

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en génie mécanique

Option : système thermique et maîtrise de l'énergie

**Etude théorique et expérimentale du séchage solaire
de certains produits agro-alimentaires**

Présenté par :

HOUHOU HATEM

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Dr. N.MOUMMI	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr.A.MOUMMI	Maitre de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. A.BRIMA	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Dr. A.BENCHABANE	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

Dédicace

A la mémoire de ma très chère défunte mère.

A mon père Sadoq, ma sœur Sara mes frères Amine, Ilyas et Saber.

A ma grande famille et spécialement mes tantes Saliha, Badia, mes oncles, mes cousins Abd elali, Azzedin, Sohaib, Raouf.

A mes chères amis Taha, Mouatez, Chokri, Ali, Khaled, Naim et Moustapha.

Remerciements

Ce travail a été réalisé sous la direction du Mr Moummi abdelhafid et Mr Chouchane nacer à qui j'exprime mes vifs remerciements pour avoir accepté, d'assurer la direction et l'encadrement de mon mémoire.

Je remercie également Messieurs Nourinne moummi, Professeur à l'Université de Mohamed Khider, Biskra et Monsieur Adel benchabane, Maître de conférences à l'Université de Mohamed Khider, Biskra, qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur Brima abdelhafid, Maître de conférences à l'Universitaire Mohamed Khider, Biskra, qui a bien voulu accepter de juger ce travail.

Je remercie également tout les enseignants de département de génie mécanique de l'Université de Mohamed Khider, Biskra.

Mr Djoudi tarek maitre assistant à l'université d'El- ouad.

M Ben amor mohamed directeur de centre de control technique et expertise à Hassi messaoud de m'avoir soutenu et encouragé de faire des recherches scientifiques.

En fin, Je remercie également tous mes très chers amis de Biskra, El oued qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

NOTATIONS

Symbols	Designations	Unités
T	Température	K
h_c	Coefficient de convection thermique	W/(m ² .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)
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
M_T	Masse totale	kg
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit	kg eau / (kg (MS).s)
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_m	Tension de vapeur	pascal
P	Pression totale	pascal
Ψ	Degré de saturation	%
X_{eq}	Humidité d'équilibre	kg eau / kg (MS)
H_{eq}	Humidité relative d'équilibre	kg eau / kg (as)
H_r	Humidité relative	kg eau / kg (as)
T_r	Température de rosé	K
ε	Porosité volumique	
C	Compacité	m ² /m ³
A	Surface d'échange	m ²
k, n	Constantes d'Henderson	
C_m	Fraction massique	
D_f	Coefficient de diffusion	m ² /s
k_f	Perméabilité intrinsèque	m ²
R^2	Coefficient de détermination	

Indices

amb	Ambiante
as	air sèc
CNTR	centre de la chambre
E-CAP	entrée du capteur
E-CHA	entrée de la chambre
ecm	entrée chambre moyenne
ext	Externe
int	Interne
Mh	masse humide
MS	masse sèche
S-CHE	sortie du cheminé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.Introduction générale.....	1
2.Référence.....	3

CHAPITRE N°1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	4
I.2 Etude bibliographique :	4
I.3 Conclusion.....	25
I.4 Référence.....	26

CHAPITRE N°II : LE SÉCHAGE ET LES SÉCHOIRS SOLAIRES

II.1 Introduction.....	27
II.2 Caractéristiques de l'air de séchage.....	28
II.2.1 Humidité absolue.....	28
II.2.2 Humidité relative.....	28
II.2.3 Degré de saturation.....	28
II.2.4 Températures caractéristiques de l'air humide.....	29
II.3 Caractérisation des solides humides	30
II.3.1 Humidité absolue.....	30
II.3.2 Humidité relative.....	30
II.3.3 Hygroscopicité.....	30
II.4 Caractéristiques d'un solide poreux	31
II.4.1 Porosité volumique d'un produit	31
II.4.2 Compacité d'un produit	32
II.5 Répartition de l'eau dans le matériau	33
II.5.1 Loi de Fick.....	34
II.5.2 Loi de Darcy	34
II.6 Séchage des produits agricoles	34

II.6.1 Le séchage convectif	34
II.6.2 Les théories descriptives du phénomène de séchage.....	35
II.6.3 Cinétique de séchage	37
II.6.4 Les périodes du séchage	37
II.6.4.1 Période de mise en température.....	38
II.6.4.2 Période à allure constante	38
II.6.4.3 Période de ralentissement	38
II.6.5 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage.....	39
II.6.5.1 Influence de la température de l'air	39
II.6.5.2 Influence de la vitesse de l'air	39
II.6.5.3 Influence de l'humidité de l'air	39
II.6.6 Types de modifications de la qualité du produit a séché.....	40
II.6.6.1 Modification biochimiques dues à la température	40
II.6.6.2 Pertes d'aromes	40
II.6.6.3 Modifications physiques et mécaniques.....	40
II.7 La classification des séchoirs.....	41
II.7.1 Les séchoirs solaires directs	41
II.7.1.1 Principe de fonctionnement.....	41
II.7.1.2 Type des séchoirs directs.....	42
II.7.1.2.1 La boîte de séchage ou séchoir coffre	42
II.7.1.2.2 Le séchoir intégral à convection naturelle.....	43
II.7.1.2.3 Le séchoir coquillage.....	44
II.7.1.2.4 Le séchoir cabane	45
II.7.2 Les séchoirs solaires indirects	46
II.7.2.1 Principe de fonctionnement.....	47
II.7.2.2 Type du séchoir indirect (le séchoir armoire).....	48
II.7.3 Les séchoirs hybrides	49

