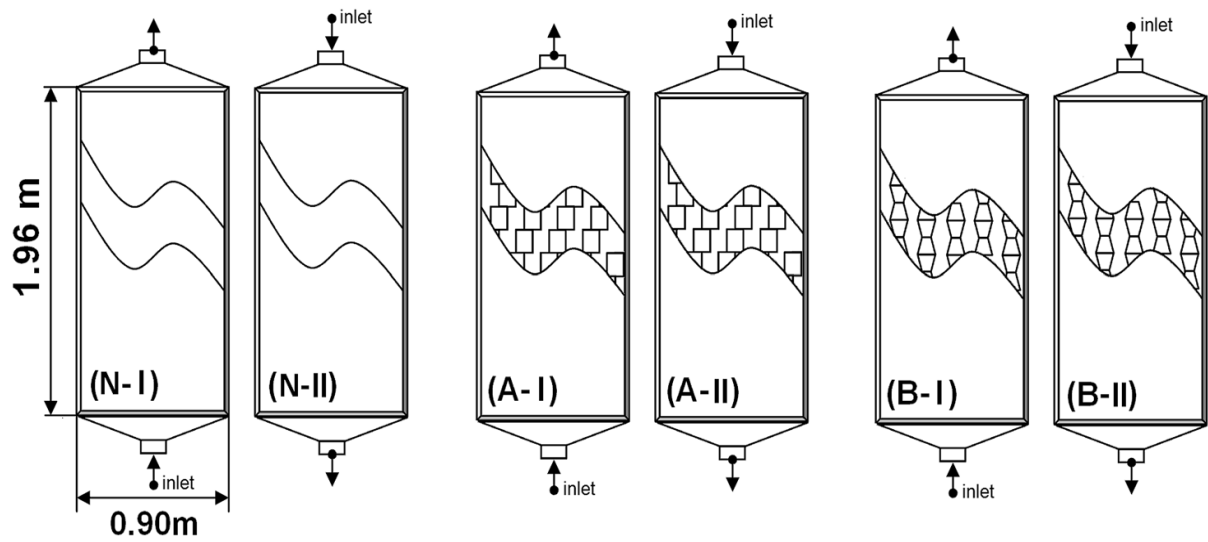


Figure. I.1 : schémas des différentes configurations des CSPs étudiés [5]

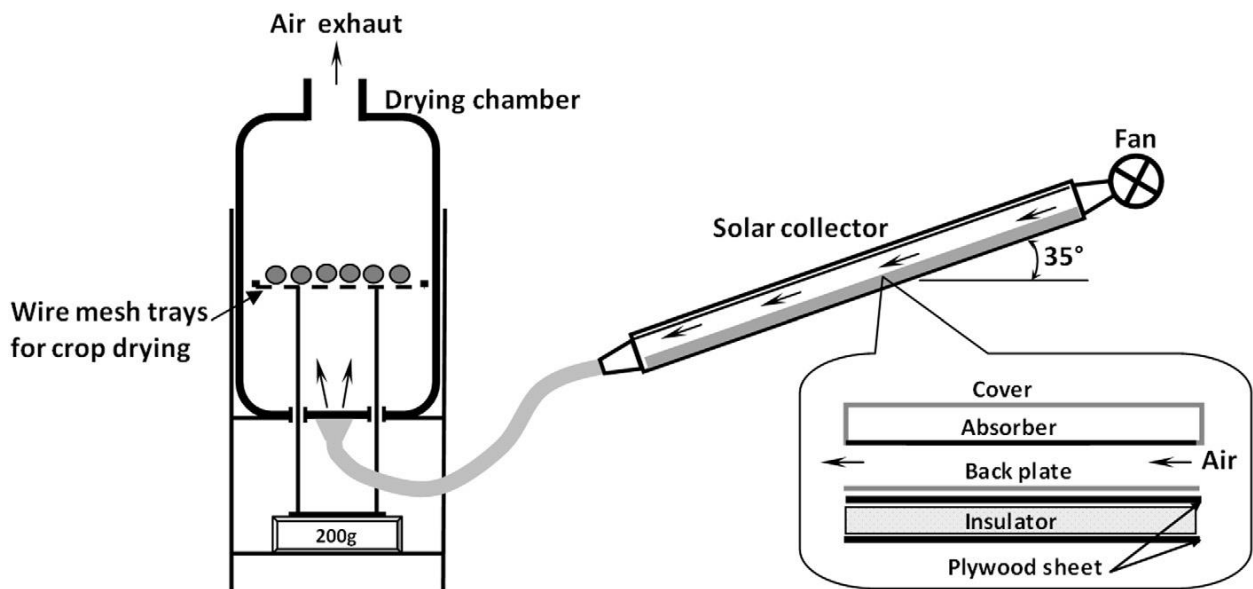


Figure. I.2 : détail du capteur solaire utilisé et de la chambre de séchage. [5]

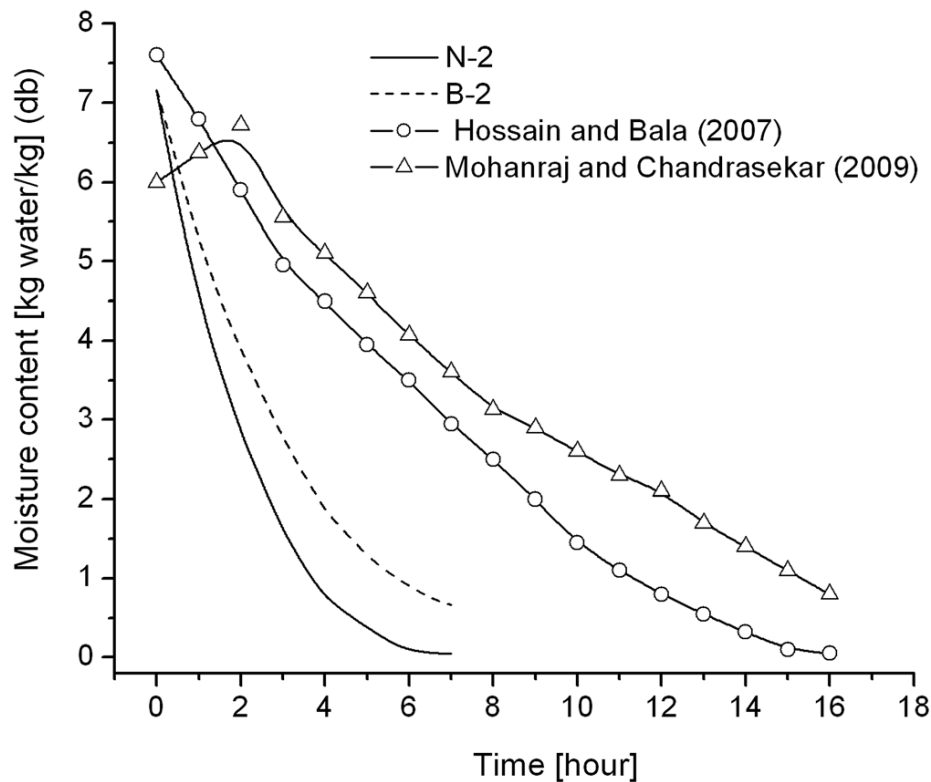


Figure. I.3 : Teneur en eau (bs) du piment en fonction du temps de séchage ; comparaison des performances des séchoirs N2 et B2 avec la littérature.[6]

La convection naturelle au sein d'un d'un séchoir de type tunnel a fait l'objet d'une étude expérimentale par **SINGH** [6]. L'auteur a étudié l'effet des faibles vitesses de l'air asséchant engendrées par la convection naturelle, ainsi que la différence de niveau entre le haut et le bas du séchoir (Fig. I.2). Ces conditions ont causé des températures trop élevées qui risqueraient de détériorer le fruit. Le temps de séchage était six heures les premiers jours (Fig. I.3). L'auteur a remarqué qu'au début de séchage ; la vitesse de séchage est supérieur dans les premières claies, puis elle devient supérieur dans les dernières claies. Ceci est attribué à la porosité qui se produit au sein des fruits.

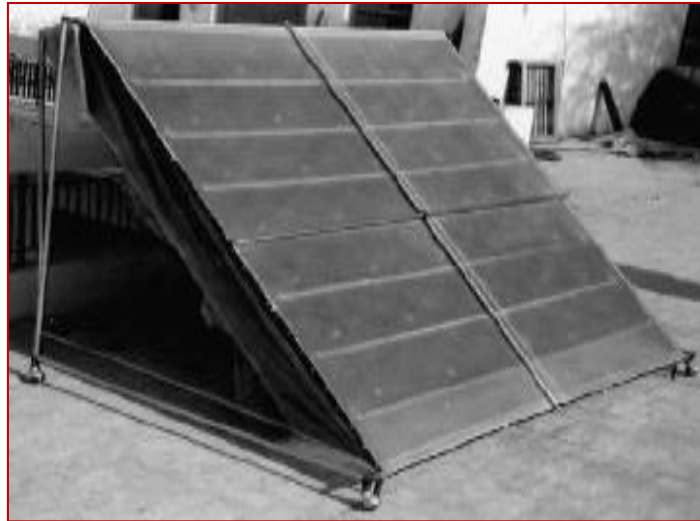


Figure. I.4 : séchoir solaire direct à convection naturelle (SINGH) [6].

Dans l'étude de **R. BENKHELFELLAH** et al [7] les auteurs ont étudiés expérimentalement la cinétique de séchage de quelques produits agroalimentaires. Le banc d'essais comprend un séchoir direct et un système de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux de granite peint en noir, ce système a été comparé à un autre séchoir indirect.

D'après les résultats ; le gain en temps de séchage est de 2 à 5 fois en comparant avec le séchage à l'air libre (Figs. I-6 et 7)



Figure. I.5 : (a) séchoir direct

(b) séchoir indirect [7]

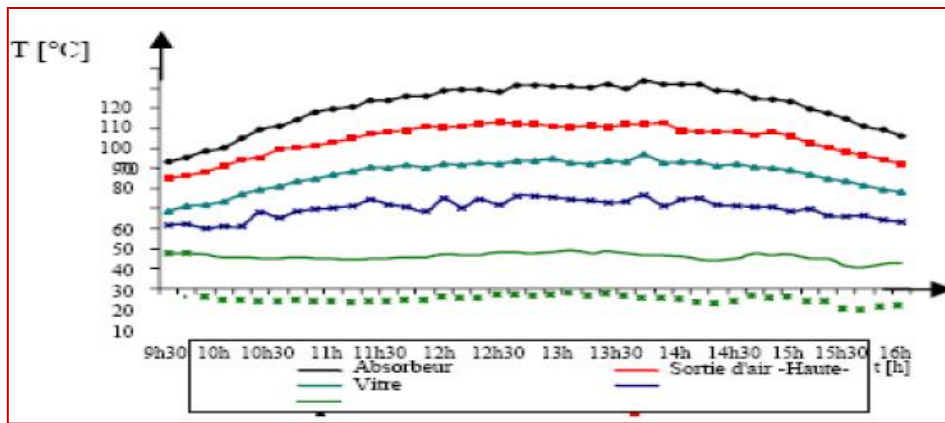
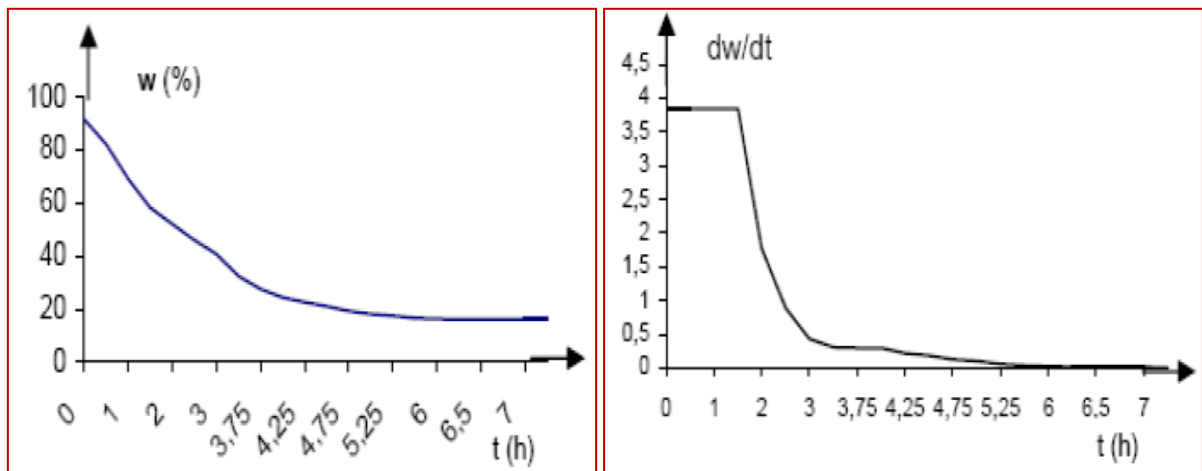
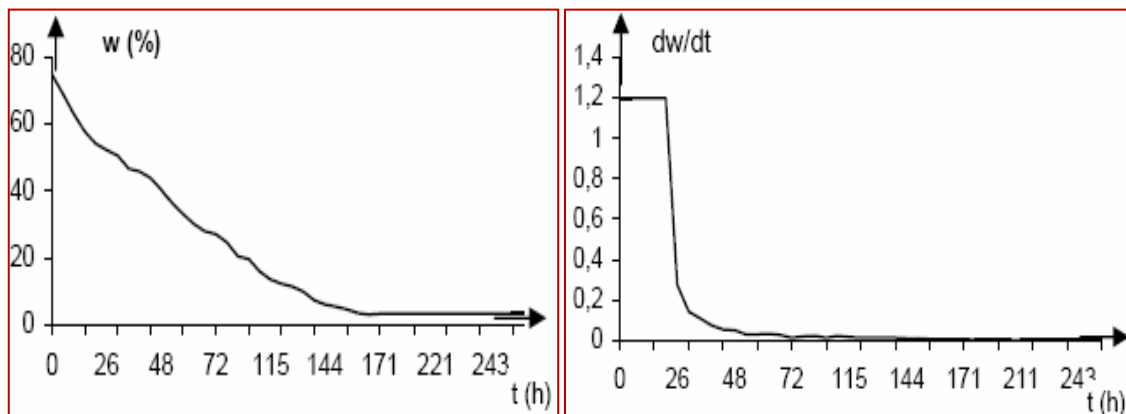


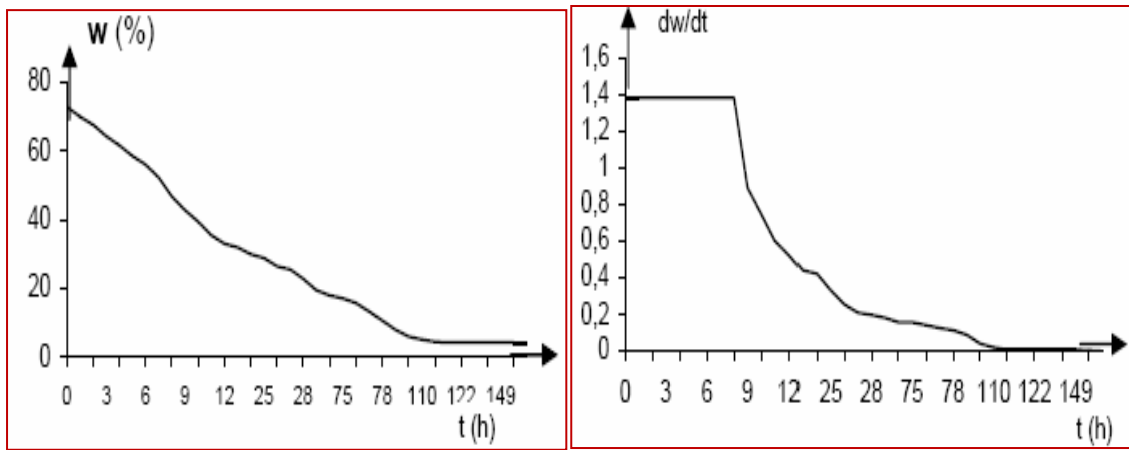
Figure. I.6 : Températures expérimentales dans le capteur à air (séchoir indirect). [7]



Variation de l'humidité relative et vitesse de séchage de la menthe



Variation de l'humidité et vitesse de séchage du raisin.



Variation de l'humidité et vitesse de séchage de la banane.

Figure. I.7 : Représentation des courbes de perte d'humidité de différents produits. [7]

Tableau. I.1 : pertes de masse et temps de séchage de produits agroalimentaires dans le Modèle direct (a) - et indirect (b). [7]

-a-

Produits	Masse Initiale (g)	Masse finale (g)	% d'humidité extraite	Temps de séchage (heures)
Menthe	1000	83	83%	8
Verveine	1000	430	67%	48
Laurier	1000	427	64%	28
Banane	1000	271	73%	144
Raisin	1000	251	75%	268
Prune	1000	277	72,3%	175
Piment	1000	307	70%	72
Figues	1000	205	77,2%	219
Datte	1000	846	15,4%	214

Plusieurs études ont été faites sur différents types de séchoirs solaires indirects, ainsi que sur la réalisation des capteurs solaires, parmi, on cite le travail de [Labeled et al. 2016] [8]. Ce travail porte sur l'étude et la conception d'un séchoir solaire destiné au séchage des produits agro-alimentaires.

Dans cette dernière étude, les auteurs ont comparé entre les performances de deux séchoirs solaires pour l'amélioration du séchage du Henné

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, qui montrent l'efficacité thermique des deux capteurs, la perte de masse du produit, sa teneur en eau et sa vitesse de séchage lors du processus de séchage par ces deux modèles.

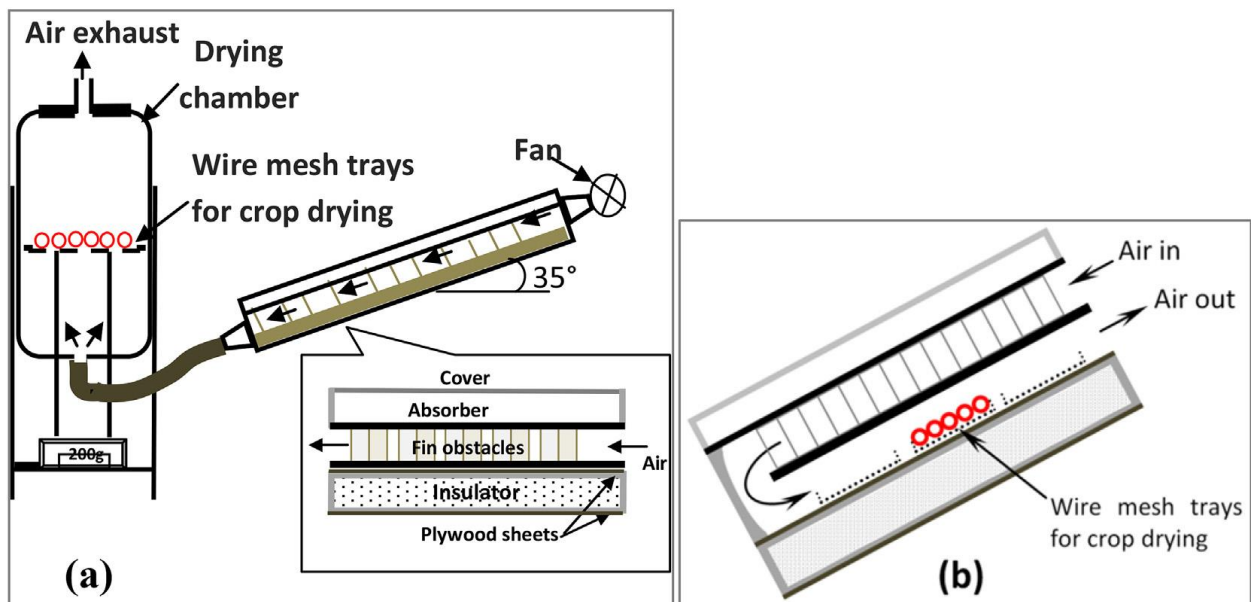


Figure I.8 : schématisation des deux séchoirs étudiés [8].

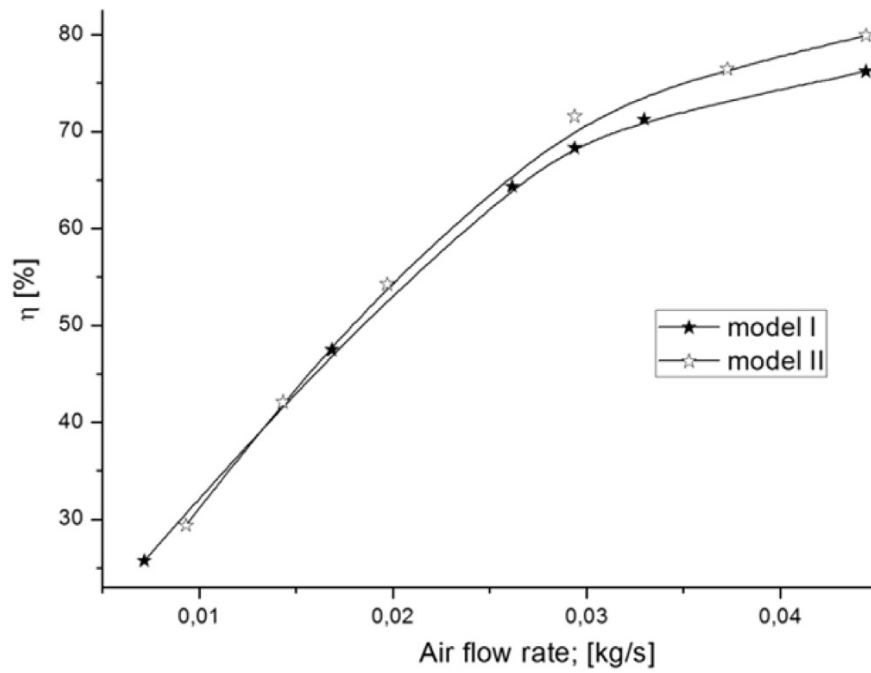


Figure I.9 : variation du rendement thermique des deux modèles étudiés [8].