II.7.3.1 Types des séchoirs hybrides	50
II.7.3.1.1 Séchoir hybride à convection forcée	50
II.7.3.1.2 Le séchoir hybride solaire – gaz.....	51
II.7.4 Les séchoirs mixtes.....	52
II.8 Conclusion	53
II.9 Référence	55

CHAPITRE N°III: ETUDE EXPERIMENTAL

III.1Description du séchoir solaire	56
III.1.1 Le capteur solaire expérimental utilisé	56
III.1.2 Chambre de séchage.....	57
III.2 Protocole expérimental.....	57
III.2.1 La forme de découpage des produits.....	57
III.2.3 La disposition du produit	58
III.3 Étude expérimentale de l'effet de la forme, de la masse, de la disposition du produit et le débit d'air sur le séchage	59
III.3.1 Effet de formes du produit sur les performances du séchage	59
III.3.2 Effet de masse du produit sur le séchage	62
III.3.3 Effet de la disposition du produit dans l'enceinte du séchage	66
III.3.4 Effet du débit d'air asséchant sur le séchage	70

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale	74
---------------------------	----

1. Introduction générale

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal (Bennamoun and Belhamri 2007). Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles (Farhat et al. 2004) .

L'augmentation des prix et la pénurie de carburants conduisent à des études et des recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en voie de développement (Busunia 2001).

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des dépenses et pertes après les récoltes.

Le séchage solaire des récoltes, fruits, légumes et viandes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air (exposition direct ou soleil). Il a été employé pour sécher des grains, fruits, viandes, poissons et d'autres produits alimentaires destinés à la consommation. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle (exposition direct ou soleil) sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires.

Un séchoir solaire correctement conçu peut alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit sec (final) peuvent être améliorées.

Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage.

Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage. Ces dernières années, de nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire, principalement pour préserver les produits alimentaires. Les systèmes de séchage solaire doivent être correctement conçus pour répondre aux exigences du séchage, particulièrement ; les récoltes spécifiques, et pour donner une exécution satisfaisante en ce qui concerne le besoin en énergie. Des caractéristiques du séchage des matériaux particuliers étant séchés et des modèles de simulation sont nécessaires dans la conception, la construction et l'exploitation des systèmes de séchage. Plusieurs chercheurs ont développé des modèles de simulation pour les systèmes à convection naturel et forcée.

L'objectif de notre travail consiste à l'étude de l'influence des quelques paramètres sur la cinétique du séchage du piment vert et la pomme de terre en utilisant un séchoir solaire indirect à convection forcée. Ces paramètres sont :

- La forme de découpage de produit.
- La masse initiale du produit.
- La disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre du séchoir.
- L'utilisation des différents débits d'air.

Le présent travail comporte trois chapitres.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur quelques travaux concernant le séchage solaire tel que la conception des capteurs solaires, des séchoirs solaires, l'amélioration de leurs performances et l'étude de la cinétique de séchage,.....etc.

Le deuxième chapitre est consacré à l'établissement des différentes équations mathématiques, gouvernants le transfert de chaleur et de masse ayant lieu dans la masse à sécher suivi par un bref historique sur le séchage solaire et les différents types des séchoirs solaires utilisés.

Dans le troisième chapitre on a fait une présentation de nos résultats expérimentaux et une interprétation des graphes pour le but d'atteindre l'objectif de notre travail.

2. Référence

- Bennamoun, L., A. Belhamri, "Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles." *Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda*: 201-204 (2007).
- Busunia, M., "Characteristics of rough rice under natural convection." *Journal of Food Engineering* **47**: 295-301 (2001).
- Farhat, A., S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, A. Belghith, "Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse." *International Journal of Thermal Science* **43**: 53-58 (2004).

I.1. Introduction

En raison de leur disponibilité, surtout en périodes de bonnes saisons, pour le stockage de nombreux produits agro-alimentaires plusieurs solutions sont proposées, la congélation, culture sous serre, le traitement chimique et le séchage.

Le but de l'opération de séchage est d'éliminé ou bien évaporé l'eau qui se trouve a l'intérieur du produit, cette opération est assurée par plusieurs méthodes par exemple : l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédés est effectué dans une chambre bien isoler thermiquement pour assuré l'opération de séchage.

Le séchage solaire dans les régions ou le gisement solaire et important est très utile d'un point de vue économique. Cette opération de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des produits agro-alimentaires, qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, constitue un moyen rentable pour la déshydratation de ces produits.

En agro-alimentaire, d'une façon générale, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher.

Il existe plusieurs critères pour classer les séchoirs solaires, parmi les plus importants on cite le séchage direct et le séchage indirect.

Dans le séchage direct, les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire, par contre dans le type indirect, le séchoir ce compose de deux parties, la première partie c'est un capteur solaire plan à air, dans le but est de capter les rayons solaires et les transformés en énergie thermique, cette énergie est transporté avec l'air à la deuxième partie qui est la chambre de séchage ou se trouve le produit à séché.

I.2. Etude bibliographique :

Plusieurs études ont été réalisées sur le séchage solaire qui s'est intéressés à la conception des capteurs et séchoirs, des études numériques sur le transfert de chaleur et de masse pour qui ont pour objectif de déterminer le bilan énergétique,.....etc.

Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005, leur travail est consacré à une étude comparative entre le séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir direct et indirect. Dans leur travail, ils ont entrepris l'étude du bilan d'énergie des modèles expérimentaux des séchoirs solaires de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agro-alimentaires, compte tenu les conditions ambiantes du site donné. La figure I.1 montre les deux types de séchoirs utilisés dans cette étude.



séchoir solaire de type direct

séchoir solaire de type indirect

Figure I.1 : deux type de séchoirs utilisés dans l'étude de

(Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

Les figures suivantes montrent quelques résultats présentés dans ce travail :

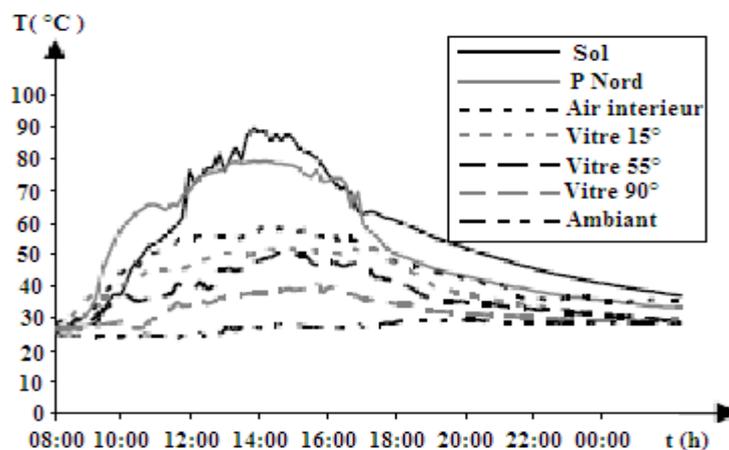


Figure I.2 : relevé des températures expérimentales dans le séchoir serre (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

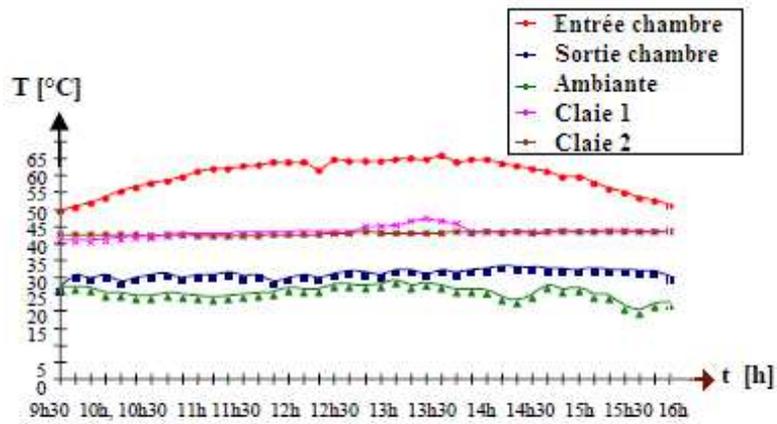


Figure I.3 : relevé des températures expérimentales dans le séchoir indirect (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

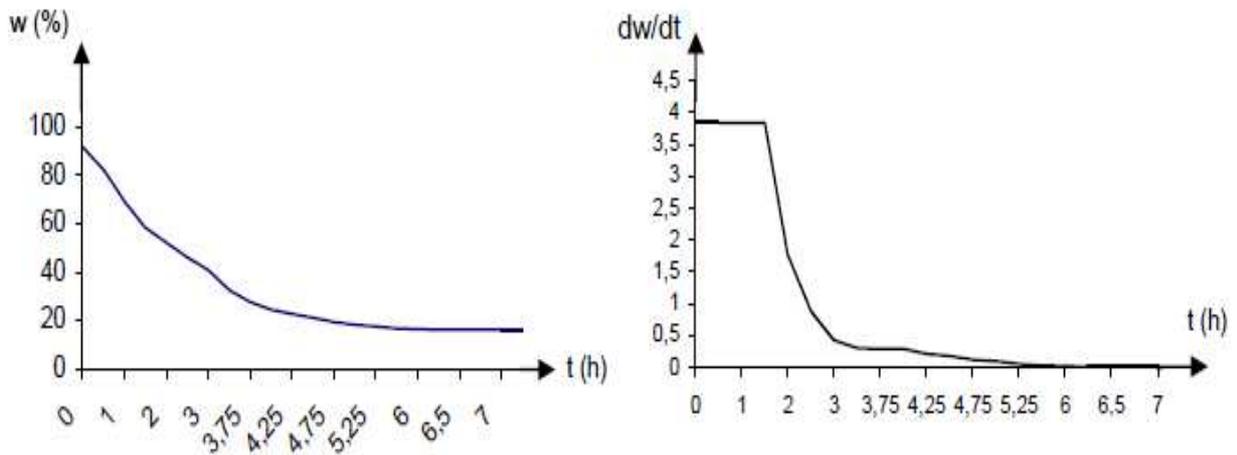


Figure I.4 : variation de l'humidité relative $W(\%)$ et la vitesse de séchage de la menthe (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