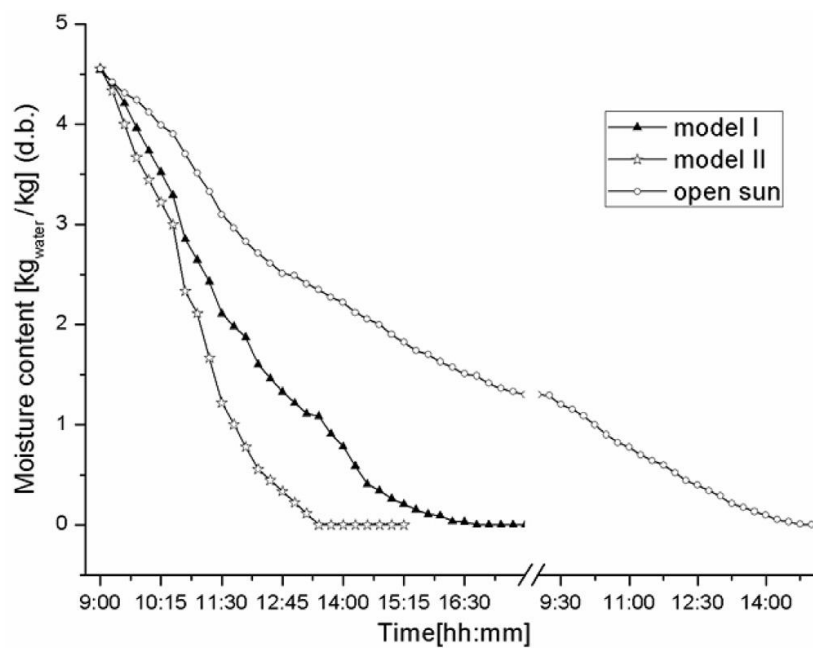


Figure I.10 : Evolution de la teneur en eau du Henné en fonction du temps pour trois modes de séchage étudiés [8].

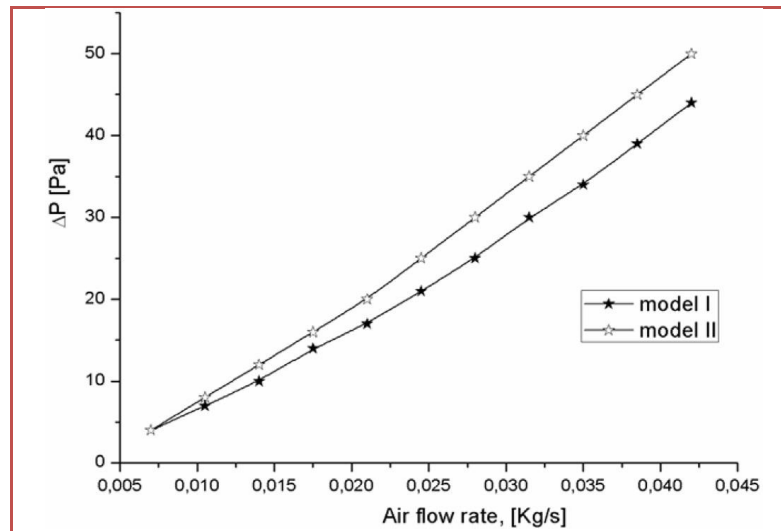


Figure I.11 : variation de la perte de charge en fonction du débit d'air des deux capteurs étudiés [8].

L'amélioration des performances thermiques des capteurs solaires à air, a fait l'objet d'une étude expérimentale réalisée en 2009 par **Aoues al.** [9] (Fig. I-12 et 13). Les auteurs ont présenté une série d'expériences menés sur un capteur solaire plan. les conditions climatiques ainsi que, le débit d'air et les températures ambiante, de l'air à l'entrée et à la sortie ont été enregistrés (Fig. I-14). Le capteur a été muni de rugosités artificielles de différentes formes et différents arrangements dans le canal d'écoulement de l'air. Les résultats montrent que le rendement thermique de la configuration A-2 est meilleur que celui de la configuration A-1 (Fig. I-15).

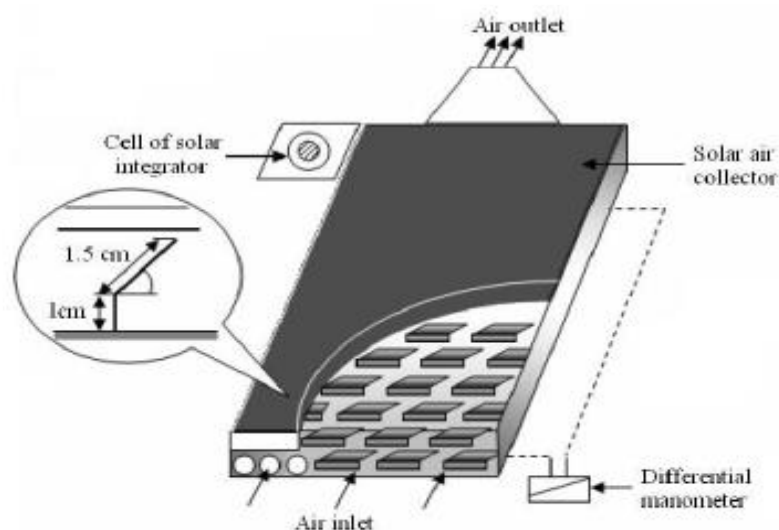


Figure I.12 : schéma de dispositif utilisé dans le travail de [9]

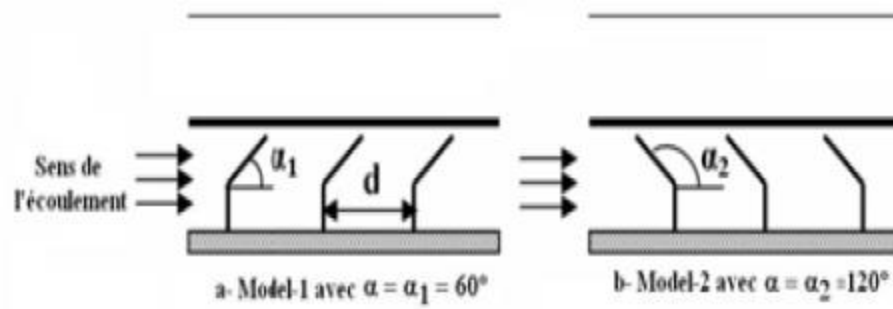
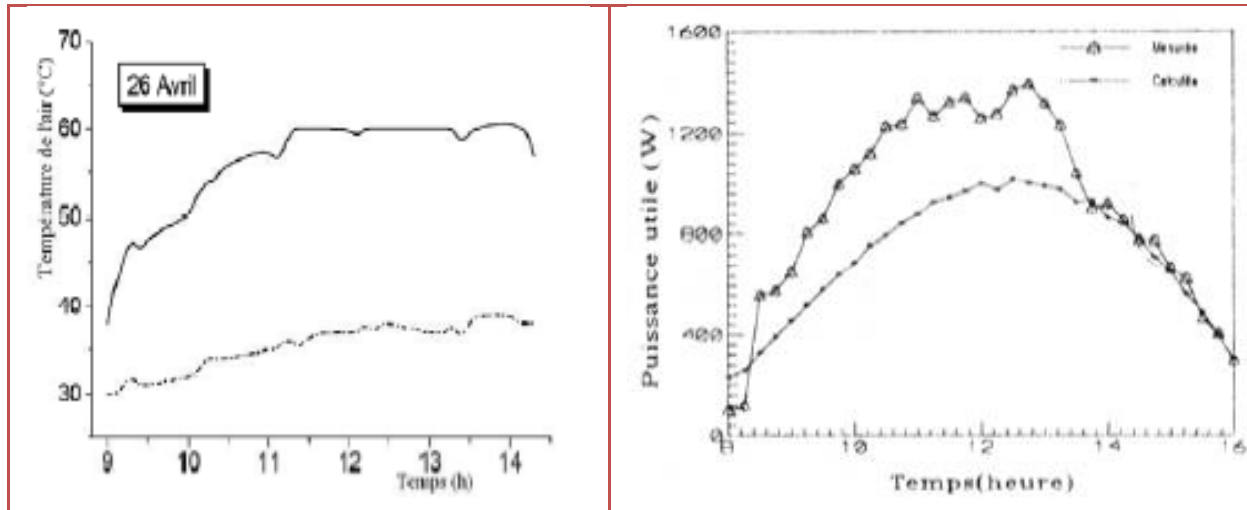
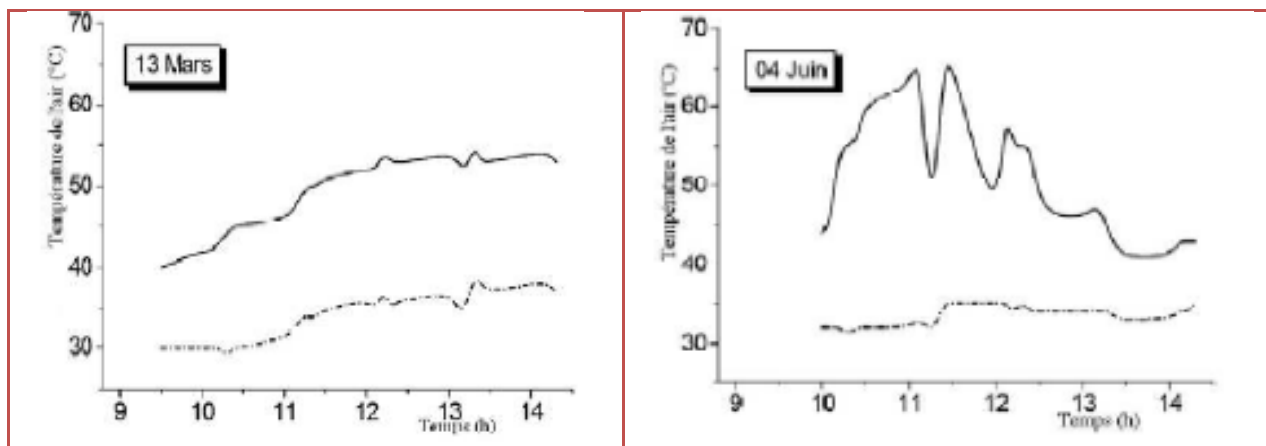


Figure I.13 : Schéma descriptif des chicanes.



Configuration A1

Configuration A2



Configuration A3

Configuration A4

Figure I.14 : Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur en fonction du temps [9].

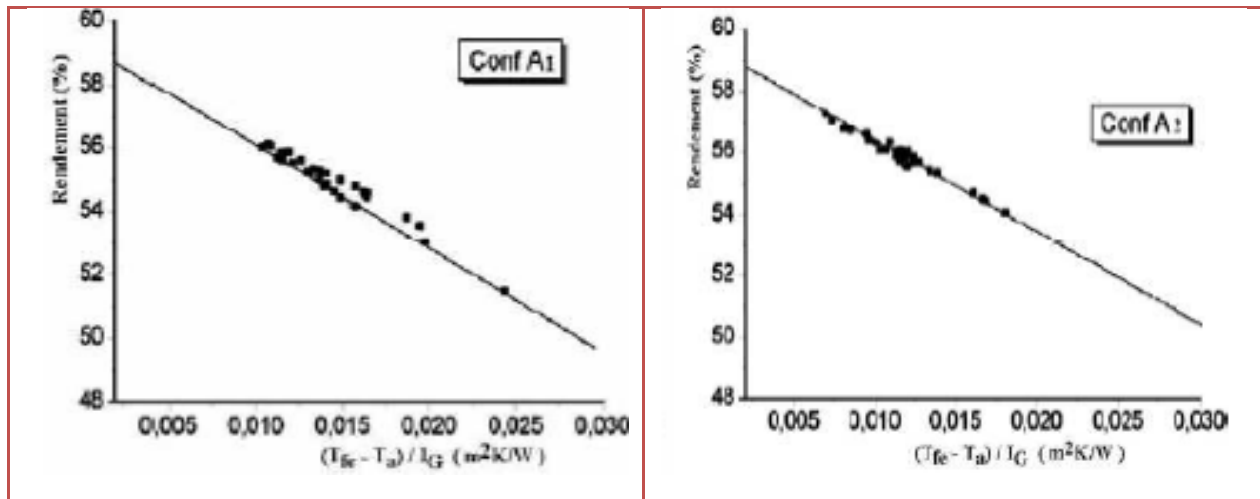


Figure I.15 : Variation du rendement en fonction du paramètre réduit $(T_{fe}-T_a)/IG$ [9].

L'étude de **Boulemtafes et Semmar** [10], sur un capteur solaire à air couplé à une enceinte de séchage dont le but de réaliser des expériences sur le séchage indirect des fruits et légumes.

Le séchoir comprend une boîte parallélépipédique alimentée en air chaud par CSP à air (Fig. 1-16)

L'étude des différents paramètres physiques caractérisant le processus de séchage a permis de classer les différents produits agroalimentaires qui peuvent être séchés dans ce séchoir.

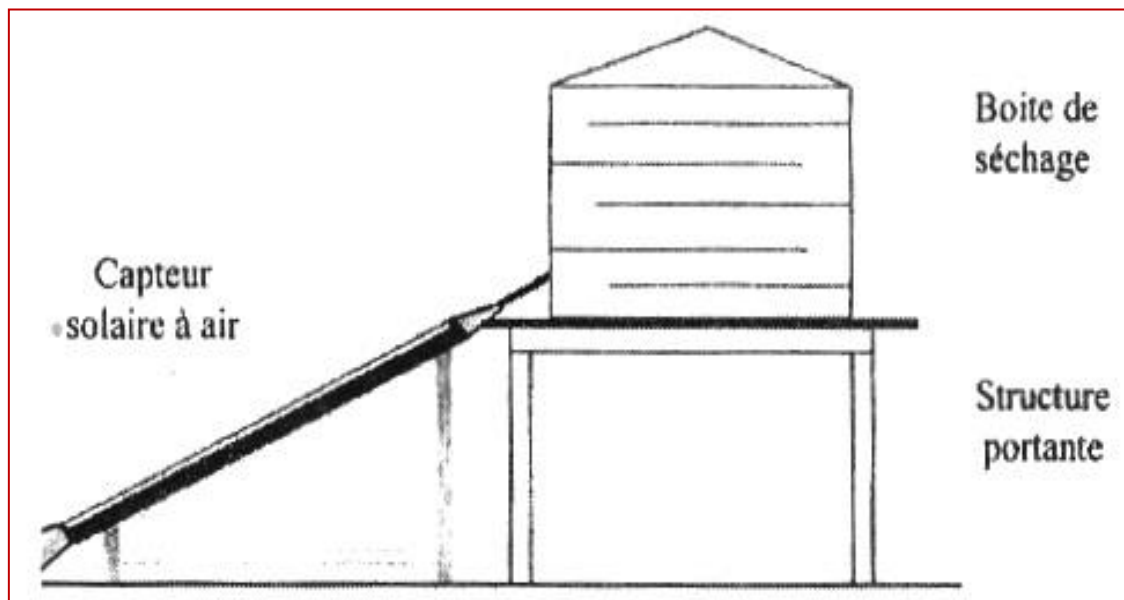


Figure I.16 : Schéma descriptif du dispositif utilisé [10].

Dans le tableau ci-dessous les auteurs ont présenté une fiche technique de la boîte de séchage :

Matériau Entièrement en tôle galvanisée 5/10°

Dimensions extérieures :

Hauteur - Largeur – Profondeur 1 m x 0,7 m x 0,7 m

Isolation Laine de verre

Volume utile = 0.490 m³

Nombre et dimensions de claies 5 - 0,65 m x 0.65 m

Surface de séchage 0,422 m²

Rapport surface/volume 0.862

Chargement Porte à double battant située sur la face arrière de la boîte de séchage

Tableau I.2 : Fiche technique de la boîte de séchage [10]

M. A. Hossain et al [11] ont modélisé les échanges convectifs dans un séchoir tunnel en tenant compte du transfert thermique dans le capteur et le transfert couplé de chaleur et de masse dans l'ensemble de l'unité de séchage. Un ensemble d'équations a été développé pour prévoir les températures de couverture, de l'absorbeur et celle de l'air dans le canal d'écoulement et un ensemble d'équations partielles ont été développées pour prévoir les températures d'air et de piments et la teneur en eau lors du séchage du piment vert dans le séchoir solaire.

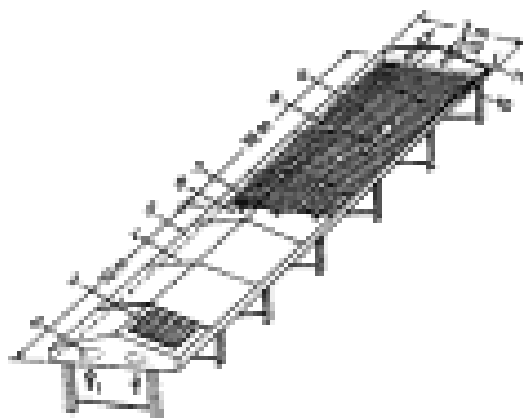


Figure I.17 : Schéma du séchoir solaire [11]

Lyes Aissani [12] a expérimenté le processus du séchage solaire des fruits et légumes. Il a étudié la variation de la teneur en eau au cours du processus de séchage (Fig. I.18).

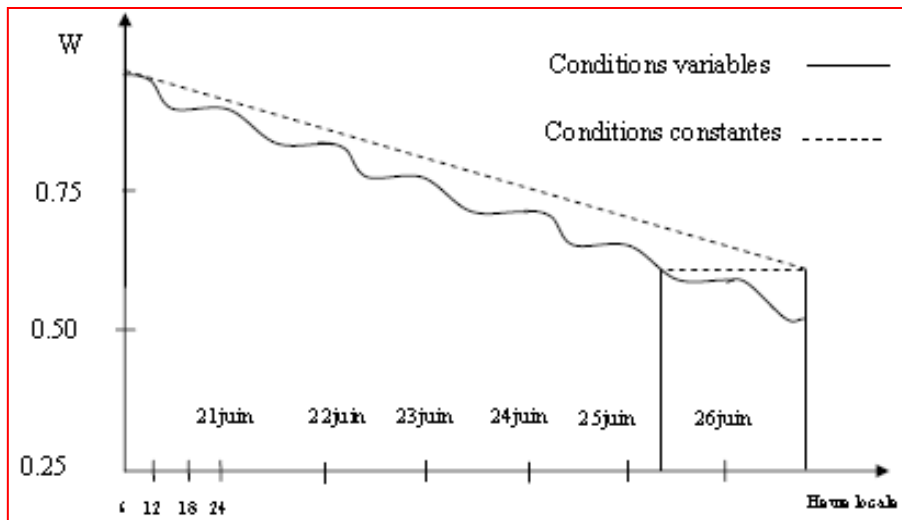


Figure I.18 : Distribution de l'humidité du produit.

ZEGHMATI- [13] a combiné deux types de séchage : séchage direct et séchage indirect. L'inconvénient est la crainte d'une surchauffe qui détériorerait le produit (la pomme Golden). Les figures (I.19) et (I.20) représentent des courbes obtenues à l'issue de cette étude :

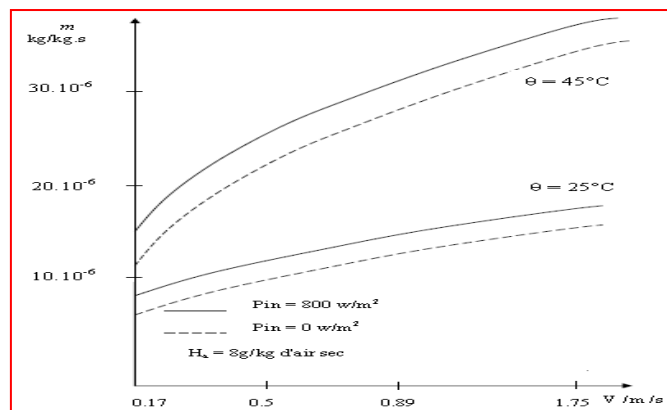


Figure I.19 : Influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage.

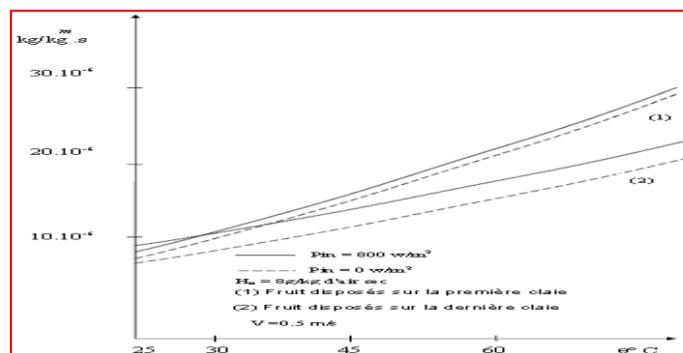


Figure I.20 : Influence de la température d'entrée de l'air sur la vitesse de séchage.

A.A. El-Sebaili et al. [14], ont présenté une série d'expériences sur le séchage des figues dans un séchoir solaire indirect. Le produit été découpé en tranche et traité chimiquement avant le séchage pour augmenter l'évaporation de l'humidité à l'intérieur du produit et par conséquent le temps de séchage va diminuer. Les résultats obtenus par cette étude, montrent que le séchage des figues dans l'état normal, diminue sa valeur initiale de la teneur en eau, jusqu'à la valeur de l'humidité d'équilibre après 32 h (figure I.21), mais la même masse des figues atteint la même valeur après seulement 12 h (figure I.22), quand les échantillons sont coupées et traitées. Ils ont remarqué aussi, que la dimension du produit est le facteur principal qui influé sur le processus de séchage solaire.

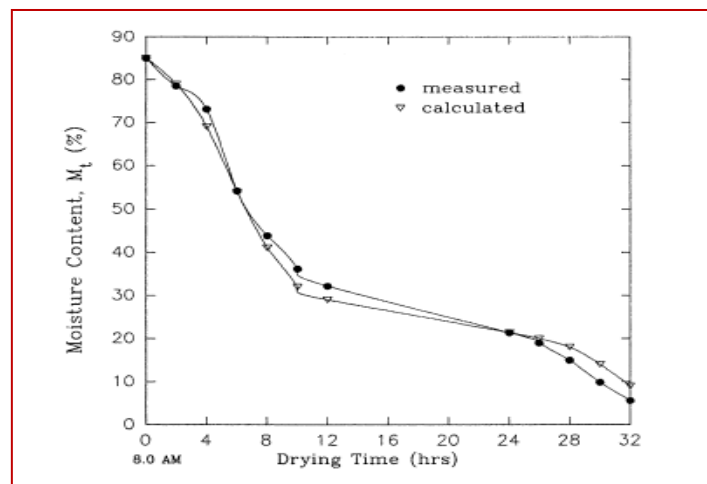


Figure I.21 : Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée (durant 32 h de séchage)

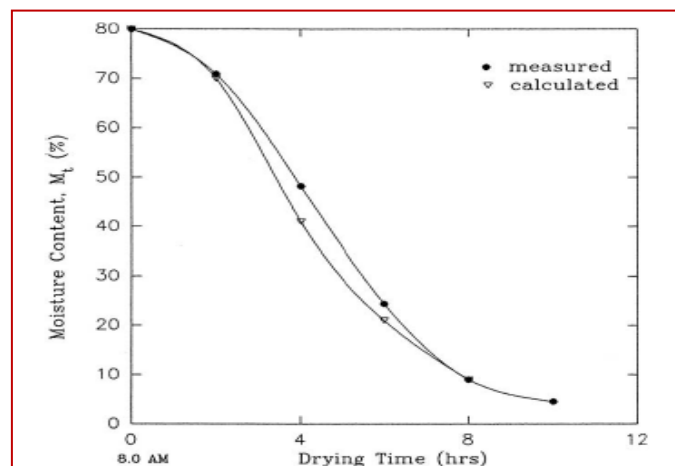


Figure I.22 : Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée durant 12 h de séchage

L'étude de **Bennamoun.L et al. [15]**, montrent l'importance du séchage solaire utilisant l'appoint de chauffage par rapport au séchage sans appoint, dans un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée, pour sécher les oignons. La conclusion de ces résultats ont montré que la teneur en eau du produit sans utilisation d'appoint de chauffage n'a pu atteindre la valeur voulue en fin de séchage, par contre la teneur en eau du produit avec utilisation d'appoint atteint la valeur voulue, un gain de temps de séchage est obtenu, il est évalué peu après 15 h en général. L'utilisation d'un appoint peut réduire considérablement le temps de séchage voir figure I.23.