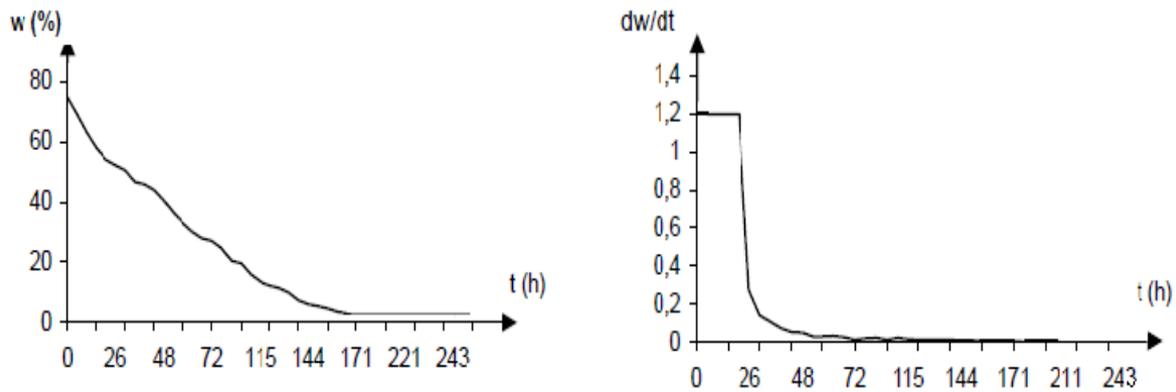


Figure I.5 : variation de l'humidité relative $W(\%)$ et la vitesse de séchage de raisin (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

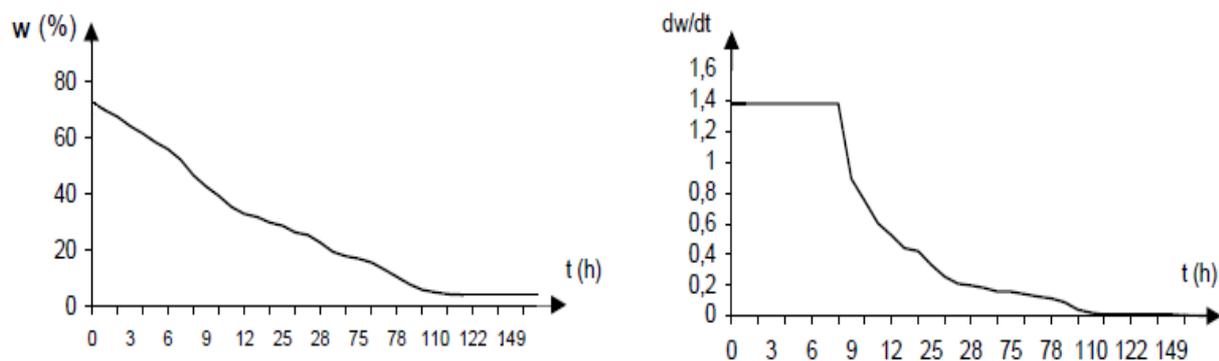


Figure I.6 : variation de l'humidité relative $W(\%)$ et la vitesse de séchage de banane (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005).

Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles généralement de tôles galvanisés, de bois et de polystyrène...etc

Plusieurs études ont été faites sur la première catégorie des séchoirs solaires indirects, ainsi que sur la réalisation des capteurs solaires, parmi, on cite le travail de Semmar, Betrouni et al. 1998. Ce travail porte sur l'étude et la conception d'un capteur solaire à air destiné à la production d'air chaud. Pour effectuer ce travail, ils ont adopté une approche théorique qui consiste à simuler son comportement thermique par un programme informatique utilisant un modèle mathématique, où tous les paramètres caractérisant les performances du système sont évalués instantanément durant la période d'ensoleillement. La partie expérimentale consiste à la réalisation du modèle considéré, enfin une interprétation des résultats obtenus est donnée pour valider le modèle utilisé.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, qui montrent les échanges thermiques en convection naturelle et forcée comme le montre les figures suivantes : * en mode de convection naturelle :