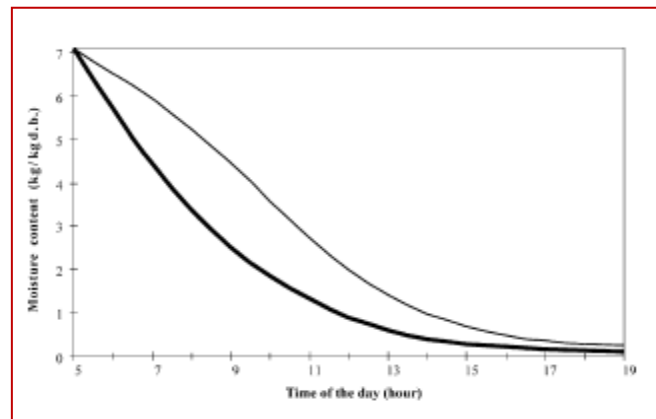


Figure I.23: L'influence de l'utilisation d'un appoint de chauffage sur l'humidité de produit [15]
(Avec un appoint de chauffage) (Sans appoint de chauffage)

Une autre étude expérimentale a été réalisée par **Inci Türk Togrul et al [16]**, sur le comportement de séchage des raisins, pêches, figes et prunes à l'aide d'un séchage naturel, dont une plage de température ambiante de 27°C à 43 °C et le rayonnement solaire de 0.72 MJ/m²h à 2.93 MJ/m²h. Les courbes de taux de séchage de ces fruits n'ont contenu aucune période de taux constant, mais ont montré une période de taux de chute. (figures I.24 et I.25). Douze modèles mathématiques ont été examinés pour adapter le taux de séchage des fruits. Parmi ces modèles, l'approximation du modèle modifié de Henderson et de Pabis utilisé pour l'abricot traité, le raisin et la prune, et le modèle donné par Verma appliqué à la pêche. Les modèles choisis ont été également étudiés par multiples essais statistiques. Les résultats obtenus par ces essais ont également une bonne concordance avec les modèles choisis.

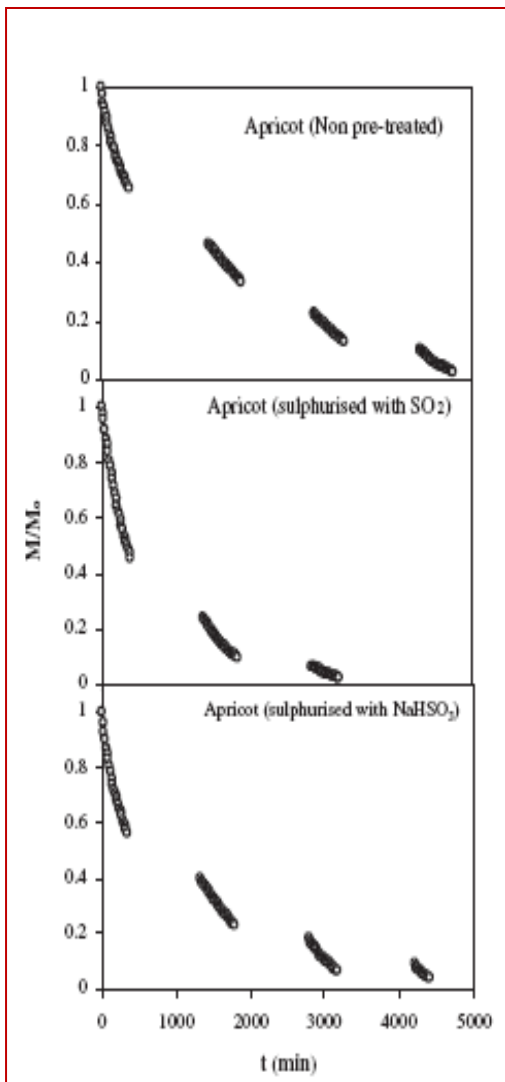


Figure I.24: courbes de séchage
des abricots [16]

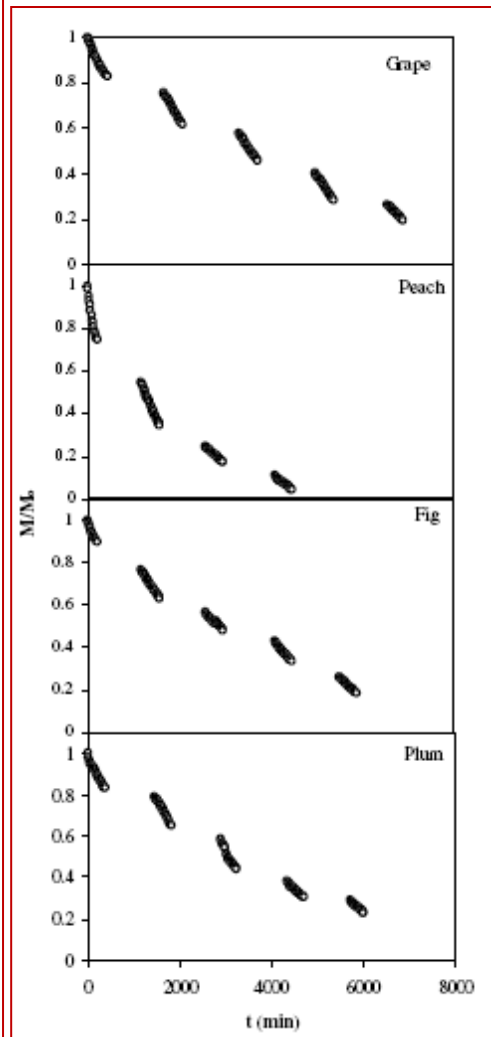


Figure I.25: courbes de séchage
(raisin, pêche, figue et prune) [16]

J.NGANHOU et al [17] ont étudié théoriquement le séchage solaire des fèves de cacao. Le système de séchage était constitué d'un capteur solaire multi-passes couplé à une unité de séchage de type statique parcourue par un courant d'air en convection forcée. Ci-dessous quelques résultats issus de cette étude :

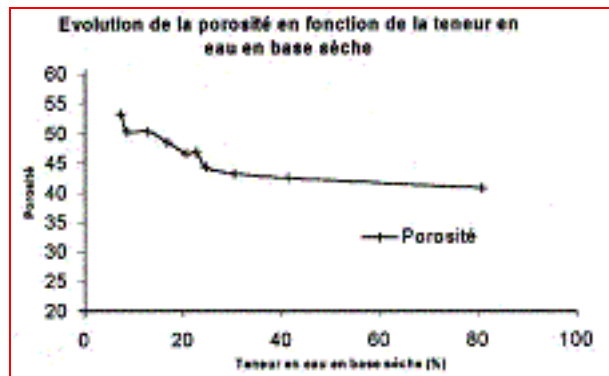


Figure I.26: Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau en base sèche.[17]

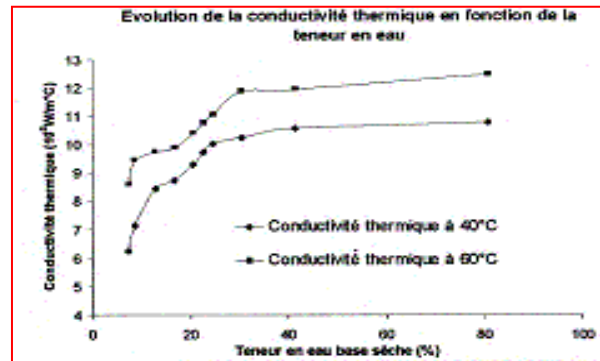


Figure I.27: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.[17]

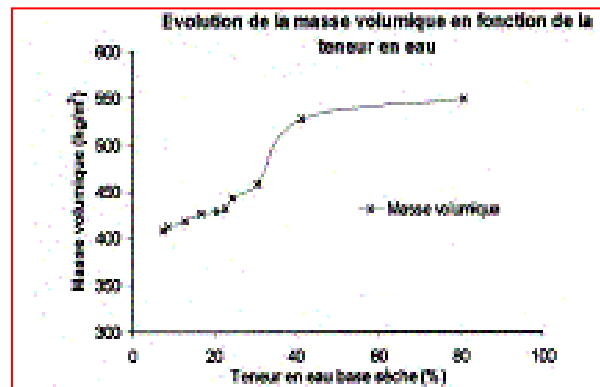


Figure I.28: Evolution de la masse volumique en fonction de la teneur en eau.[17]

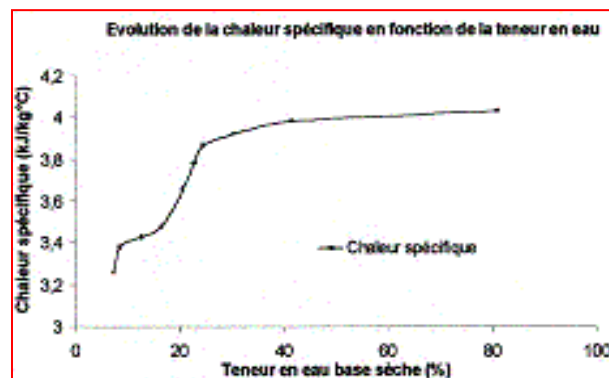


Figure I.29: Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en eau.[17]

L'étude expérimentale de **Inci Türk Togrul et al [18]**, a porté sur la cinétique de séchage solaire des abricots, dans un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée, qui comprend un capteur solaire de type concentrateur conique. L'effet de plusieurs paramètres d'entrée a été étudié ; la température de l'air (50 à 80 °C), et différents débit massique de l'air à la chambre de séchage (50, 60 et 70 kg/h).

Les résultats ont montré que les abricots sèchent 2 fois plus vite dans un séchoir solaire qu'à l'air libre selon l'augmentation des taux de séchage, c'est-à-dire que les niveaux de séchage finaux sont réalisés dans 68-78 h dans un séchoir solaire, alors qu'il prend environ 112 h en plein air. Voir les courbes des figures I.29 et I.30

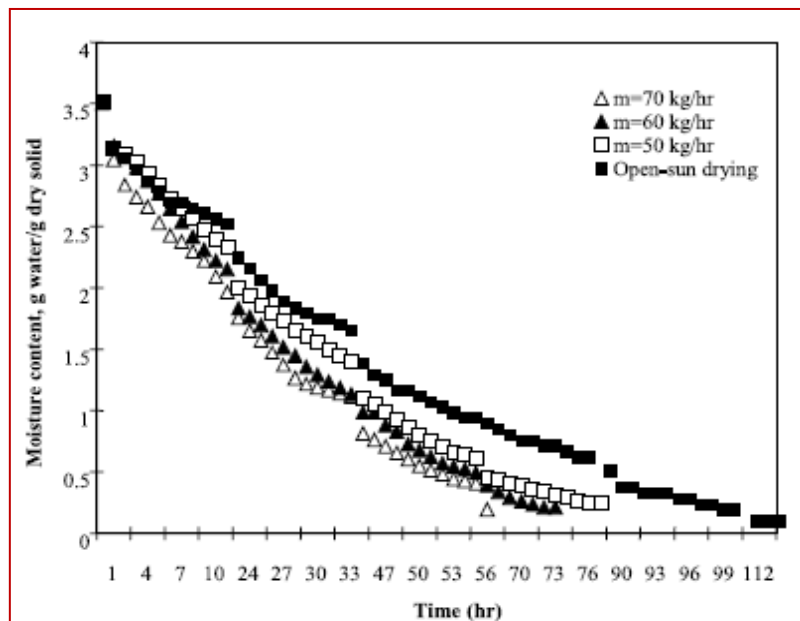


Figure I.30 : La cinétique du séchage solaire d'une couche des abricots aux différents débits d'air [18].

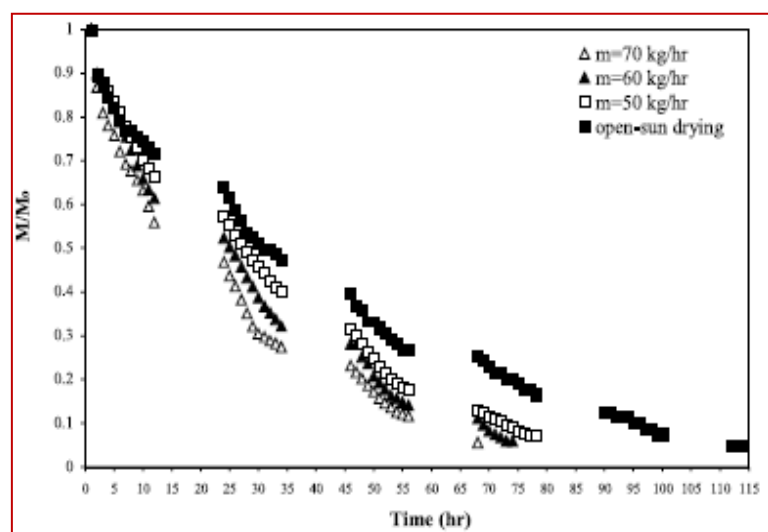


Figure I.31 : variation de taux d'humidité en fonction du temps pour les abricots [18].

Le travail de Manaa S [19] porte essentiellement sur une analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insolateurs plans munis d'ailettes (Fig. I.31), pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques. Il s'agit de l'effet de l'abjection des chicane de forme géométrique rectangulaire sur l'efficacité d'un capteur solaire destiné au séchage d'un produit alimentaire produit localement en grande quantité et qui nécessite des conditions de stockage particulières (Fig. I.32).

L'analyse a permis de regrouper les performances thermiques des différentes configurations étudiées sous l'influence des paramètres caractéristiques relatifs au système. Il ressort que la présence de chicane dans la veine dynamique conduit à des performances meilleures que pour le cas d'un capteur à canal lisse.

Il ressort des valeurs enregistrées que la température de l'absorbeur garnis des chicane est plus élevée que dans le cas d'absence des chicane. Et que d'après les valeurs enregistrées, le rendement thermique du collecteur est important pour des valeurs importantes du débit du fluide caloporteur. Ainsi, le rendement obtenu par la simulation est celui obtenu expérimentalement sont très proches. Un gain de 10% est enregistré dans le cas d'une couverture transparente d'épaisseur de 3 mm par rapport à une autre de 6 mm.

Il s'avère que le séchage solaire comme procédés a pu être réalisé grâce à l'installation conçue et les expériences menées. Le but du séchage étant la conservation de longues durées des produits agro-alimentaires, la tomate locale d'Adrar est étudiée. Deux paramètres essentiels pour le procédé de séchage sont mis en évidence : influence du débit et du poids du produit sur les différents paramètres liés au processus.

Le séchage de 3kg de tomates coupées en rondelles d'épaisseurs 10 mm pour un débit de 60m³/h se sèchent totalement après 7h ce qui nous fait un gain de 01 h dans le cas des lamelles d'épaisseurs de 15 mm et gain de temps de 04h30mn dans le cas des rondelles d'épaisseurs de 20mm.

Le séchage des rondelles de tomates mises dans la claie 1 pour les trois cas étudiés, se sèchent plus vite que les autres claies (Figs. I. 33.36).

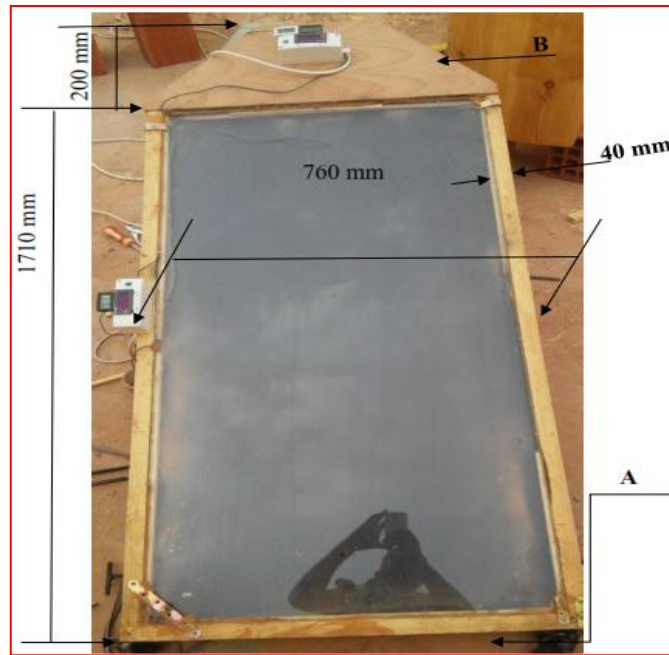


Figure I. 32 : Dispositif expérimental



Figure I.33 : Mise sur claie des rondelles du produit à sécher

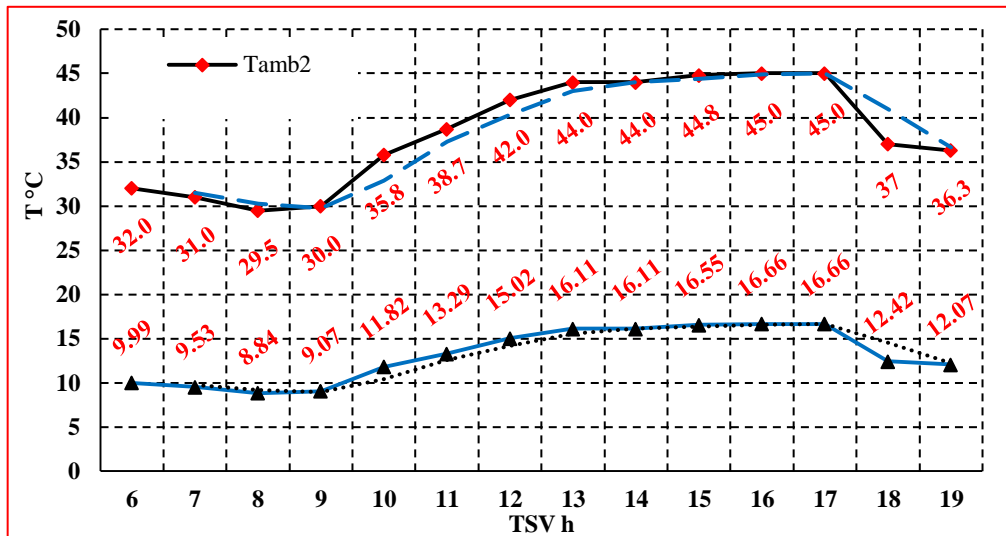


Figure I.34 : Variation des températures de l’ambiance et du ciel en fonction TSV Journée du 03/08/2016,

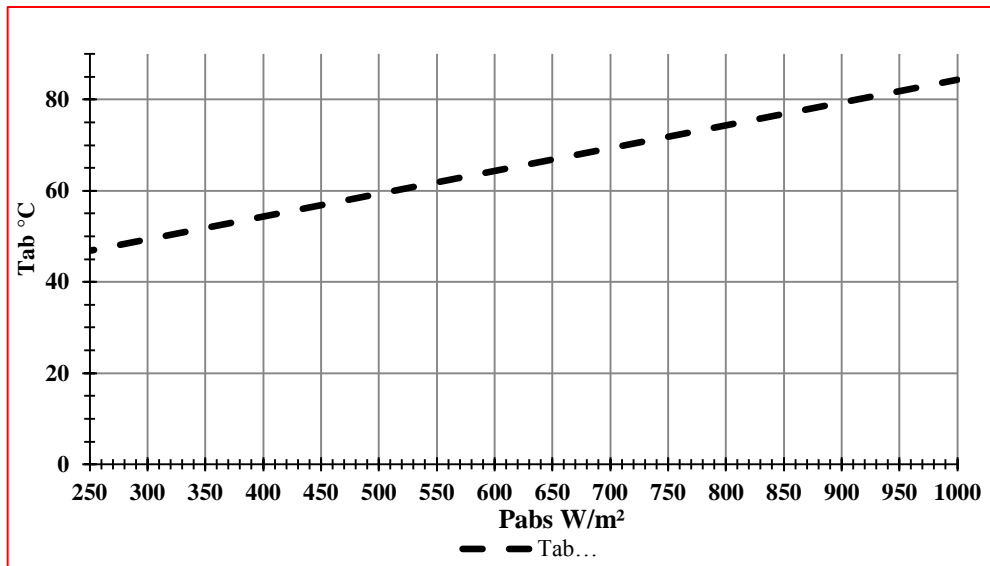


Figure I.35 : Variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée (simulée)

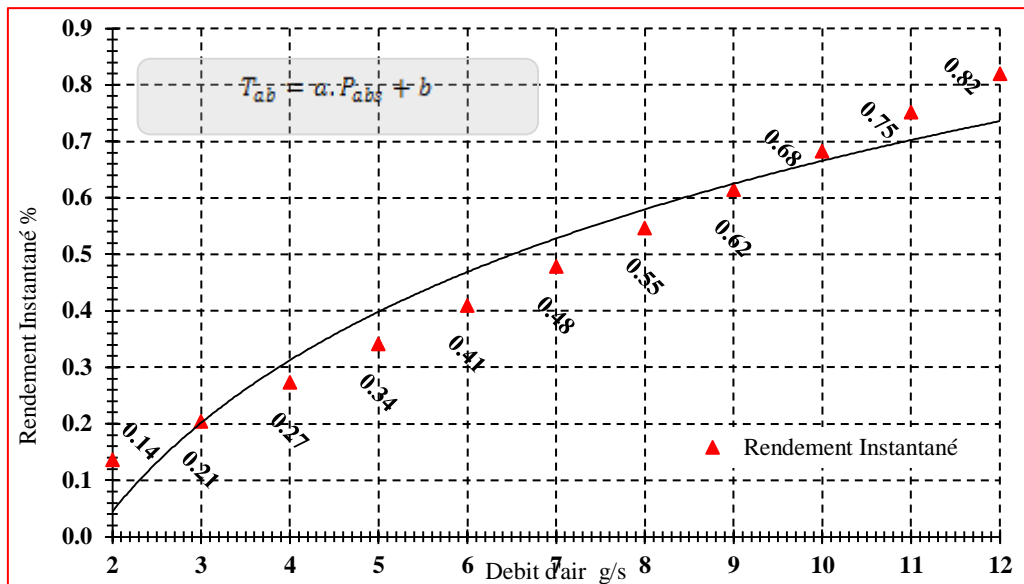


Figure V. I.36 : Variation du rendement instantané en fonction du débit d'air

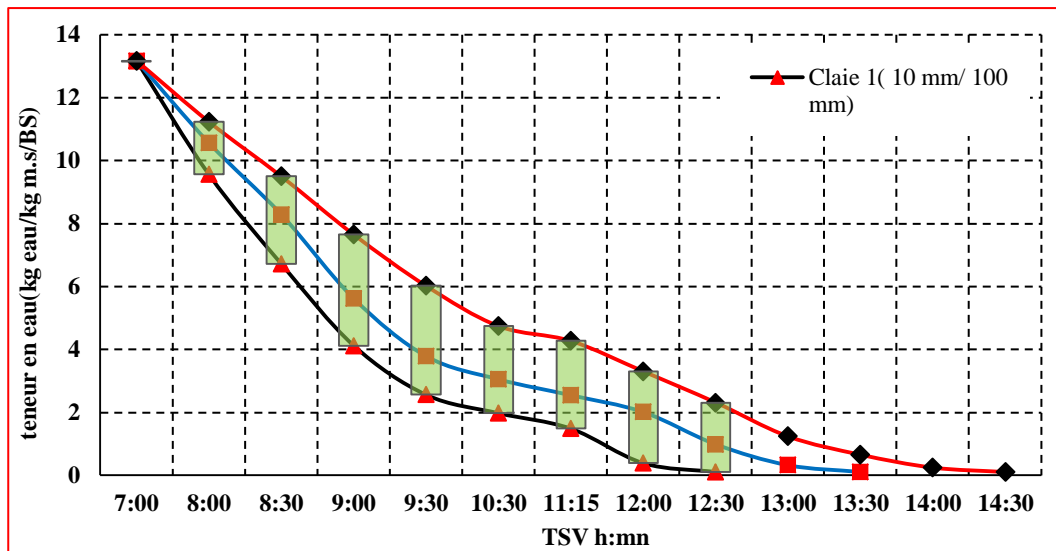


Figure I.37 : Evolution de la teneur en eau à base sèche. $E_p = 10$ mm, capteur avec chicane, journée du 01/08/2016.

Référence

- [4] A. Labeled, « Etude des échanges convectifs en régime transitoir des capteurs solaires plans à air, application au séchage des produits agro-alimentaires », thèse de Doctorat en : sciences, Université de Biskra 2012.
- [5] A. Labeled, N. Moumami, and A. Benchabane, « Experimental investigation of various designs of solar flat plate collectors: Application for the drying of green chili », *J. Renewable Sustainable Energy* 4, 043116 (2012); doi: 10.1063/1.4742337, Published by the American Institute of Physics.
- [6] Surkhmchet Singh Technical note Multi-shelf portable solar dryer *Renewable energy* 29 (2004) 753-765.
- [7] R.Benkhefella, S.El Mokretar, R.Miri et M.Belhamel, « Séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir solaire direct » Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [8] A. Labeled, et al, « Solar drying of henna (*Lawsonia inermis*) using different models of solar flat plate collectors: an experimental investigation in the region of Biskra (Algeria) » *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 2545-2552.
- [9] Aoues, K. al, « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables* 12 N°2: 237 – 248. (2009).
- [10] Boulemtafes, A. and D. Semmar, « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect. » *Rev. Energ. Ren.:* 97-700. (1999).
- [11] Hossain M. A., Woods J. L., Bala B. K, « Simulation of solar drying of chilli in solar tunnel drier. *International Journal of Sustainable Energy* 24 (3) : (2005) 143–153.
- [12] L. Aissani, « Etude et réalisation d'un séchoir solaire pour fruits et légumes. », Thèse de Magister – Université de Constantine, 1988.
- [13] B. Zeghmati, « Modélisation informatique d'un séchoir à effet de serre pour fruits et légumes. », *International Solar Gas Heating Workshop*, Perpignan, France, December 17-22, 1979,
- [14] A.A. El-Sebaï, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, H.G. El-Gohary, « Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables », *Energy* 27 (2002) 845–859 (2002).
- [15] Lyes Bennamoun, Azeddine Belhamri, « Design and simulation of a solar dryer for agriculture products », *Journal of Food Engineering* 59 (2003) 259–266 (2003) .
- [16] Inci Türk Togrul, Dursun Phelivan, « Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process », *Journal of Food Engineering* 65 (2004) 413–425 .
- [17] J. Nganhou, T. Nganya, « Simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de cacao au Cameroun. », *Procédés Biologiques et Alimentaires*, N°Gaoundéré, 2003. French.
- [18] Inci Türk Togrul, Dursun Phelivan, « Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers » *Journal of Food Engineering* 55 (2002) 209-216.
- [19] S. Manaa, (2017), Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques. Thèse de doctorat, université de Biskra.

CHAPITRE II

LES SECHOIRS SOLAIRES



II.1. Introduction :

L'utilisation des isolateurs plans à air pour alimenter en air chaud les séchoirs des produits agricoles, est devenue depuis quelques années, une technique courante, en Raison des quantités d'énergie que nécessitent une opération de séchage et l'accroissement de leur coût.[19]

Pour réussir une telle opération, il est indispensable d'associer à l'enceinte de séchage un capteur approprié, dont les températures de service permettent d'obtenir dans une plage intéressante de leur rendement, un temps de séchage réduit et un produit sec de bonne qualité.

II.2. Les capteurs solaires plans à air :

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire [20].

Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde. L'objectif principal étant de collecter le maximum d'énergie solaire à un coût minimum.

II.3. Différents types des capteurs solaires plans à air :

Les types de capteurs solaires sont très divers même si leur composition reste approximativement le même.

On distingue trois grandes catégories de capteurs plans à air :

- capteurs à absorber plan.
- capteurs à absorber permeable.
- capteurs à absorbeur à géométrie variable.
- Capteurs à absorber poreux .

II.3.1 Les capteurs à absorbeur plan :

Ces capteurs, caractérisés par leurs absorbeurs plans qui peuvent être sélectifs ou non sélectifs, sans vitre ou avec une ou plusieurs vitres de protection, dans lesquels l'air circule, soit entre l'absorbeur et la vitre, soit sous l'absorbeur, soit des deux côtés.

Les techniques et les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. Généralement, un capteur solaire est composé des éléments suivants (figure II.1). [22]

On distingue quatre types des capteurs selon leurs modes d'écoulement :

- Type 1 avec écoulement d'air au-dessus de l'absorbeur.
- Type 2 avec écoulement en dessous l'absorbeur.
- Type 3 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur de même sens.
- Type 4 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur au sens contraire.

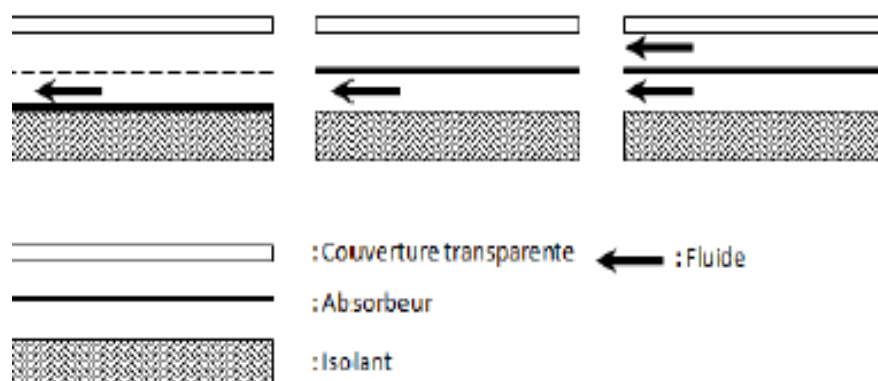


Figure II.1 : types de circulation de l'air dans les capteurs plan à air [21]

II.3.2 Les capteurs à absorbeur perméable :

Dans ce type de capteur, l'absorbeur est une matrice perméable. Ainsi l'énergie solaire incidente pénètre dans la masse de l'absorbeur.

Le capteur à absorbeur perméable se compose toujours d'un caisson isolé, l'air pénètre dans l'espace vitre absorbeur où il commence à s'échauffer par convection sous le vitrage. Ensuite l'air continue de s'échauffer par passage dans la matrice absorbante [22].

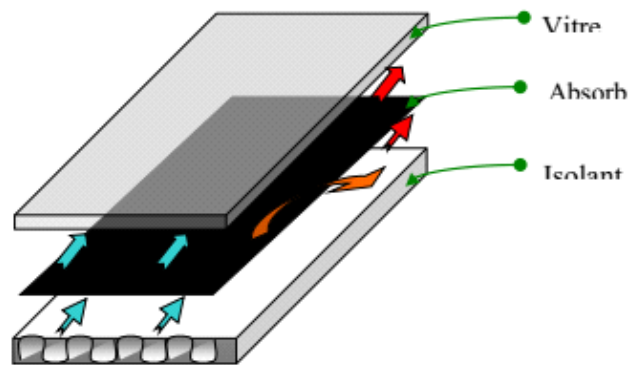


Figure .II.2 : Schéma d'un capteur solaire a absorbeur perméable.

II.3.3 Les capteurs à absorbeur à géométrie variable :

Si l'on veut utiliser le vitrage comme une garde pour réduire les pertes de chaleur il faut que le transfert de chaleur ait lieu entre le dos de l'absorbeur et l'air .l'absorbeur constitue alors la paroi frontale du canal d'air et le revêtement intérieur de l'isolation constitue le fond du canal .on peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et a la face interne de l'isolation ,soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée .Les formes les plus utilisées sont les suivants [22] :

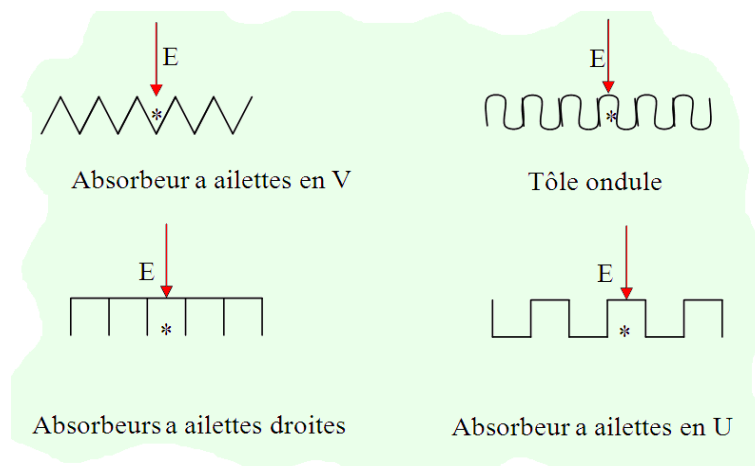


Figure II.3 : Principales géométries d'absorbeur.

E : énergie solaire incidente

*: direction de l'écoulement du fluide.

II.3.4 Capteur à absorbeur poreux :

Pour lesquels l'absorbeur est une matrice poreuse où le rayonnement incident pénètre dans la masse de l'absorbeur donc une absorption volumique de ce dernier, cette pénétration fait donc que la température de la face avant du capteur est plus basse par comparaison à un capteur à absorbeur plan. Il s'ensuit donc une réduction des pertes thermiques avant du capteur. [21]

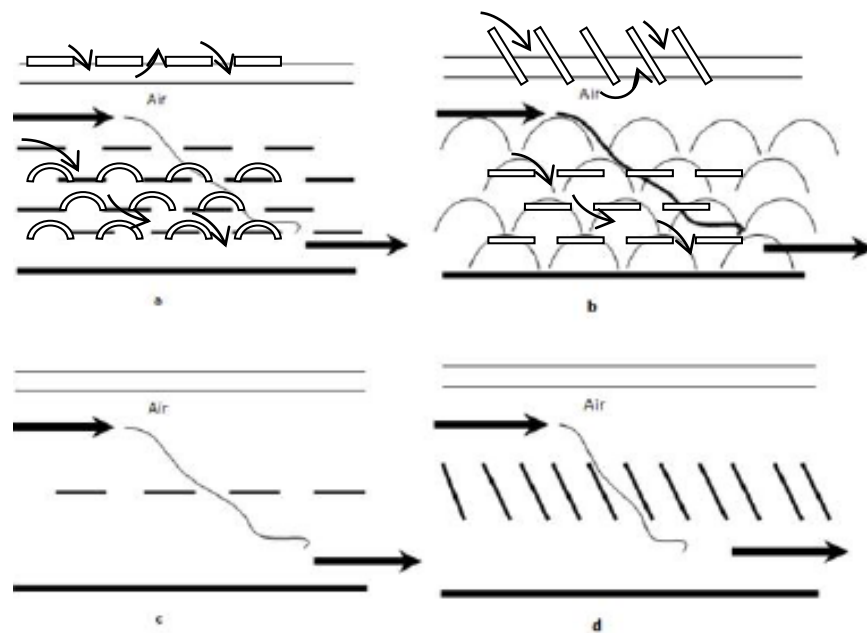


Figure II.4 :différents types d'absorbeurs poreux[21]

II.4 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à air :

Un capteur solaire est destiné à convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basses et moyennes températures et à la transférer au fluide caloporteur. La technologie de ces systèmes est simple : Elle se repose sur le pouvoir absorbant d'une surface traitée, l'absorbeur; qui peut être soit:[21]

- Plaque d'aluminium peint en noir mat
- Plaques selective "Copper Sun".

L'absorbeur s'échauffe en absorbant les rayons solaires, cède une partie de l'énergie récupérée à un fluide caloporteur (l'air) et en Réémet une partie dans l'infrarouge. Une vitre est placée au-dessus de l'absorbeur (alvéolée en polycarbonate par exemple). Elle est transparente aux rayonnements solaires visible et opaque à l'infrarouge qu'elle absorbe et réémet vers l'absorbeur, permettant ainsi de "piéger" les rayonnements entre l'absorbeur et la vitre et

d'augmenter la température de l'absorbeur : c'est l'effet de serre. L'arrière du capteur ainsi que les parois latérales sont recouvertes d'isolants thermiques. [21]

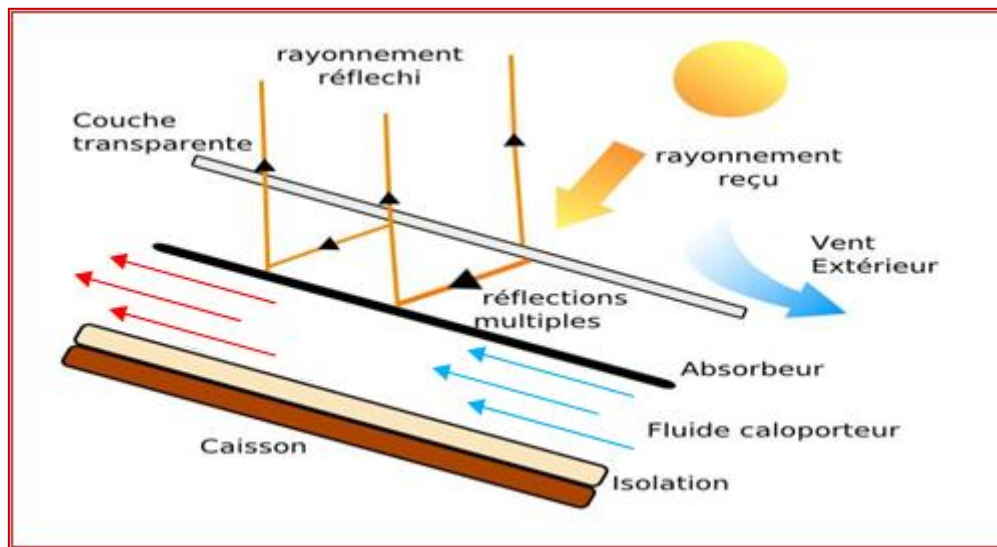


Figure .II.5 : Principe de fonctionnement du capteur solaire plan

II .5. Les séchoirs solaires :

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes[23].

Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (water activité A_w) et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques.

II.6. Types des séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires sont classés généralement, selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [24]:

- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes.

II.6.1. Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception des séchoirs coffre à plateau adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités [25].

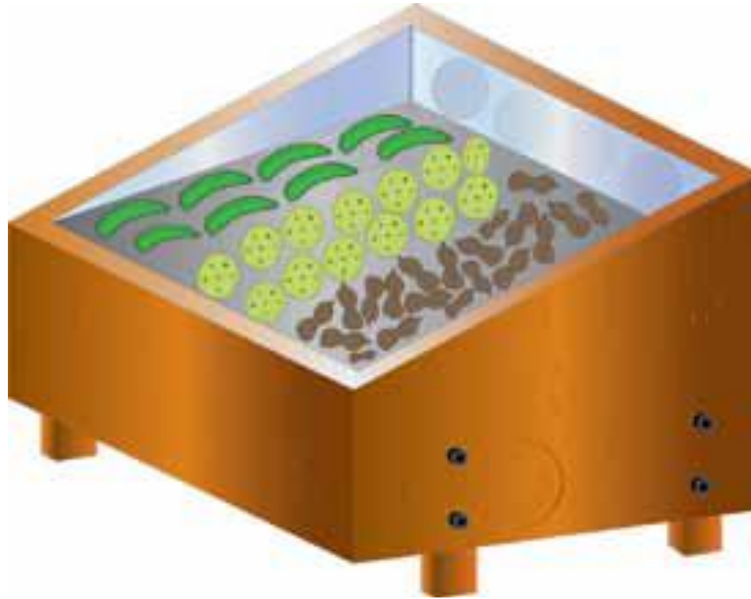


Figure .II.6 : séchoir solaire direct [32]

II.6.1.1 Type des séchoirs directs :

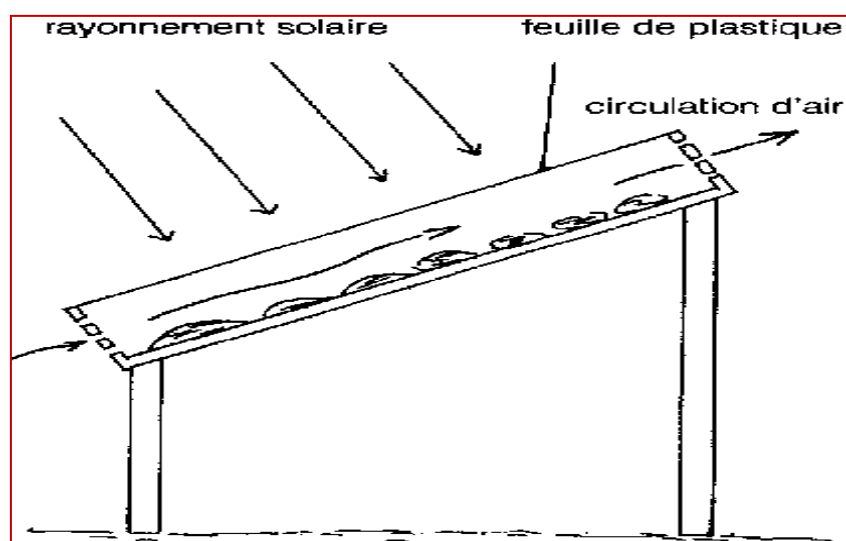
- a. La boîte de séchage ou séchoir coffre
- b. Le séchoir intégral à convection naturelle
- c. Le séchoir solaire "coquillage"
- d. Le séchoir cabane

Tableau (II.1): Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct.

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

I.6.1.1.1 La boîte de séchage ou séchoir coffre :

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des Matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, Légumes, poissons et de la viande. [27]

**Figure .II.7 :** séchoir solaire coffre [27]

Avantage :

- Ce type de séchoir mobile est très pratique.
- Une grande variété de matériaux disponibles localement peut être employée pour la construction.

Inconvénients :

- La convection naturelle est faible, ce qui limite la rapidité du séchage
- Peu de contrôle de la température

I.6.1.1.2 Séchoir intégral à convection naturelle :

Le séchoir intégral (figure II.8) est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu [26]. Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec.

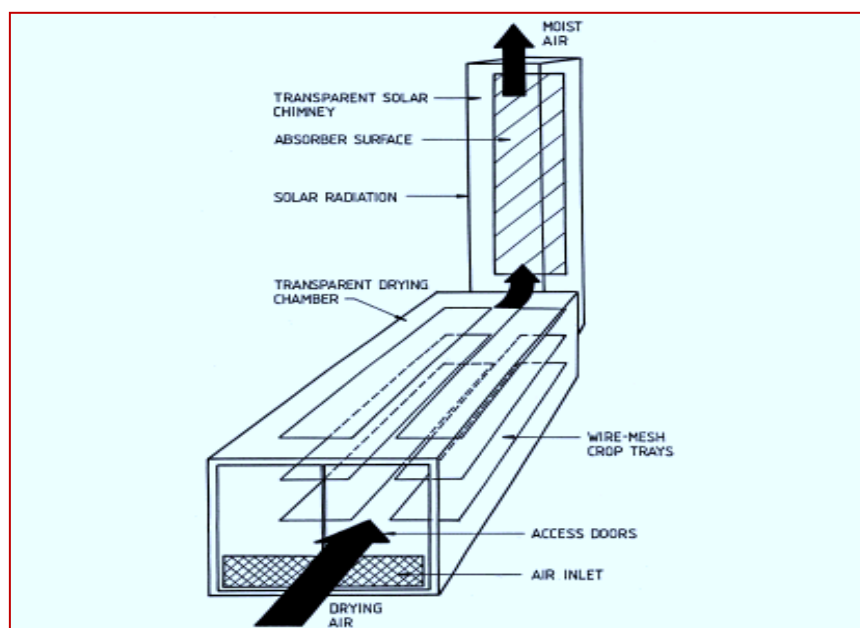


Figure (II. 8): Le séchoir solaire intégral.[26]

I.6.1.1.3 Le séchoir solaire "coquillage" :

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les Coopérations et les groupes de femmes. [28]

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

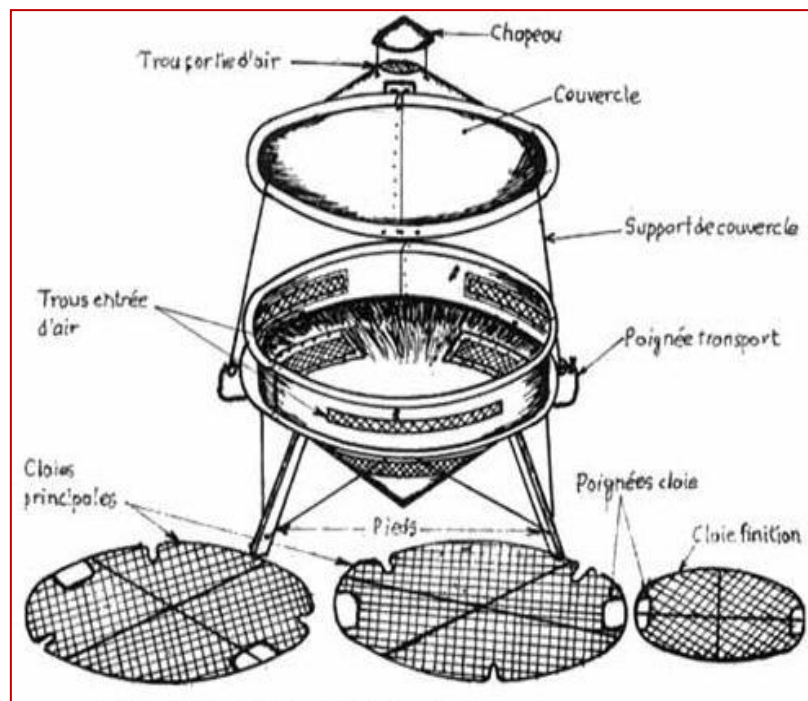


Figure (II.9): Le séchoir solaire coquillage à trois claies [28]

II.6.1.1.4 Séchoir cabane :

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7 m² (figure II.10) [31]. Les produits sont placés dans le séchoir tenté sur de claies surélevées du sol. La toile en plastique permet de capter l'énergie solaire.