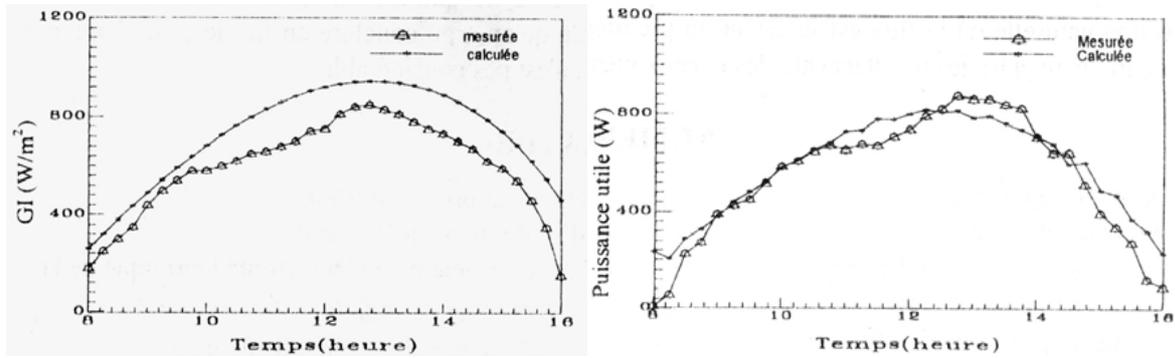


Figure I.7 : variation du rayonnement instantané et la puissance utile (mesurée et calculée)
(Semmar, Betrouni et al. 1998).

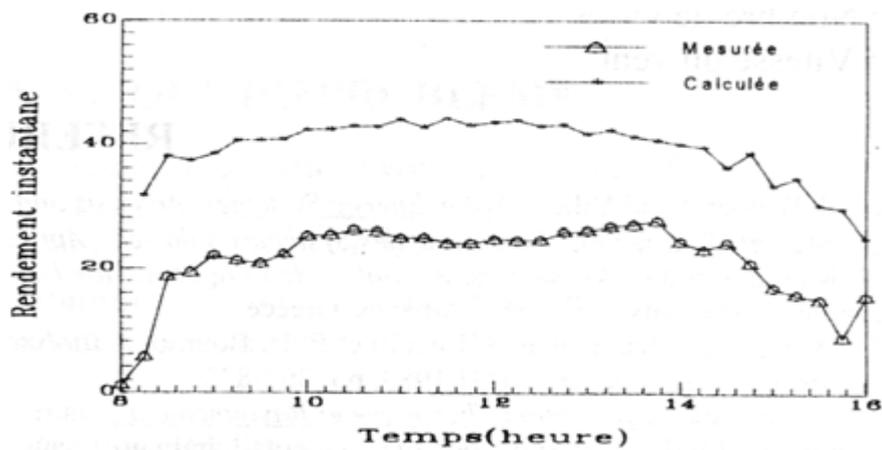


Figure I.8 : variation du rendement instantané (mesurée et calculée)
(Semmar, Betrouni et al. 1998).

* En mode de convection forcée :

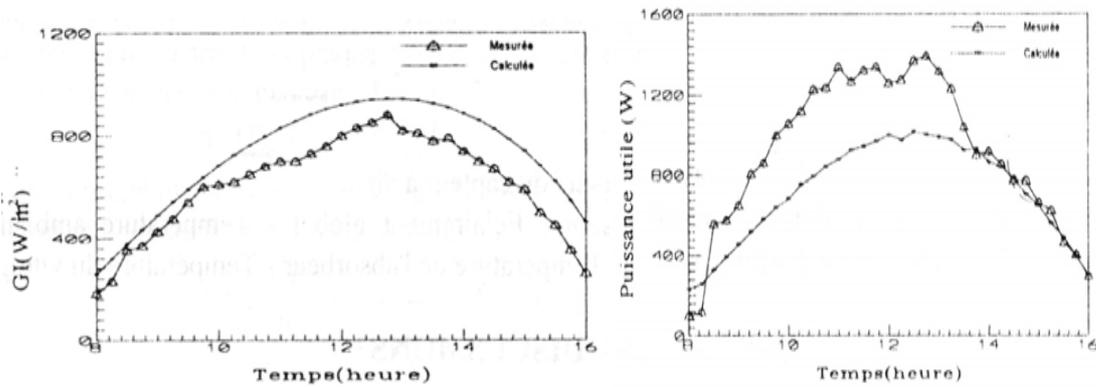


Figure I.9 : variation du rayonnement instantané et la puissance utile (mesurée et calculée)

(Semmar, Betrouni et al. 1998).

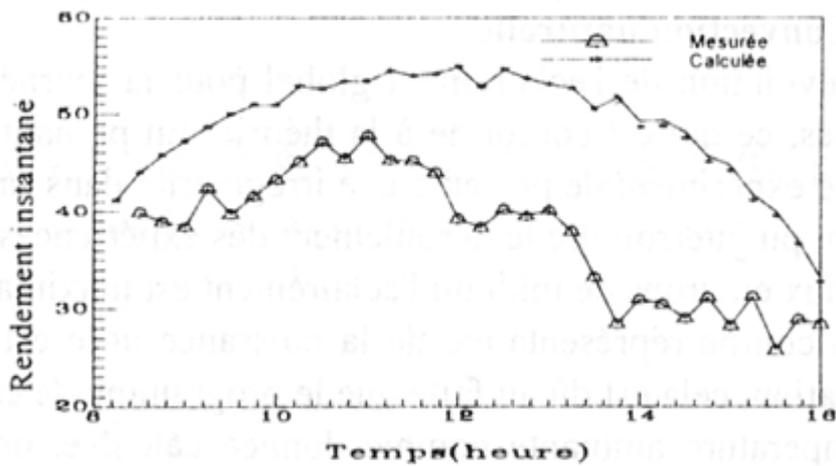


Figure I.10 : variation du rendement instantané (mesurée et calculée)

(Semmar, Betrouni et al. 1998).

Dans une autre étude sur l'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire à air, réalisée par Aoues, Moumni et al. 2009, où ils ont présenté une série de tests expérimentaux menés sur un capteur solaire plan, l'installation expérimentale complète comprend la mesure du rayonnement solaire global, la vitesse du vent, le débit d'air et les températures ambiante, de l'air à l'entrée et à la sortie. Pour optimiser les performances thermiques, le capteur a été garni dans sa veine d'air dynamique de rugosités artificielles de différentes formes et différents

arrangements, après une étude comparative, ils ont arrivé à choisir la bonne configuration parmi les quatre étudiées, qui permet d'obtenir le meilleur rendement du capteur.

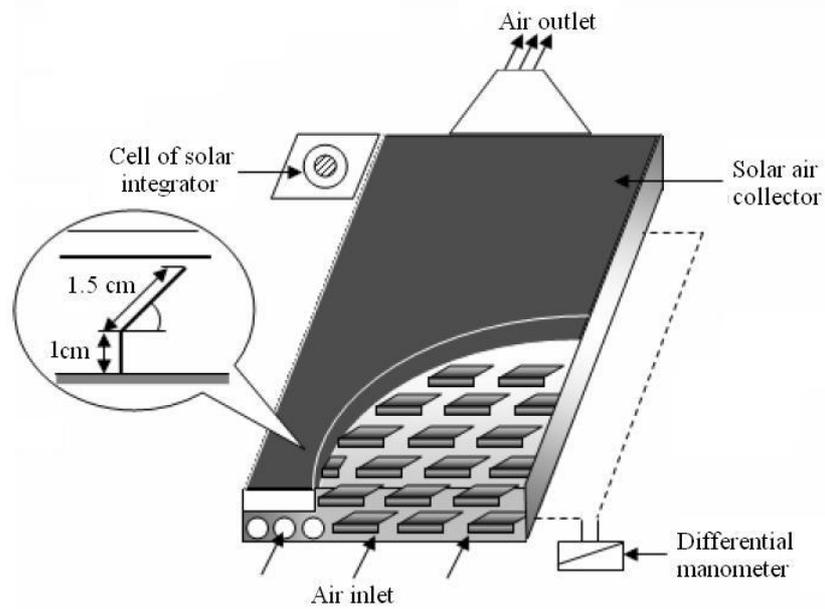


Figure I.11 : schéma de dispositif utilisé dans le travail de (Aoues, Moumami et al. 2009).

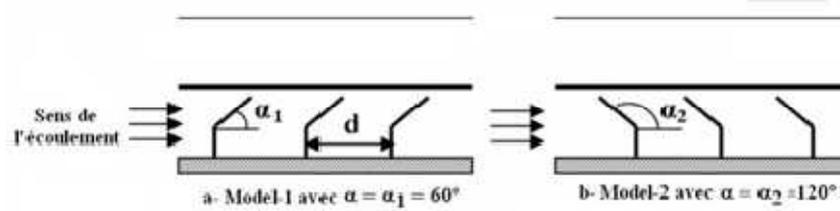
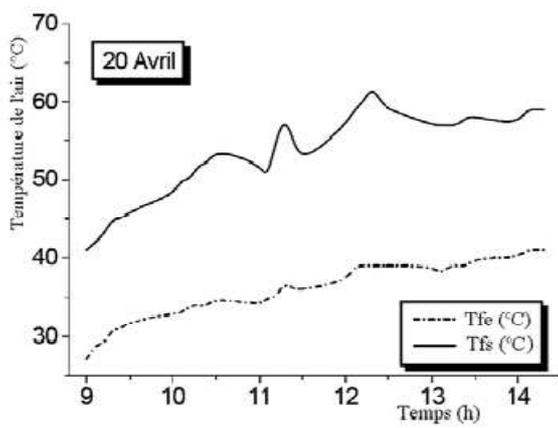
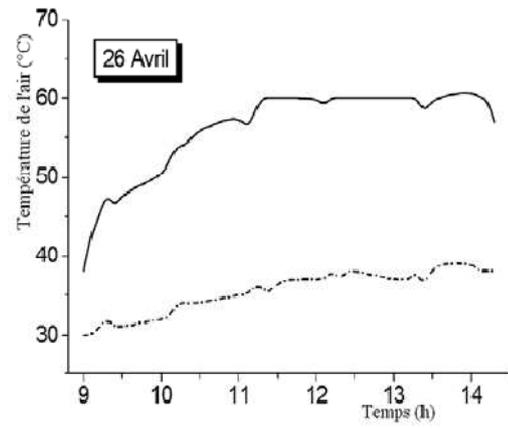


Figure I.12 : Schéma descriptif des chicanes.