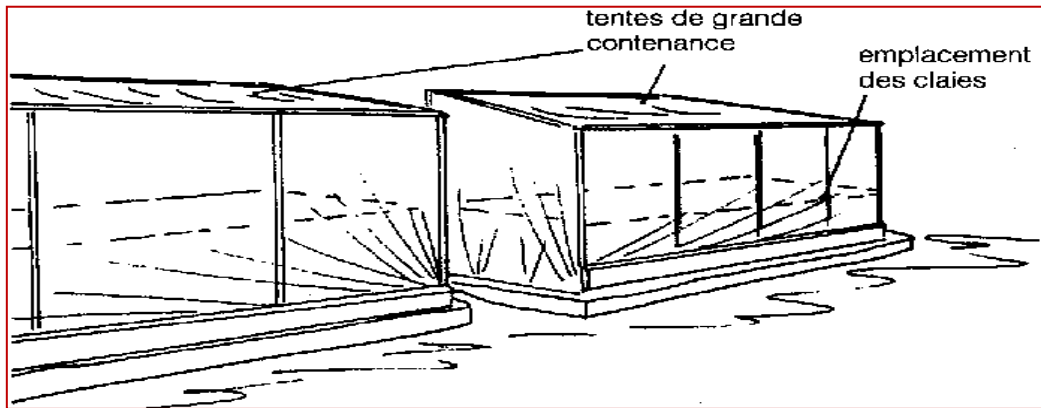


Figure .II.10 : séchoir solaire cabane [31]

Avantage:

- Meilleure protection contre les insectes par rapport au séchoir coffre avec une moustiquaire
- Construction et fonctionnement simples.
- Equipement démontable aux saisons des pluies.

Inconvénient:

- Coûte assez important.
- Nécessite une grande surface de polyéthylène qu'il n'est pas toujours facile de se procurer.
- Prise au vent très important qui rend ces modèles fragiles si l'emplacement est mal choisi.

II.6.2 Les séchoirs solaires indirects :

Ces systèmes sont plus performants que es séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, sont aspect, sa valeur nutritive [31]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

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

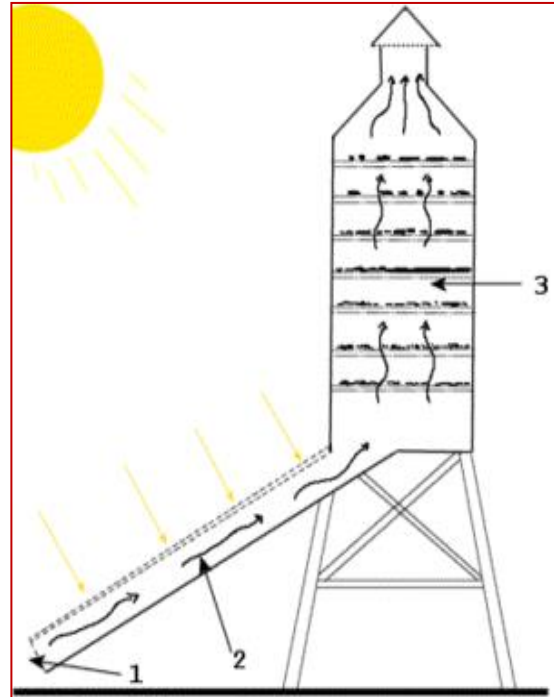


Figure. II.11. séchoir solaire indirect [25]

Tableau (II.2): Avantages et inconvénients du séchoir solaire indirect. [26]

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C). ➤ Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un cout réduit (Bala,Mondol et al.2003). ➤ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles (simatc 2003). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. ➤ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

II.6.2.1 Type du séchoir indirect (séchoir armoire)

Dans ce type de séchoir, le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage ou les produits sont disposés sur des claies superposées.

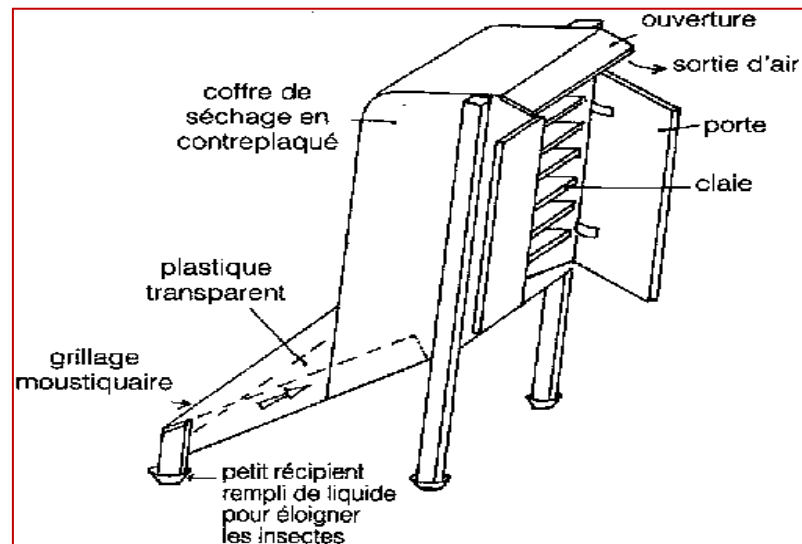


Figure. II.12 : Séchoir solaire armoire [31].

Avantage:

- Bon contrôle de la température.
- Peut sécher plusieurs produits en même temps en deux ou trois jours.
- Pratique d'emploi.

Inconvénient:

- Cout assez élevé.
- Problème d'homogénéité de séchage. les plateaux inférieurs sèchent plus vite que les plateaux supérieurs ce qui oblige à faire des rotations.

II.6.3 Les séchoirs solaires hybrides :

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, gaz,etc.), l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [28] :

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un bruleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de 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.

Tableau (II.3): Avantages et inconvénients du séchoir solaire hybride

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Meilleur contrôle du séchage (pangavhanc, sawhcy et al . 2002). ➤ Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cout de production et d'investissement élevé. ➤ Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange. ➤ Personnel qualifié pour la maintenance.

III.6.3.1 Types des séchoirs hybrides

II.6.3.1.1 Séchoir hybride à convection forcée :

Ce type de séchoir est constitué d'un toit (figure I.12) qui joue le rôle sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits. L'air est aspiré de l'intérieur du bâtiment par un ventilateur et passe dans un capteur solaire dans le toit du bâtiment. L'air réchauffé arrive dans la chambre de séchage ou le produit à sécher se trouve sur les rangées de claies superposées. [25]

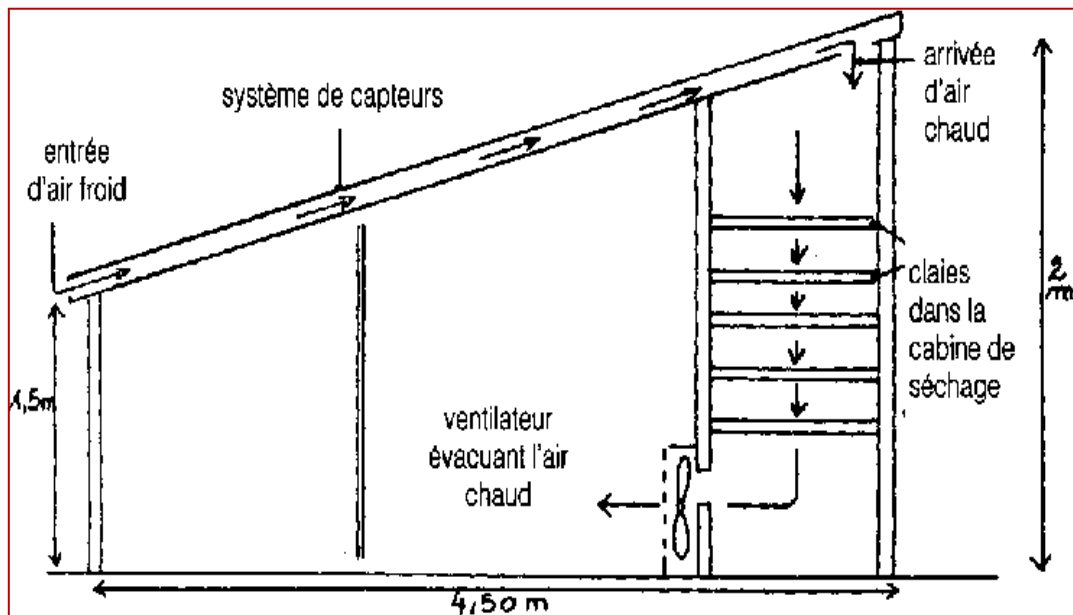


Figure II.13 : séchoir solaire hybride à convection forcée [31]

Avantages:

- Séchoirs très performant.
- Facilement aménageable dans un bâtiment.

Inconvénient:

- Nécessite de grosses quantités des produits à sécher sur l'année pour être rentable.

II.6.3.1.2 Séchoir hybride solaire-gaz.

Il est constitué d'un collecteur solaire pour réchauffer l'air, la circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire. Si la température est insuffisante, un bruleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc être sécher quelles que soient les conditions climatiques. [25]

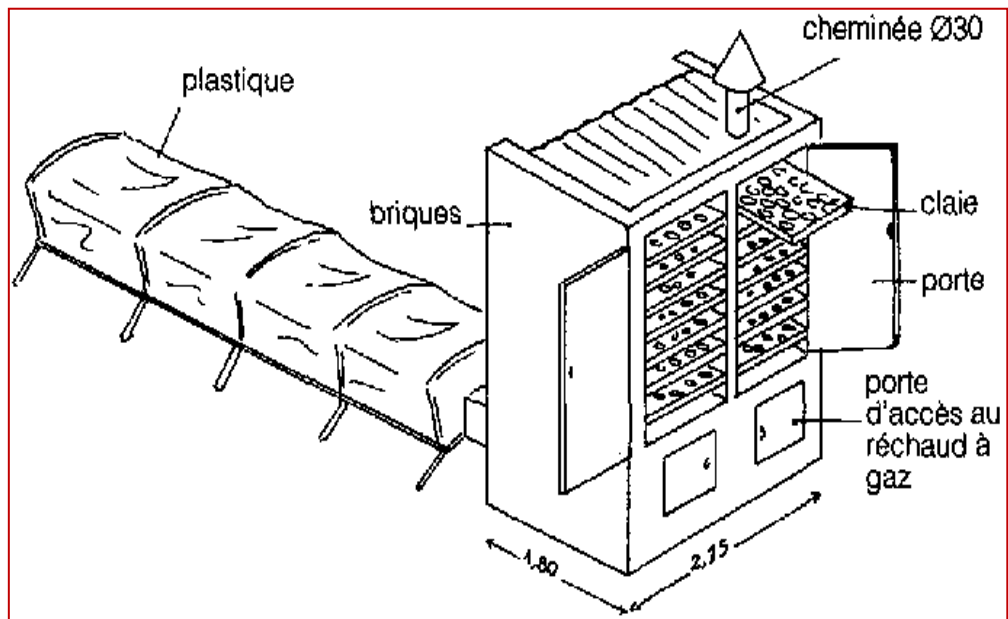


Figure II.14 : séchoir hybride solaire à gaz [25]

II.6. 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 I.14) a les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée), mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empîété directement sur le produit comme le séchoir intégral [26].

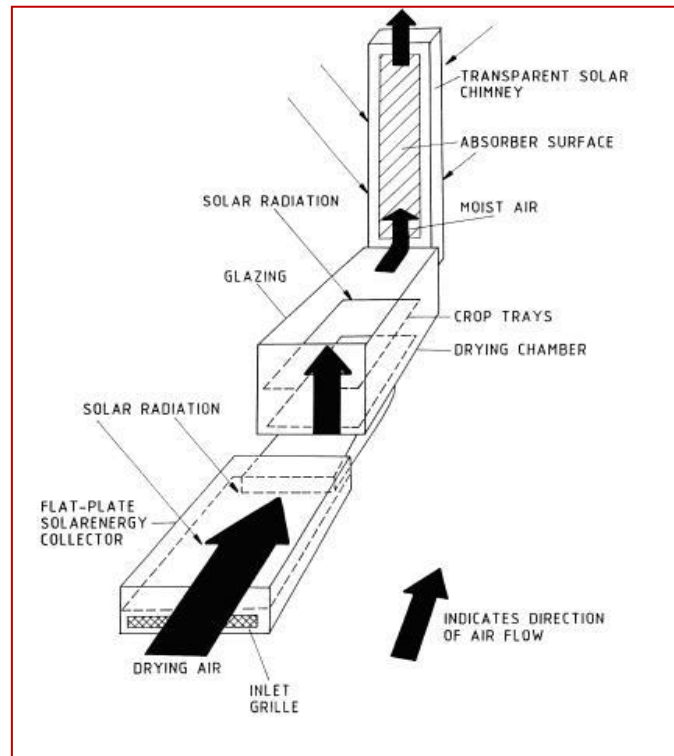


Figure II.15: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1[28].

Une autre conception (figure .15) se compose d'un capteur à air avec une pile de granit (joue le rôle d'un absorbeur et stockage d'énergie), recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant trois claies superposées, les parois sont des contre-plaquéés, 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 [26].

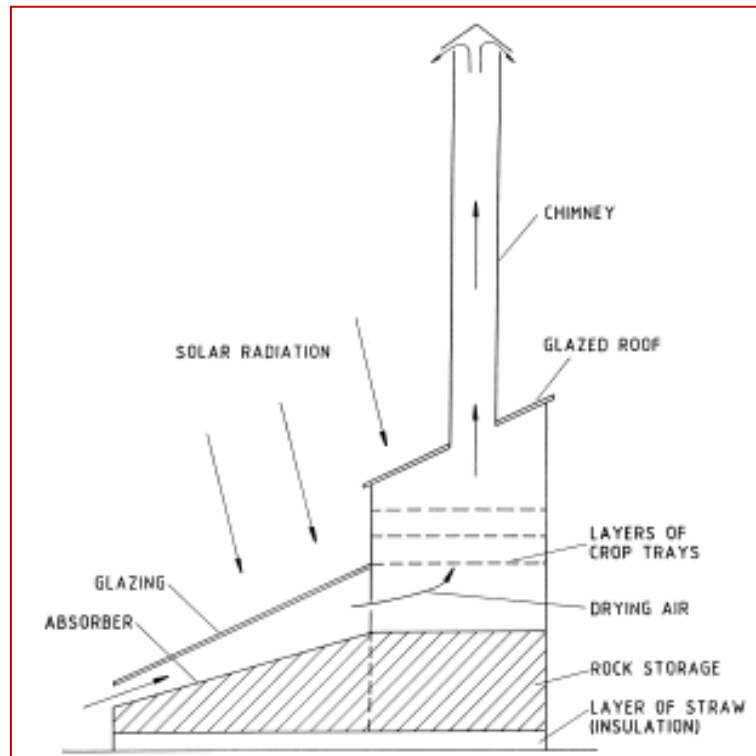


Figure II.16 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-[28].

II.7. Principe fonctionnement d'un séchoir solaire :

Le principe consiste à faire entrer de l'air par la partie basse d'un caisson en bois, de le réchauffer, puis de l'évacuer par la partie haute après qu'il soit passé par les grilles où sont disposés nos aliments à faire sécher.

Pour réchauffer notre air, on se sert de l'énergie solaire : les rayons du soleil entrent dans la caisse par une plaque en verre ou en plexiglas et sont ensuite absorbés par une tôle noire fixée sous la vitre.[29]

La chaleur (rayons infra rouges) est emmagasinée par la tôle noire, ce qui permet de chauffer l'air de notre caisson. Les rayons infra rouges ne peuvent ressortir par la vitre car le corps noir à modifier leur longueur d'onde.

La circulation d'air (entrée basse, évacuation haute) est indispensable pour que ces systèmes restent des séchoirs et non des fours.

Ces systèmes permettent de faire sécher des aliments dans de meilleures conditions hygiéniques que les méthodes traditionnelles (sur une grille à l'air

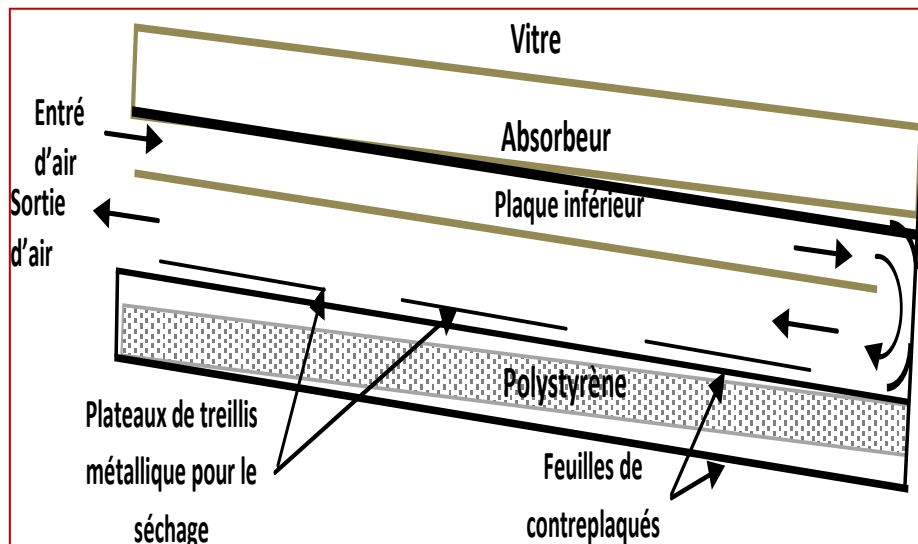


Figure .II.16 : principe fonctionnement d'un séchoir solaire.

II.8 Références

- [20] S. Oudjedi, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui et A. Belhamri, « Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2) », *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008)* 255 – 266
- [21] F. Chabane, « Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire » Doctorat en sciences en : génie mécanique, Univ de Biskra. page (48.46), 2016.
- [22] M. Amraoui, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air ; Influence de la forme de la rugosité », Mémoire de magister en : génie mécanique 2012.
- [23] B. Dadda, S. Kherrou et L. Serir, « Réalisation d'un séchoir solaire indirect », *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008)* 127 – 134
- [24] A. Boulemtafes, « Le séchage solaire des produits agricoles » Recherche et Développement, Division Energie Solaire Thermique et Géothermie.
- [25] h.houhou, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires », Univ de Biskra. Page (41 -48) 2012.
- [26] O. V. Ekechukwn, B. Norton, « Review of solar energy systems II: An overview of solar drying technology », *Energy Conversion and Management*, 40 (615 - 655) - (1999).
- [27] D. R. Pangavhane, R. L. Sawhney, « Review of research and development work on solar dryers for grape drying », *Energy Conversion and Management*, 43(45 - 61) - (2002).
- [28] D.Mennouche « Valorisation des produit agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire », Thèse de Magistère, Ouargla(2006)
- [29] Bazdidi-Tehrani, F., and Naderi-Abadi, M., « Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in Entrance Region of a Horizontal Channel with Transverse fins », *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 211-220. (2004)
- [30] O. V. Ekechukwn, B. Norton, « Review of solar energy systems II: an overview of Solar drying technology », *Energy Conversion and Management*, 40 (615 - 655) - (1999).
- [31] Dudez, P, « Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés » (1999)
- [32] C. Souriau et D. amelin, « Fabrication de cuiseur et séchoirs solaires », collection pro-agro, coédition d'ingénieurs sans frontières caméron, 2014

CHAPITRE III
THEORIE DE SECHAGE



III.1 Introduction

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide afin de le conserver à une température ambiante ou de réduire son poids.

Alors le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau, ou autre solvant, qu'il contient. [33]

Ainsi, pour bien comprendre ce phénomène de migration d'humidité dans les milieux poreux, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans les deux phases (solide, vapeur) du milieu poreux.

III.2 Définition

Le séchage a pour but d'éliminer sous l'action de la chaleur le liquide qui accompagne un solide. Le départ de ce liquide s'effectue par évaporation, par vaporisation ou par sublimation. Le séchage est donc une opération de transfert simultané de matière et de chaleur. [28]

III.3 Avantages et inconvénients du séchage

Dans le tableau ci-dessous nous présentons quelques avantages et quelques inconvénients du processus du séchage pour les différents produits à séché.

Tableau.III.1 : Avantages et inconvénients du séchage.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> Le séchage augmente la durée de conservation de l'aliment par une stabilisation des produits. L'abaissement de l'activité de l'eau a pour effet d'inactiver les enzymes et de stopper le développement de la flore microbienne. La conservation optimale de nombreux produits biologique est située à un intervalle d'activité d'eau comprise entre 0,2 et 0,35 ; Une standardisation de produit final 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de vitamine A (3% pour les légumes) après 6 mois de conservation. Altération de la vitamine B1 (10 à 20 %). Perte de la vitamine C (35%). In solubilisation des protéines entraînant le goût de cuit. Migration des constituants solubles. Formation d'une couche gommeuse imperméable suite à un séchage

(teneur en eau constante, produit fini homogène) ;

- Une diminution de la masse et le volume de produit ce qui facilite le transport et le stockage de ce dernier ;
- Dans quelque cas, une présentation particulière est donnée au produit.

rapide.

- Concentration de la coloration.
- Réaction de Maillard (brunissement) suite à une surchauffe.
- Coût énergétique élevé [34].

III.4 Terminologie de séchage

III.4.1 Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage. [35]

III.4.2 Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre. [35]

III.4.3 États de siccité

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul. [36]

III.4.4 Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, son taux d'humidité se stabilise à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température [36].

III.4.5 Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [37], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit (P_{vp}) est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière. Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau (a_w) est basse.

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide a_w par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (\text{III.1})$$

Pour qu'il y ait séchage, quels que soient le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative (Φ) de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau ($\Phi < a_w$) de façon à ce que $P_{vp} > P_v$ (pression de vapeur de l'air dans l'enceinte) (figure III.1) [37.38]

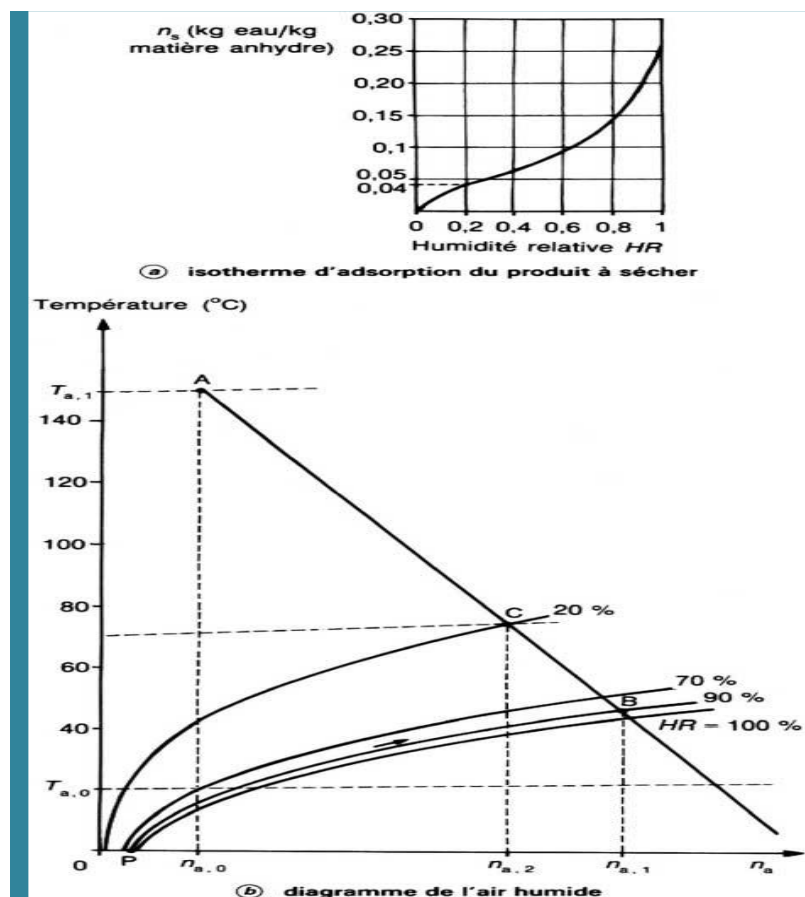


Figure III.1 : Représentations graphiques des étapes de séchage.[37]

III.5 Les caractéristiques de l'air de séchage :

III.5.1 Humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un Kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante [25] :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (\text{III.2})$$

III.5.2 Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température [28].

$$H_r = \frac{P_v}{P_{s.T}} \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad (\text{III.3})$$

III.5.3 Degré de saturation (Arditti 1972)

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{as} la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport [25] :

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

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

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

III.5.4 Température humide du gaz :

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement. [39]

III.6 Caractéristiques des solides humides [40]:

III.6.1 Humidité absolue

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

$$X_s = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{III.6})$$

III.6.2 Humidité relative

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

$$X_h = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{III.7})$$

III.7 Mode de séchage :

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

III.7.1 Séchage par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de séchage le plus courant. Il consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques, pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

Ce type de transfert utilise l'équation suivante (41):

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_a - T_s) \quad (\text{III.8})$$

Avec :

Q : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W)

A : La surface d'échange (m^2)

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

α : Le coefficient d'échange par convection ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

III.7.2 Séchage par conduction :

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad (\text{III.9})$$

Avec:

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

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

III.7.3 Séchage par rayonnement :

On peut aussi réaliser des séchages où la transmission de chaleur se fait par rayonnement. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus moins complète par le produit à sécher. [43]

$$Q = A_1 \cdot C \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi \quad (\text{III.10})$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement (m²)

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge (m²)

T_1 : Température de la source émettrice (K)

T_2 : Température du produit (K)

φ : Facteur tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

ε_1 : Emissivité du produit

ε_2 : Emissivité de l'émetteur

III.7.4 Séchage par perte diélectrique :

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques) (42.). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30Mhz). Un tel champ existe entre les 41 armatures d'un condensateur plan relie à un générateur. (40.)

III.7.5 Lyophilisation :

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit. [43.]

III.7.6 Séchage a l'air libre:

Méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires (40.).

III.8 Cinétique de séchage :

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit alimentaire donné au cours de sa déshydratation par les courbes illustrées dans les figures ci-dessous.

- Le taux d'humidité du produit (n_s ou X) en fonction du temps (t) : on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les Phases de séchage existent) est donnée sur la figure III.2.
- L'allure de séchage (dn_s/dt ou dX/dt) en fonction du temps (t) : on peut obtenir une nouvelle courbe qui est donnée sur la figure III.3.
- L'allure de séchage (dn_s/dt) en fonction du taux d'humidité (n_s) : conduit à la courbe représentée sur la figure III.4.

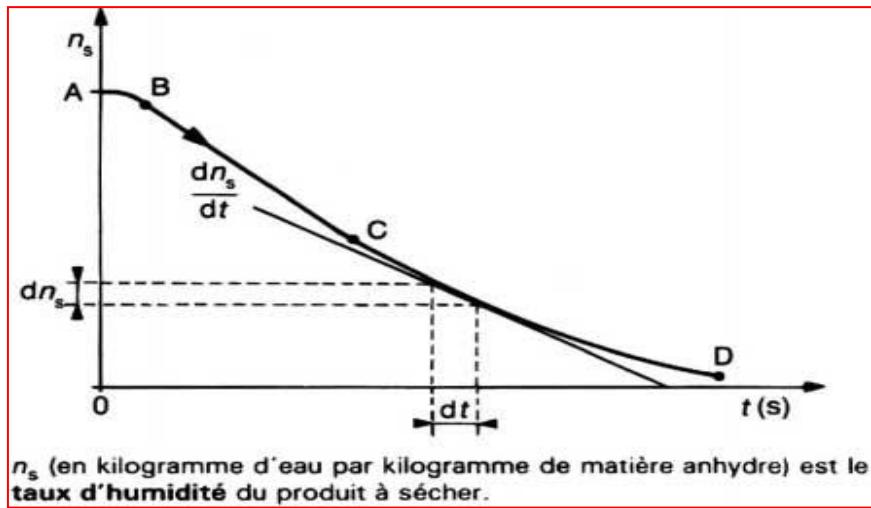


Figure III.2: Courbe de séchage $n_s = f(t)$

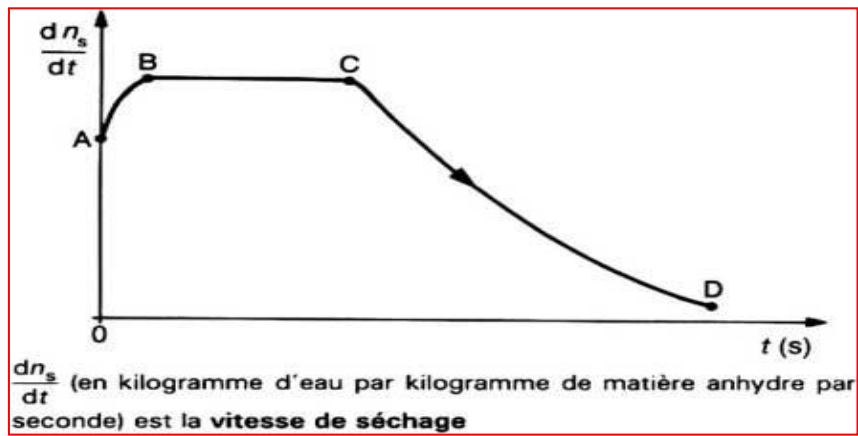


Figure III.3 : Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = f(t)$

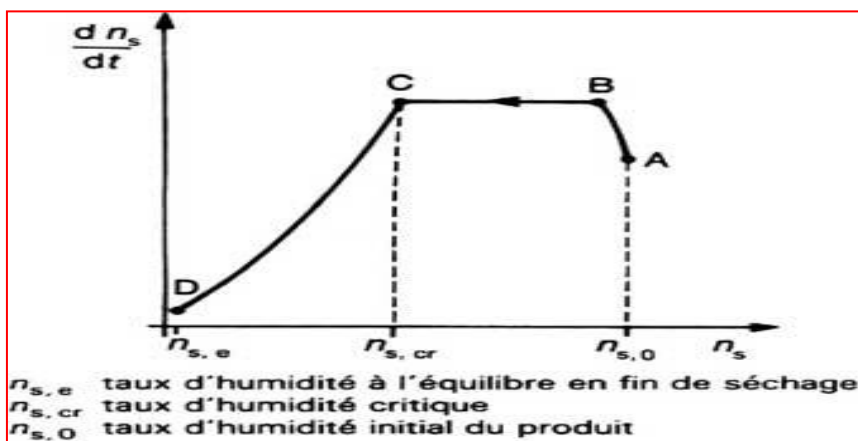


Figure III. 4 : Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = f(n_s)$

III.8.1 Périodes de séchage

Il est couramment admis la présence de trois périodes de séchage (Figs. III-3 et III-4):

III.8.1.1 Phase initial (A-B): [1]

C'est une phase transitoire d'échauffement au cours de laquelle la température du produit augmente. Physiquement, elle correspond à une phase de réchauffement du produit humide sans diminution appréciable de l'humidité ; ce qui explique vraisemblablement le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase, généralement de courte durée.

III.8.1.2 Période I (b-c) (45)

De séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. L'activité d'eau à la surface du produit est proche de l'unité, sa température est uniforme et égale à la température de thermocouple humide de l'air. Au terme de cette période on peut définir la teneur en eau critique du produit.

Cette période est généralement absente pour les produits alimentaires et biologiques. En fait, la résistance des parois cellulaires et l'obstruction des pores engendrés par la migration des solutés et par le croûtage qui apparaît en surface limitent la migration d'eau interne.

III.8.1.3 Phase à vitesse de séchage décroissante (CD) :

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

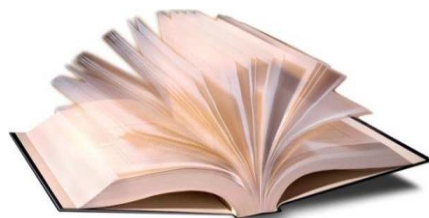
Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage. [41]

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

III.9. Référence

- [33] K.Djebnoun, « etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air », Mémoire de magister en : génie mécanique, Univ. de Biskra.
- [34] J. G. Brennan, « Food processing hand book», Ed by: Weinheim, Germany, 602p, 2006.
- [35] N. chalal, « etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect », magister en : génie climatique, univ.mentouri constantine.2007
- [36] A. Chareau et R. cavaillé, « séchage théorie et calculs », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés. Doc. J 2 480
- [37] S. Whitaker, « Heat and mass transfert in granular parous media », Advances in drying I, Hemisphere publication, 1980, pp 23-61;
- [38] M. Daguinet, « Les séchoirs solaires: théorie et pratique », 1985.
- [39] W. L. McCabe, j. C. Smith, et P. Harriott, « Unit operation of chemical Engineering », hill book company (1985).
- [40] S.boughali, « etude optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques », Doctorat en sciences en : génie mécanique, univ-Hadj lakhdar Batna .2010
- [41] A. Boussalia, « contribution a l'etude de séchage solaire de produits agricoles locaux », Mémoire de Magister en : Génie Climatique. Université mentouri – constantine 2010
- [42] M.Houti, « Etude et amélioration du fonctionnement d'un séchoir solaire direct à convection naturelle », Mémoire de Master Univ-Kasdi merbah Ouargla. 2016
- [43] D.Schnell, « Technique de séchage, Traduit de l'allemand », GMBH, Eschborn, (1983).
- [44] B Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte », physique énergétique et matériaux, univ-de Tlemcen
- [45] M. Lahbabi, « Etude et simulation du séchage de l'abricot : application a quelques variétés de la région des Aurès », doctorat en : sciences spécialité mécanique, univ-hadj lakhdar Batna (2015).

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSION



IV.1. Description du dispositif expérimental :

Notre étude est basée sans chicanes et a double circulation d'air, en amont et en aval de la plaque inférieure. Cela permet l'amélioration des performances du CSP et par conséquent, les grandes quantités de chaleur fournies favorisent la réduction des temps de séchage des produits.

IV.1.1 Description du capteur solaire

Le capteur solaire plan à air utilisé dans cette étude expérimentale est d'une longueur de 1.98 m et une largeur de 0.9 m, il est recouvert d'une plaque de verre d'une épaisseur de 5 mm (photo 1). La couverture transparente en verre est recouverte d'une plaque de verre d'une épaisseur de 5 mm. La couverture transparente en verre est distante de 0.02 m de la plaque absorbante, fabriquée d'acier galvanisé d'épaisseur 0.4 mm peinte en noire mate pour lui acquérir les propriétés optiques convenable. Une plaque inférieure, distante de la première de 25mm permet à l'air chaud de tourner autour d'elle pour passer à la chambre de séchage, cette dernière est placée en dessous de la plaque inférieure, sa hauteur est égale à 25cm. Les parties inférieures et latérales de la chambre de séchage sont isolées thermiquement avec une plaque de bois et en polystyrène (Fig. 1). Le capteur est incliné d'un angle de 34.8° par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.



Figure.IV.1 : Dispositif expérimental utilisé.

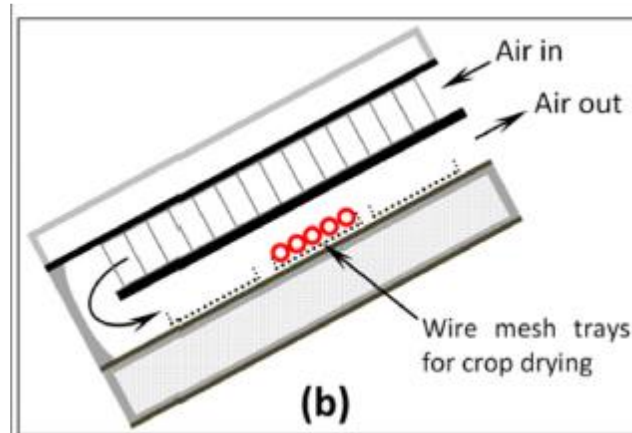


Figure .IV.2 Schéma du séchoir solaire utilisé.

IV.1.2 La chambre de séchage :

L'enceinte de séchage placée en dessous de la plaque inférieure est constituée de trois (03) coffres en bois dont la section est rectangulaire. Afin de supporter le produit dans la chambre de séchage, nous avons utilisé une grille d'acier galvanisé dont les mailles sont à faibles sections. Les tiroirs qui constituent les claies s'ouvrent vers les cotés latéraux pour commodité d'utilisation (Photo 2).

Les produits sont placés à l'intérieur de la chambre de séchage avec trois étagères en mouvement du convoyeur métallique comme ces étagères permettent le passage de l'air chaud.

Dans notre étude, nous avons utilisé une seule étagère pour réduire les pertes de chaleur. Les dimensions de l'enceinte de séchage sont : $L_{ch}=1.90$ m, $l_{ch}= 0.90$ m et $H_{ch}=0.25$ m



Figure.IV.3 : le banc d'essais pour le séchage solaire.

IV.2 Produits séchés :

Notre choix s'y porté sur des produits jugés très importants pour l'économie nationale, surtout que leur production est énorme et du fait aussi qu'ils sont cultivés sur tout le territoire national.

IV.2.1 La menthe verte

La Menthe en épi ou menthe verte est une plante vivace de la famille des Lamiacées, du genre *Mentha*, cultivée comme plante aromatique, cette plante est jugée très importante dans la cuisine algérienne.

IV.2.2 Le piment

Le piment appartient au genre **Capsicum**, de la famille des solanacées qui comprend également les aubergines, les tomates, les courgettes, les pommes de terre et le tabac. La majorité des botanistes classent les piments en deux espèces : **Capsicum annuum** (piment annuel) et **Capsicum frutescens** (piment vivace).

La variété utilisée dans ce travail apparait du type Anaheim de la famille **Capsicum Annuum**. Piment chaleureux à chaud avec un taux de concentration en capsaïcine de 2 à 4, très charnu de 15 à 25 cm de long, vert dans sa jeunesse puis rouge à maturité.

Les étapes de préparation du piment sont :

- a- Le lavage du produit pour éliminer les impuretés, les résidus d'insecticides et autres contaminations.
- b- Découpage du produit,
- c- Pesage du produit, la masse initiale du produit à sécher est 500g.
- d- Dépôt du produit sur la claie.

La menthe ne nécessite pas de préparation (ni lavage, ni découpage), seulement on la distribue sur la claie (Fig. 2).



Figure .IV.4 : Feuilles de piment vert et de la menthe verte avant et après séchage.

IV.3 Instruments de mesure :

L'intensité du rayonnement solaire global a été mesurée par un solarimètre (Frederiksen), celui-ci a été placé près de la vitre transparente avec la même inclinaison et la même orientation de l'insolateur. Le débit d'air a été mesuré par un anémomètre à hélice KIMO-LV110. L'écart de température de l'air a été mesuré par trois sondes de température placées à l'entrée et à la sortie du conduit d'écoulement et la chambre de séchage, ces sondes sont munies d'afficheurs digitaux. Le poids du produit avant et au cours du séchage est mesuré par une balance avec une précision de 0.5g.



a) Thermomètre digital



b) balance



c) Solarimètre



d) Anémomètre

Figure .IV.5 : Instruments de mesure.

IV.4 Protocole expérimentale

On a effectué deux types d'expériences, la première expérience est en système ouvert et la deuxième est en système fermé (Fig. 4 et 5).

Dans tous les processus, nous avons utilisé trois vitesses d'air $V = 2,5 \text{ m/s}$, 3 m/s et 5 m/s

Pour chaque expérience, la quantité du piment et de la menthe à séchées est la même et égale a 500 g. On a pesé le produit tous les 60 min jusqu'à la fin de séchage et pour chaque pesée, on a déterminé à l'aide des instruments de mesure utilisés les différents autres paramètres : température, humidité relative, ensoleillement.

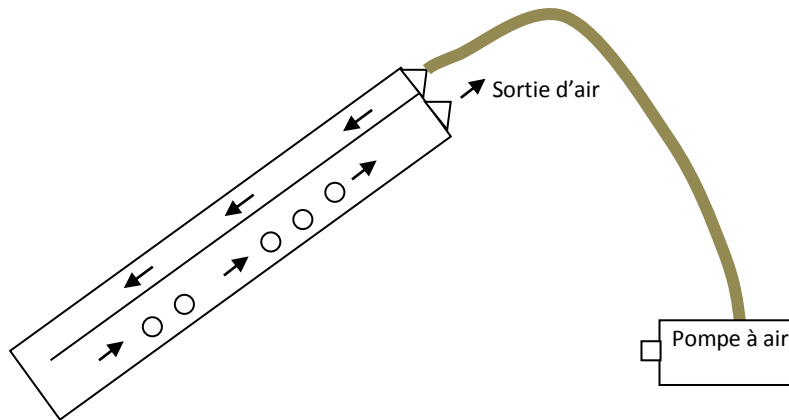


Fig. IV. 6 : Schématisation du processus de séchage en cycle ouvert.

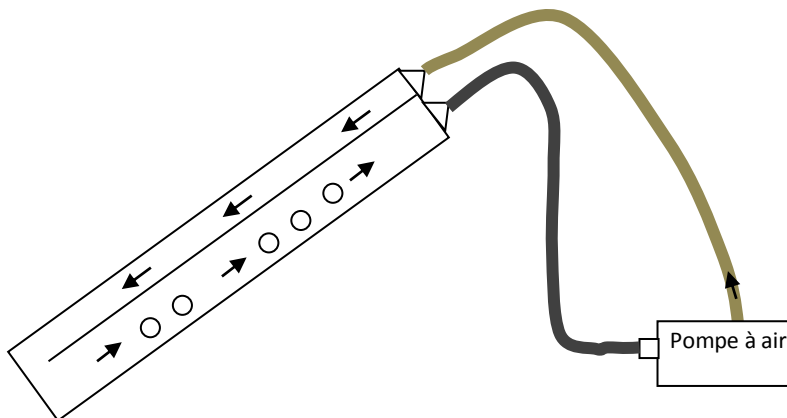


Fig. IV.7 : Schématisation du processus de séchage en cycle fermé.

IV-5. Etude des performances du CSP en fonction du débit

Il est utile de présenter pour chaque série de tests ; les conditions météorologiques environnantes et la température à différents points dans le séchoir. Ces conditions (variation de rayonnement, température (ambiante, sortie, chambre de séchage) relatives aux journées d'études sont présentées en fonction du temps sur les courbes des figures 08-09.

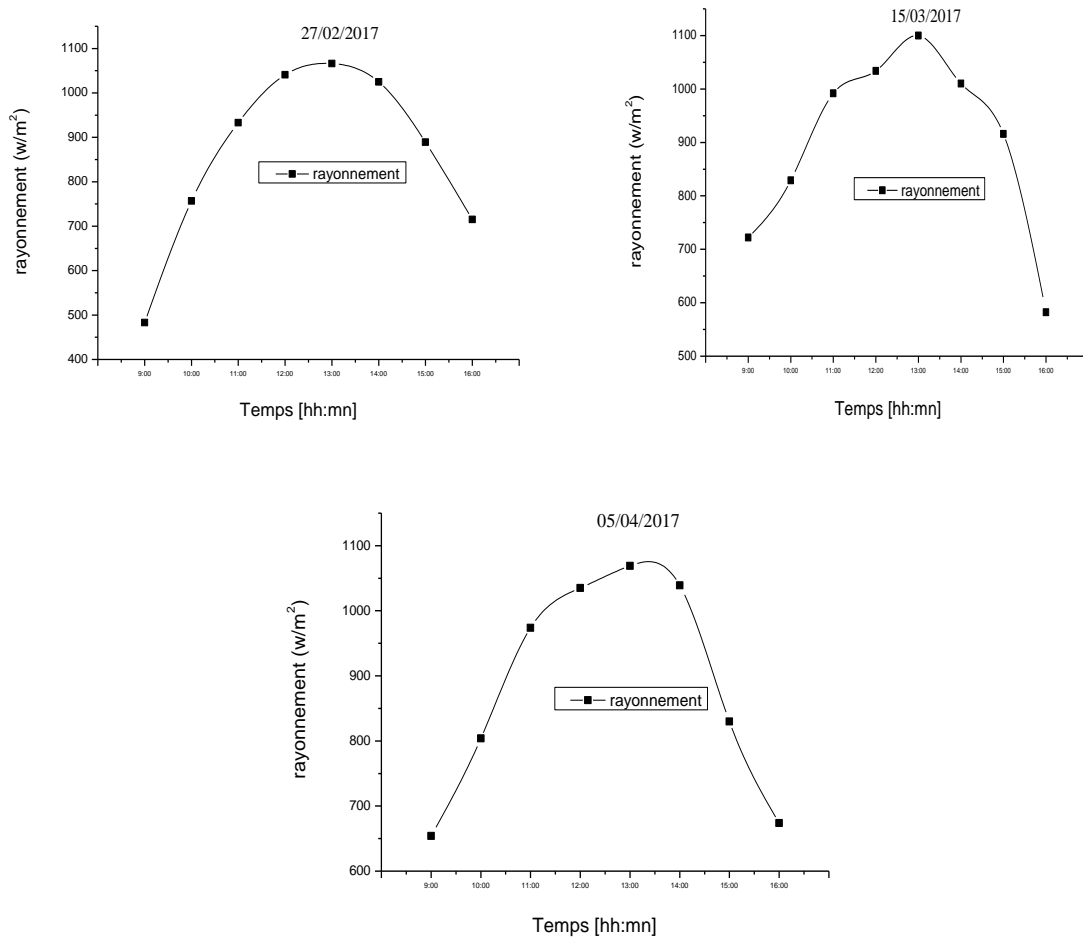


Fig.IV.8: Variation du rayonnement solaire en fonction de temps (Journées de séchage du piment) .