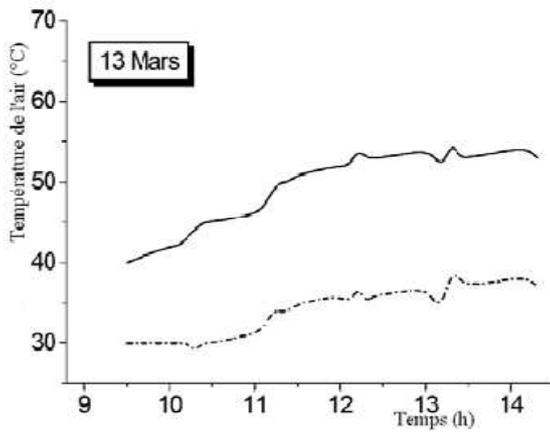
Les résultats numériques trouvés sont illustrés sous forme de graphiques qui montrent l'évolution des paramètres de performances thermiques figures (I-13) et (I-14).



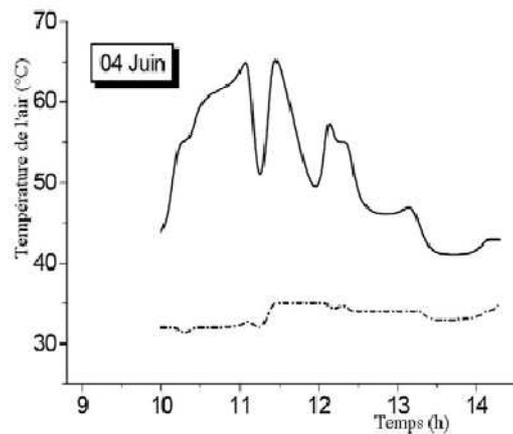
Configuration A1



Configuration A2



Configuration B1



Configuration B2

Figure I.13 : Evolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur en fonction du temps (Aoues, Moumami et al. 2009).

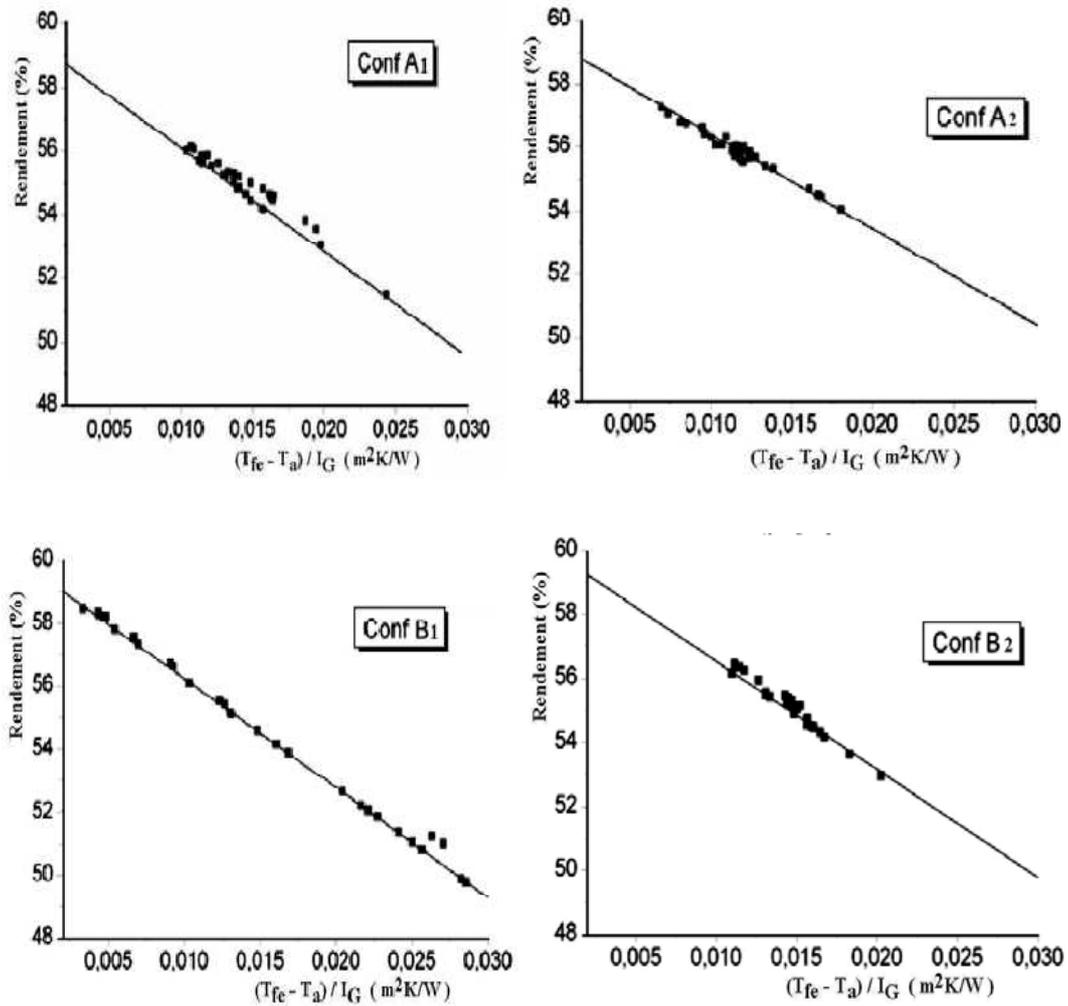


Figure I.14 : Variation du rendement en fonction du paramètre réduit $(T_{fe}-T_a)/I_G$

(Aoues, Moumami et al. 2009).