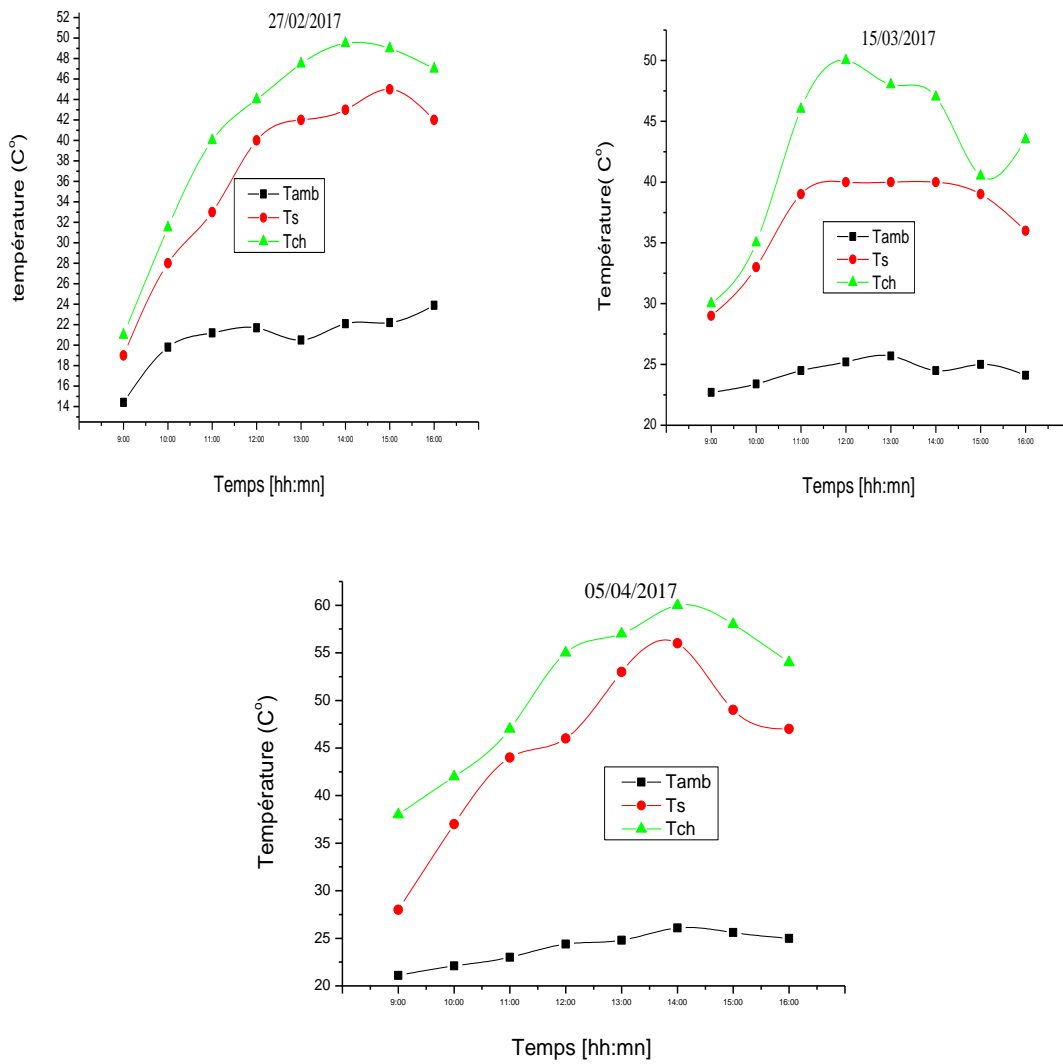


Fig. IV.9: Variation des températures (amb, de sortie, chambre de séchage) en fonction du temps (Journées de séchage de la menthe).

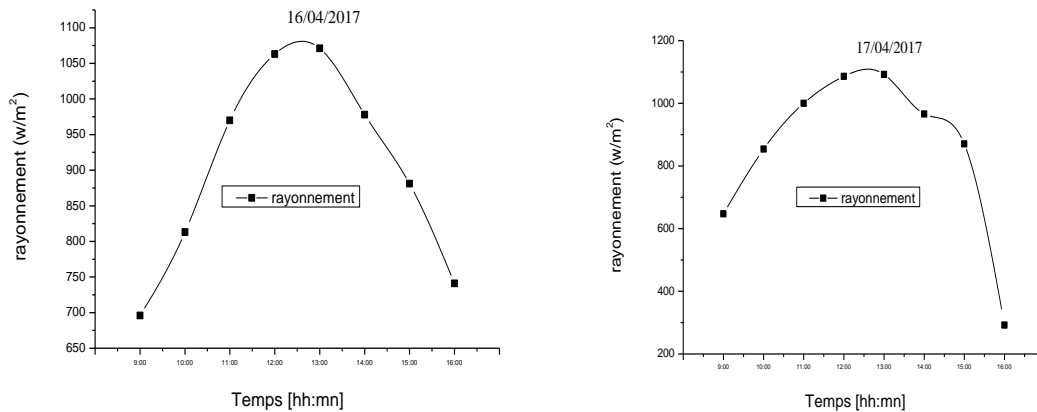


Fig .IV.10 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps (Journée de séchage du piment)

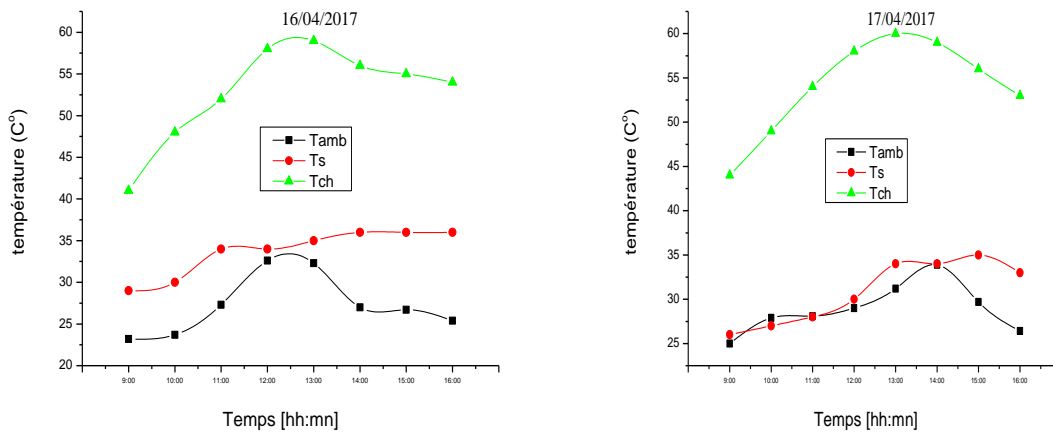


Fig. IV.11: Variation des températures (amb, de sortie, chambre) en fonction du temps (Journées de séchage de la menthe).

La figure 12 traduit la variation du rendement du capteur en fonction du temps pour deux débits différents. Dans cette expérience, nous avons utilisé le premier jour (27.02.2017) un débit de 25 m³/h, le deuxième jour (15/03/2017) un débit de 30 m³/h et le troisième jour (05/04/2017) un débit de 50 m³/h.

On peut remarquer pour ces trois valeurs de débit que le rendement augmente avec l’augmentation du débit, il été au alentour de 11.5% pour les deux premières journées (Qv=25 et 30 m3/h) et 30% pour la troisième journée (Qv=50%).

Pour les journées de séchage nous avons utilisé deux débits très proches, ce qui ne nous a pas permis de comparer entre les rendements en fonction du débit. Il est à Noter que le rendement augmente au fil du temps pour atteindre sa valeur maximale à la fin de l'expérience (Fig. 13).

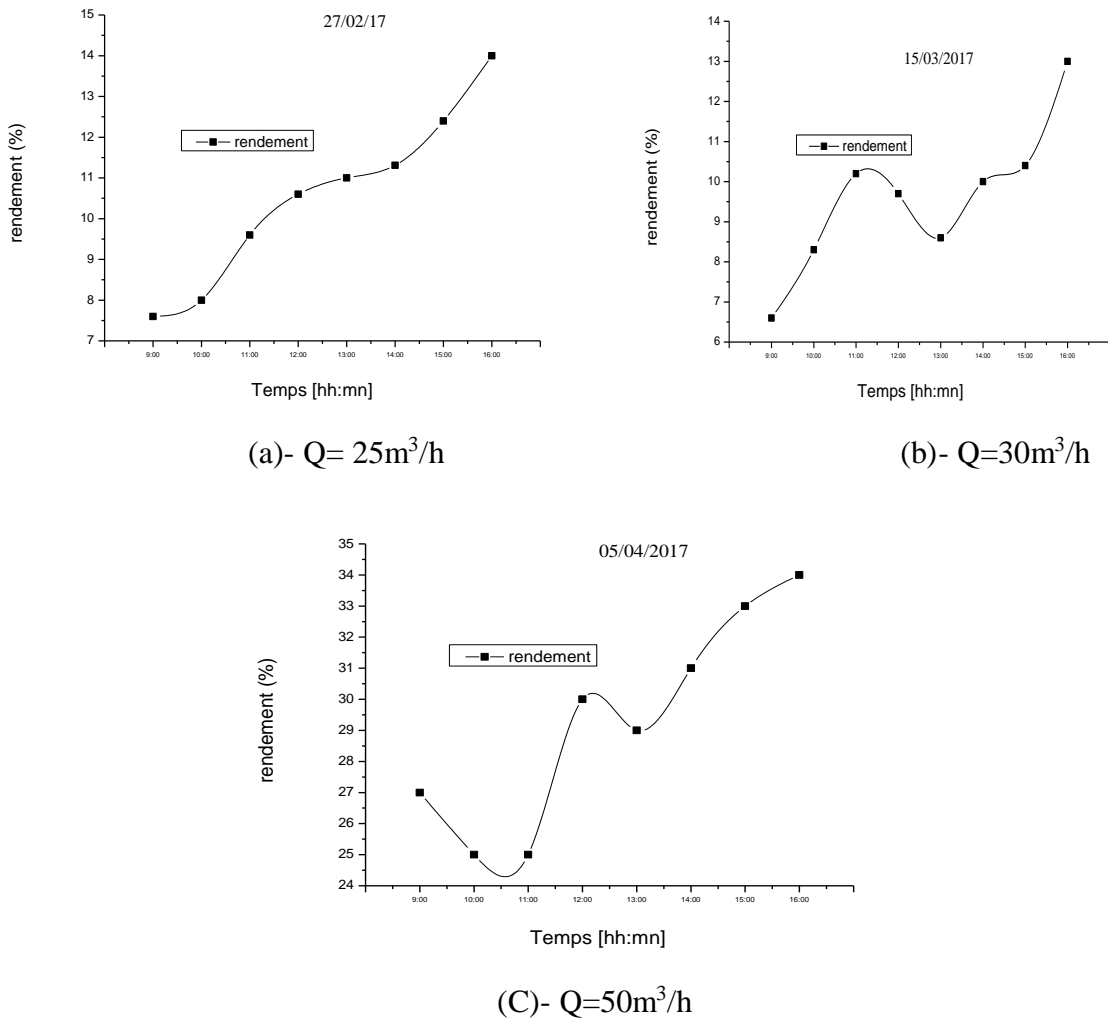


Fig.IV.12: Variation du rendement en fonction du temps pour différents débits.

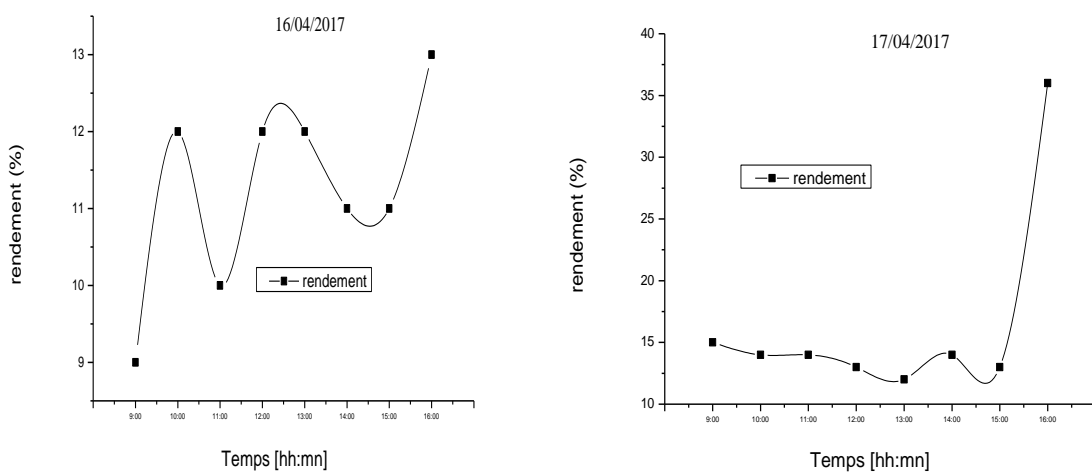


Fig .IV.13: Variation du rendement en fonction de temps pour différents débits ($Q_{v1}=30\text{m}^3/\text{h}$ et $Q_{v2}=50\text{m}^3/\text{h}$).

IV. 6 Etude de la cinétique de séchage des différents produits pour les deux cycles :

Afin de pouvoir analyser l'évolution de quelques paramètres de séchage des produits étudiés, nous avons utilisé une seule claie placée au milieu de l'enceinte de séchage. Nous avons procédé au séchage des deux produits agricoles. Pour cela, nous avons utilisé différents débit d'air de séchage et deux cycles de séchage ; ouvert et fermée.

Pour ce faire, nous exposons à chaque fois le séchoir sous rayonnement solaire naturel durant toute la journée (de 9h00 à 16h00) sous des conditions atmosphériques réelles. Les mesures de températures, poids du produit, rayonnement et vitesse du vent sont effectués chaque heure. Pour le deuxième cycle (cycle fermée), nous ouvrons une des portes de la chambre de séchage à chaque fois que la température de la chambre atteint une valeur de 60°C pour ne pas détruire le produit à séché.

IV.6.1 Cas du piment

Les figures (IV.14 et IV.15) présentent la perte de masse en fonction du temps dans les deux systèmes (ouvert et fermé) et pour deux vitesses de sortie $V = 2.5$ et $V = 5$ m/s. On remarque qu'au départ, les deux courbes démarrent pareillement, la perte de masse à $t = 9$ h00 est nulle, ensuite une allure différente. La courbe relative au système fermé présente toujours les plus grandes valeurs de perte de masse jusqu'à la fin de l'expérience. Le produit dans le système fermé est complètement séché à 16h00 du deuxième jour (pour les deux vitesses), par contre le séchage du produit dans le système ouvert se continue jusqu'à 16h00 du troisième jour (pour les deux vitesses d'air).

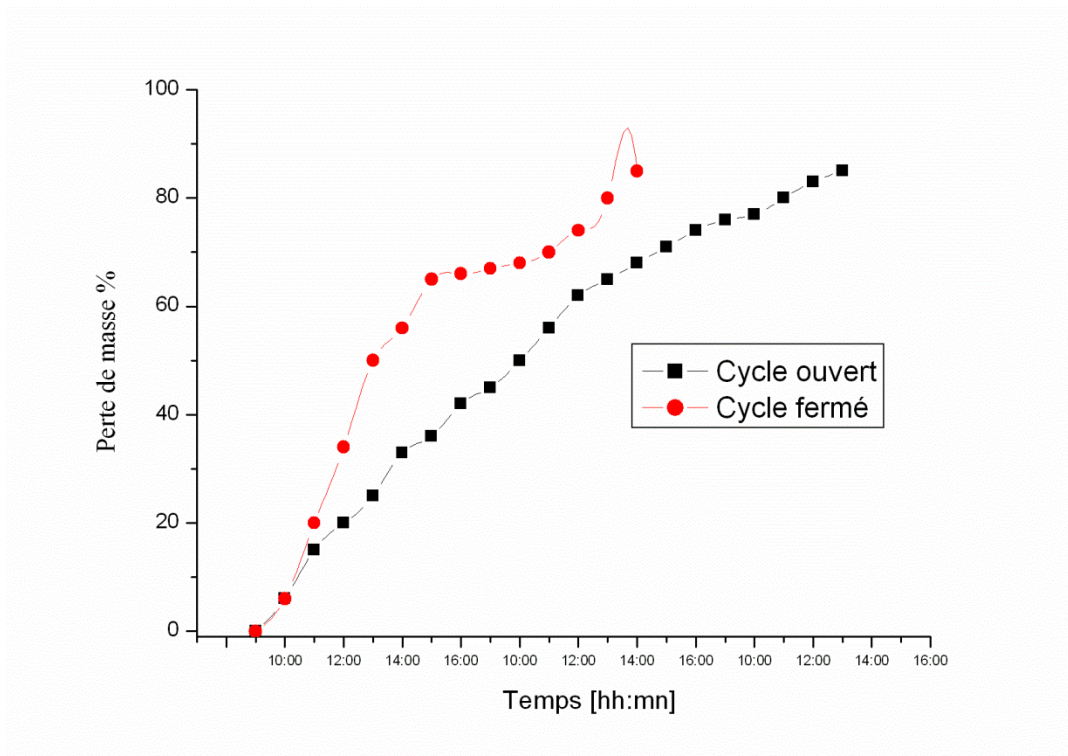


Figure IV.14 : Evolution de la perte de masse en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) ($V=2.5$ m/s).

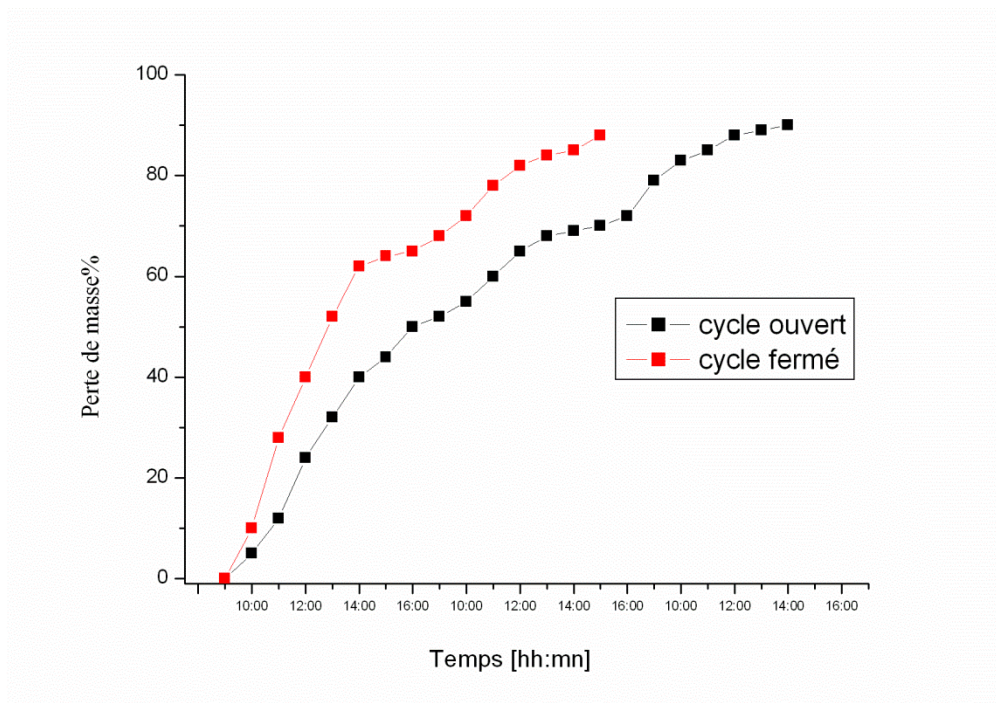


Figure IV.15: Evolution de la perte de masse en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) ($V= 5$ m/s).

La figure (IV.16 et IV.17) présente l'évolution de la teneur en eau à base sèche du produit pour les deux systèmes ; fermé et ouvert et pour deux vitesses de sortie ($V= 2.5$ et 5 m/s). D'après ces deux figures, on remarque que lorsque le cycle est fermé, le produit atteint sa teneur en eau finale après 12heures pour $V=5$ m/s et après 13heures pour $V=2,5$ m/s. En cycle ouvert le temps de séchage devient 18 et 19 heures pour les deux vitesses 5 et 2.5m/s successivement. Ces valeurs confirment que le gain (en terme temps) apporté par l'utilisation du cycle fermé est de 30%. D'autre part l'utilisation d'une vitesse d'air $V=5$ m/s ($50\text{m}^3/\text{h}$) réduit le temps de séchage de 6 à 9%.

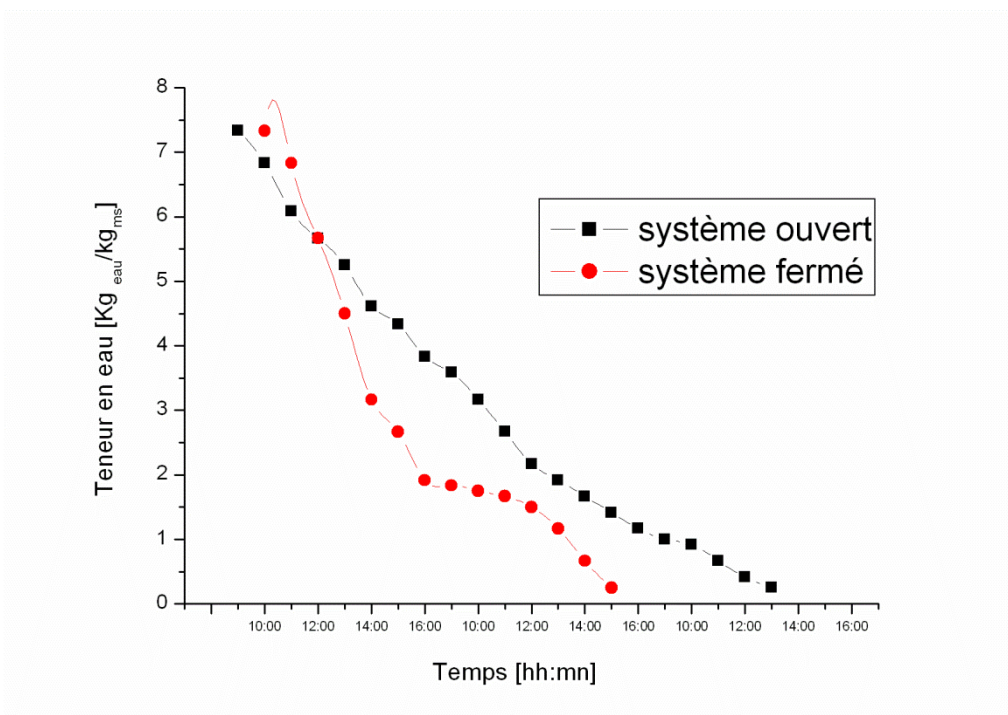


Figure IV.16 : Evolution de teneur en eau en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) ($V=2.5$ m/s).

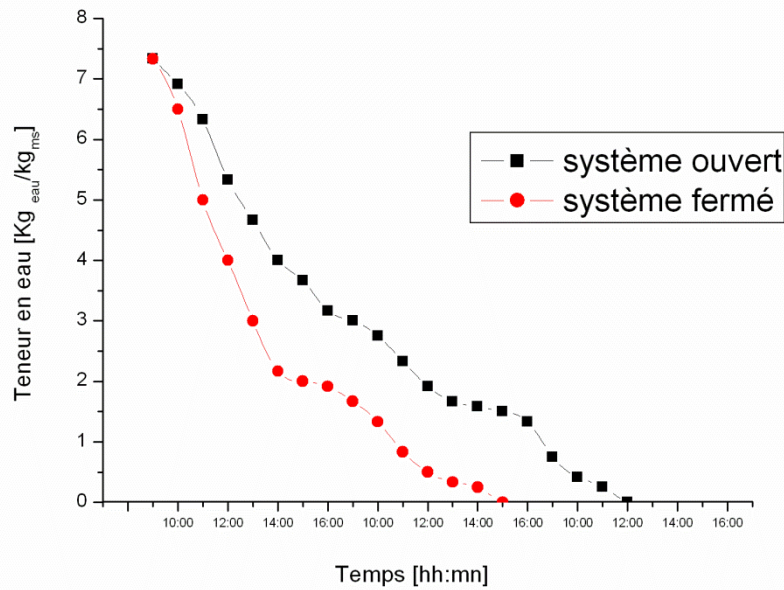


Figure IV.17 : Evolution de teneur en eau en fonction de temps pour les deux systèmes (piment vert) ($v=5$ m/s).

Les figures (IV. 18) et (IV.19) montrent la variation de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (fermé, ouvert) et les deux vitesses de sortie d'air. Pour le système fermé, la vitesse la plus élevée correspondent à 1.39 ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}/\text{h}$) pour une vitesse d'air $V=2.5$ m/s et 1.57 ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}/\text{h}$) pour la vitesse d'air $V=5$ m/s. La vitesse de séchage pour le cycle ouvert est égale à 0.78 ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}/\text{h}$) pour $V= 2.5$ m/s et 1.0 ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{piment}}/\text{h}$) pour $V= 5$ m/s. Ceci confirme que, le système le plus performant est le séchoir travaillant en cycle fermé avec un débit d'air de $50\text{m}^3/\text{h}$.

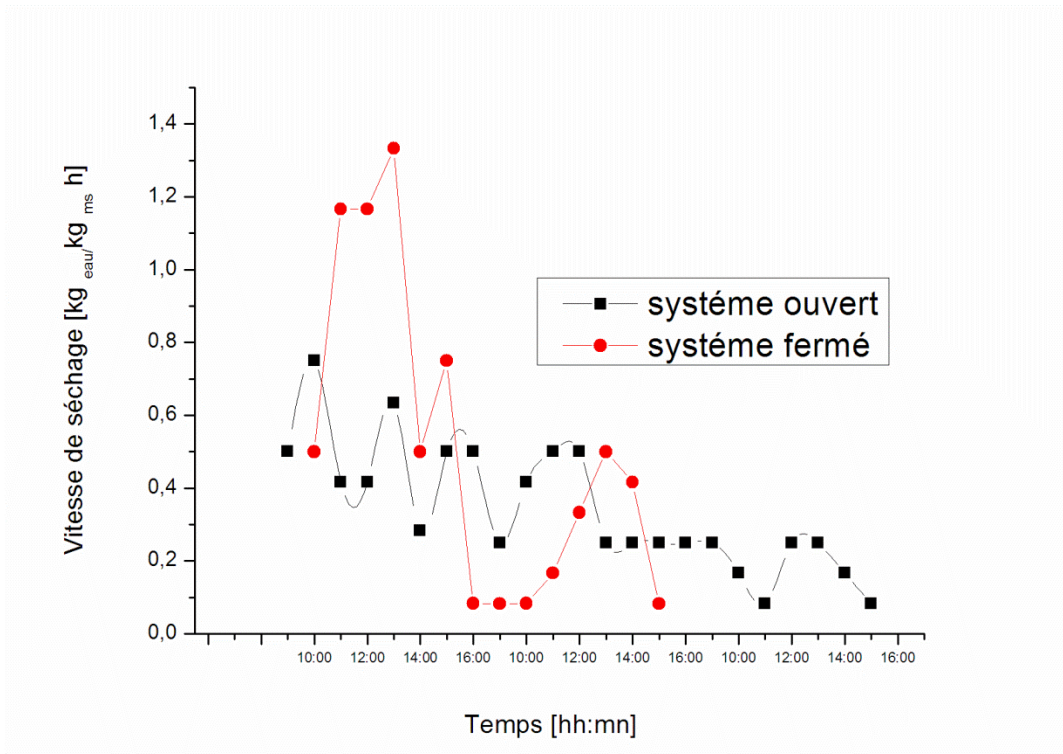


Figure IV.18 : Evolution de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (piment vert) (V=2.5m/s).

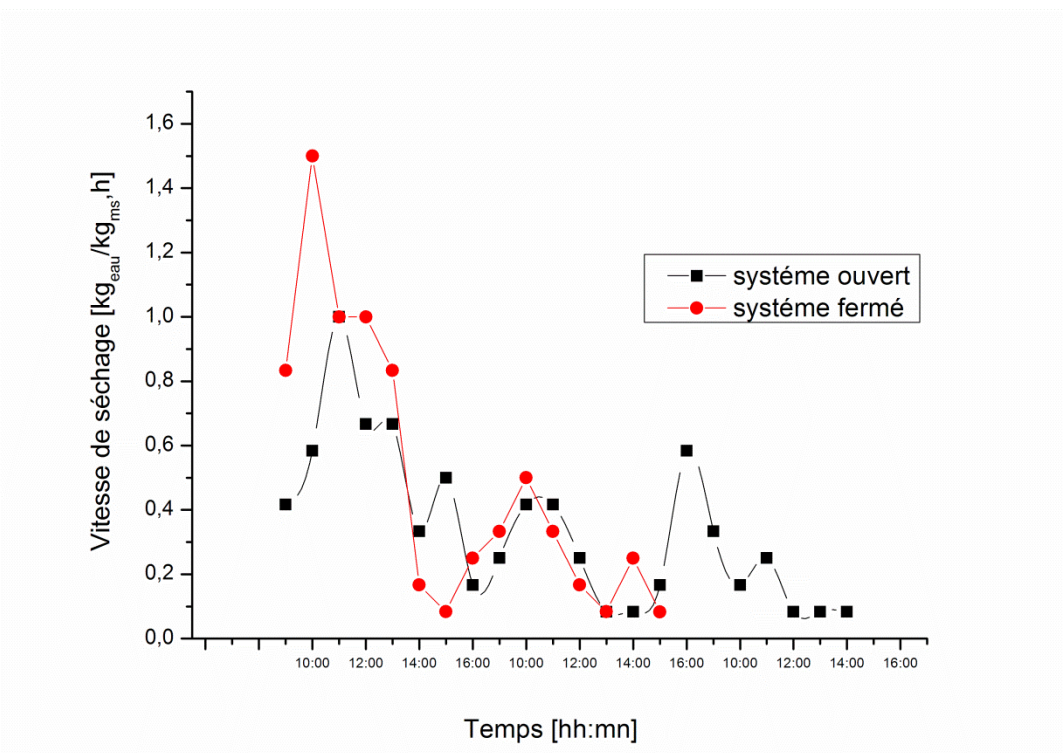


Figure IV.19 : Evolution de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (piment vert) (V=5 m/s).

IV.6.2 Cas de la menthe

Les figures (IV.20 et IV.21) présentent l'évolution du poids de la menthe verte pour les deux systèmes (fermé, ouvert) et pour deux vitesses ($V=2.5$ et 5m/s). Nous remarquons une forte diminution du poids lorsque le système est fermé et une importante influence de la vitesse d'air asséchant. Le poids final est atteint après 7 heures lorsque le système est fermé et la vitesse d'air $V=5\text{m/s}$ et 13 heures lorsque la vitesse $V=2.5\text{m/s}$.

Lorsque le système est ouvert, la teneur en eau finale est atteinte après 14 heures pour la vitesse d'air $V=5\text{m/s}$ et 19 pour la vitesse 2.5m/s .

D'après ces résultats, il s'avère que le gain apporté par l'utilisation d'un système fermé est entre 47 et 26% ($V=5$ et 2.5 m/s , successivement). L'utilisation d'une vitesse d'air $V=5\text{m/s}$ ($Q_v = 50\text{m}^3/\text{h}$) réduit le temps de séchage avec 50% pour le cycle fermé et 31% pour le cycle ouvert.

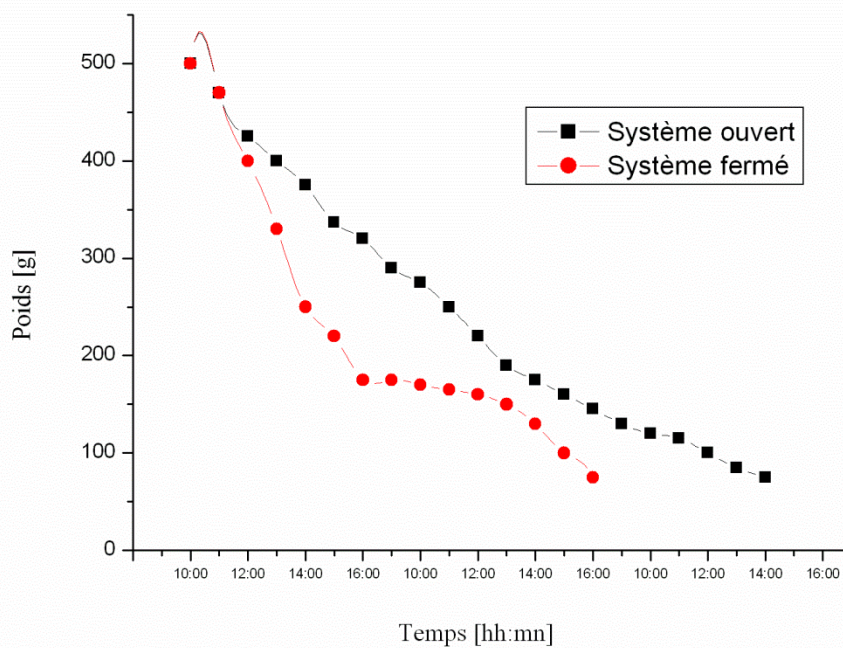


Figure IV.20 : Evolution du poids de la menthe en fonction du temps pour deux les deux cycles ($V=2.5\text{ m/s}$).

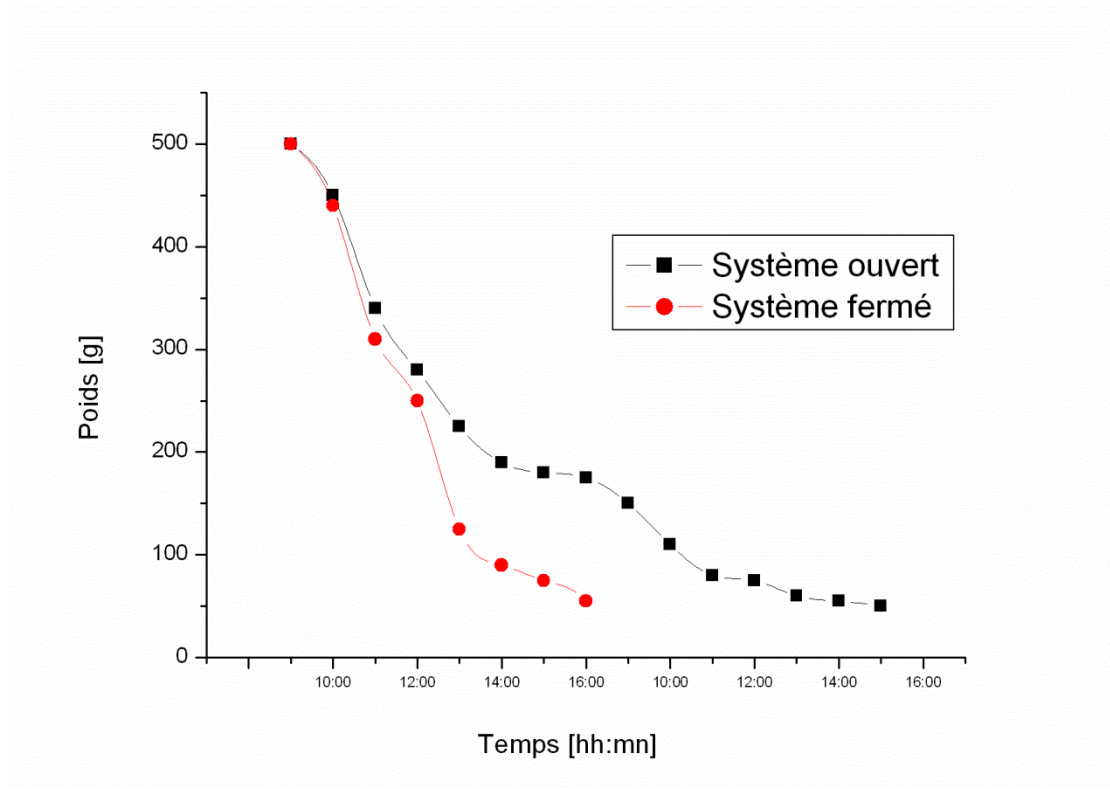


Figure IV.21: Evolution du poids de la menthe en fonction du temps pour deux les deux cycles ($V=5$ m/s).

Le figure (IV.22 et 23) présentent la perte de masse et la teneur en eau en fonction du temps pour les deux systèmes (ouvert et fermé), On remarque qu'au départ les deux courbes démarrent pareillement, la perte de masse à $t = 9h00$ est nulle, ensuite une allure différente. La courbe relative au système fermé présente toujours les plus grandes valeurs de perte de masse jusqu'à la fin d'une expérience. Cette figure confirme la discussion suscitée de la figure 20.

Nous notons que les valeurs de perte de masse et de la vitesse de séchage, sont plus élevées dans l'expérience de la menthe verte que celle du piment vert.

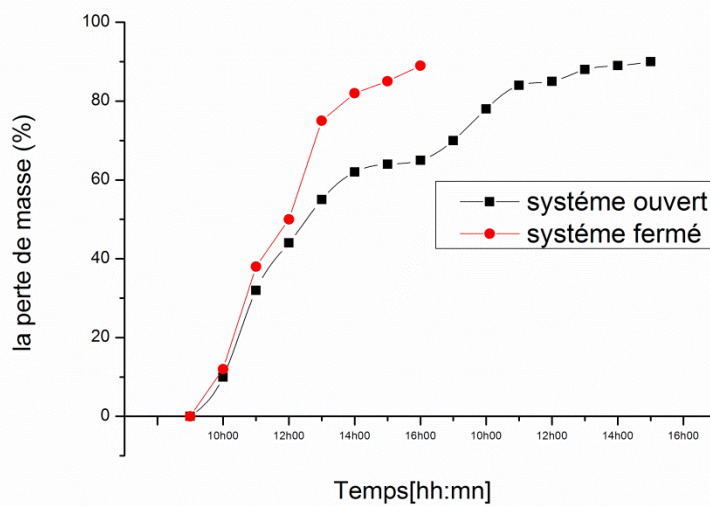


Figure IV.22. : Evolution de la perte de masse de la menthe en fonction du temps pour les deux systèmes ($v=2.5$ m/s)

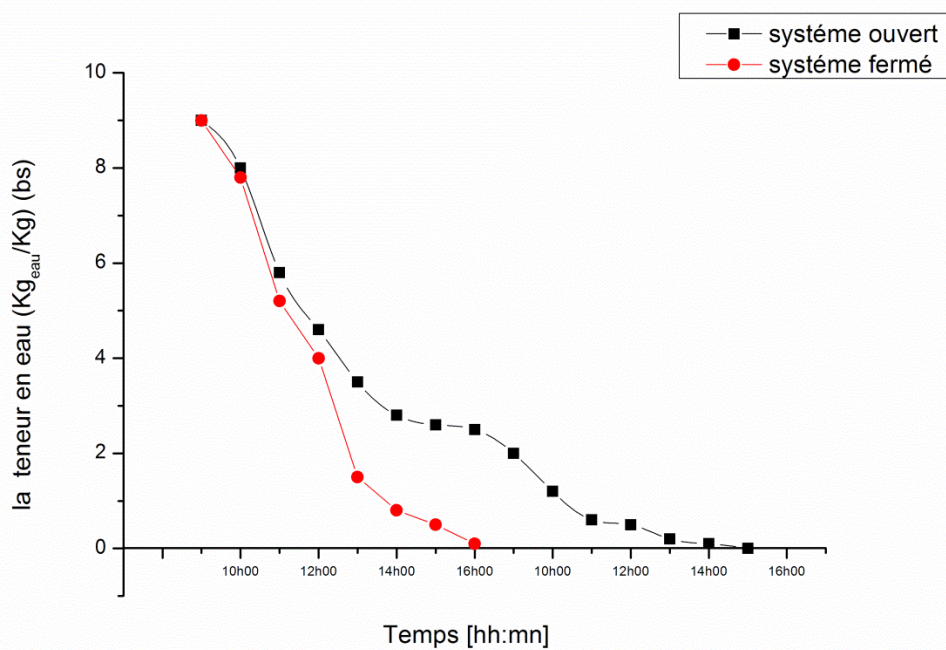


Figure IV.23: Evolution de teneur en eau de la menthe en fonction de temps pour les deux systèmes ($v=2.5$ m/s).

La figure IV.24 montre la variation de la vitesse de séchage pour les deux systèmes (fermé, ouvert). On remarque que la vitesse moyenne de séchage pour le cycle fermé est plus élevée que celle du système ouvert.

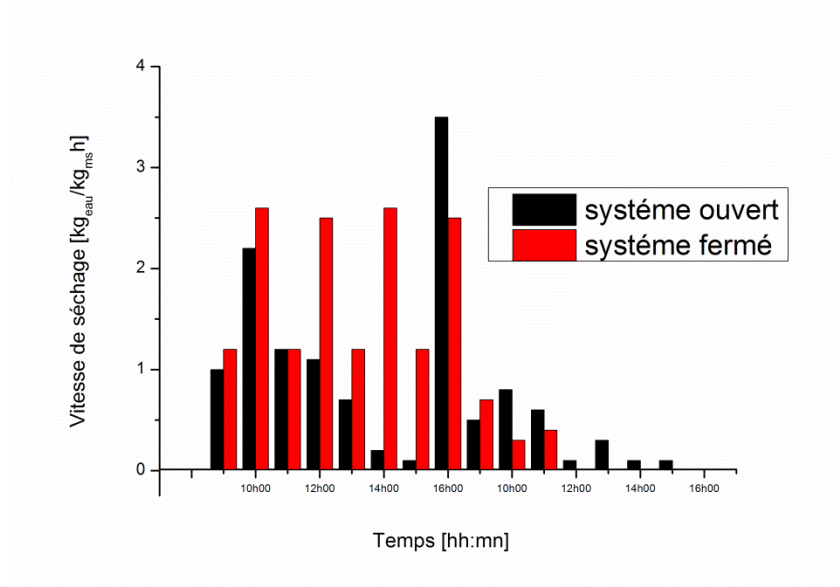


Figure IV.24 : Evolution de la vitesse de séchage de la menthe pour les deux systèmes ($v = 2.5 \text{ m/s}$).

Conclusion Générale

Conclusion générale

A la suite des résultats présentés dans ce mémoire, nous espérons avoir contribué à des applications performantes des capteurs solaires à air au séchage des produits agro-alimentaires.

L'apport principal de ce travail expérimental, est l'amélioration du temps de séchage en utilisant deux cycles différents de circulation de l'air ; le cycle ouvert et le cycle fermé. Pour se faire nous avons suivi l'évolution de certains paramètres du séchage solaire indirect par convection forcée de l'air chaud qui est assuré par un capteur solaire plan à air.

La partie expérimentale a pu être réalisée grâce aux installations conçues et expériences menées. Ces installations sont réalisées à l'université de Biskra, par des anciens étudiants d'ingénierat.

Deux produits agro-alimentaires ; le piment vert et la menthe vert, ont été testés afin de mettre en évidence l'influence de l'utilisation des systèmes cités précédemment, ainsi que l'influence du débit sur les différents paramètres liés directement au séchage.

Au cours du déroulement du processus de séchage, les variations des conditions climatiques, de la vitesse de séchage, la température ainsi que le poids du produit et sa teneur en eau ont été suivis.

Il ressort de cette étude que :

- Le rendement thermique du CSP augmente avec l'augmentation du débit d'air.
- Le séchage en cycle fermé réduit sensiblement le temps de séchage en comparant avec le cycle ouvert ; cette réduction peut atteindre une valeur de 50% du temps de séchage.

En revanche, il s'avère des résultats qu'il est plus intéressant de sécher avec un séchoir solaire travaillant en cycle fermé et avec un débit proche de 50m³/h.

Enfin, on rappelle qu'il y a des limites pour l'utilisation des températures élevées, car chaque produit à sécher possède une température maximale de séchage. Pour cela, nous avons procédé à ouvrir l'une des portes du séchoir à chaque fois que la température de la chambre de séchage s'approche de 60°C.