Pour réaliser un séchoir indirect, il faut couplée le capteur solaire à air avec une enceinte bien calorifugé, pour cela Boulemtafes and Semmar 1999, ont présentés un travail sur la conception et la réalisation d'un séchoir indirect.

Dans leur travail qui a eu pour objectif la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes. Le séchoir est constitué d'une boîte parallélépipédique, elle est alimentée en air chaud par un capteur solaire plan à air. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. La connaissance de l'évolution de tous ces paramètres et leur interdépendance, permet de sélectionner les types de produits susceptibles d'être séchés par ce séchoir. Enfin la mise en équation des phénomènes de

transfert de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage, permet de comparer entre théorie et pratique, pour faciliter ce travail ils ont proposé les hypothèses suivants :

- Les produits ont la même température et la même teneur en eau.
- L'ensemble des produits est considéré comme un milieu homogène qui sera caractérisé par sa température de surface.
- La porosité du séchoir chargé en produits reste constante au cours du séchage.
- La température, l'humidité, le débit de l'air asséchant sont homogènes et uniformes avant son entrée et après son entrée au séchoir.
- L'inertie thermique de l'air est négligeable devant celle des produits.
- Les parois ont une température uniforme.
- Les échanges radiatifs à l'intérieur de l'enceinte sont négligeables.
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables.

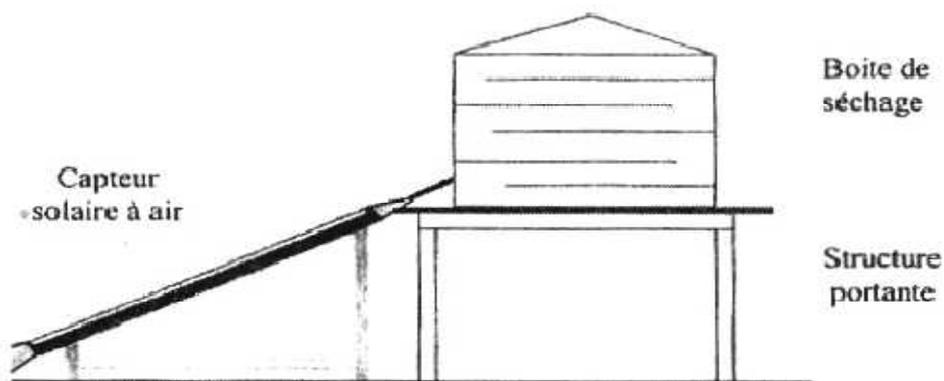


Figure I.15 : Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999.

Le tableau suivant présente une fiche technique de la boîte de séchage réalisée par Boulemtafes and Semmar 1999 :

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.1 : Fiche technique de la boîte de séchage (Boulemtafes and Semmar 1999)

Dilip en 2007 a développé un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage thermique pour assurer l'air chaud pendant la période non ensoleillée. Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygonale pour refléter le maximum du rayonnement solaire incident (figure I.16). Ce système est destiné pour le séchage de l'oignon, avec une capacité de 90 kg. Cette opération est effectuée pendant un jour du mois d'octobre.

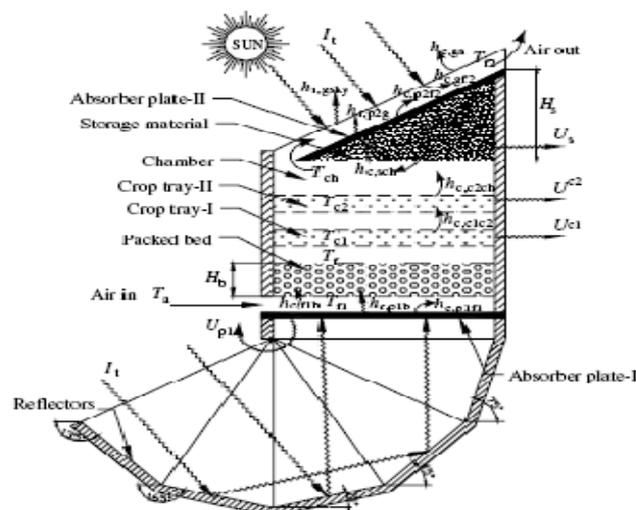


Figure I.16: Schéma d'un séchoir solaire avec stockage thermique (Dilip 2007)

L'étude expérimentale de (Khalil, Al-Juamily. et al. 200) est basée sur l'efficacité thermique d'un séchoir solaire indirect à convection forcée, qui se compose de trois parties : collecteur solaire, chambre de séchage et un ventilateur. Ce type de séchoir est destiné à sécher certains produits tels que le raisin, abricot, et haricots. Des expériences ont été faites en fonction de trois débits différents respectivement 0.076, 0.063 et 0.046 m³/s. Le procédé expérimental indique que la température de l'air à la sortie du capteur, est le facteur le plus important et montre que lorsque le débit augmente la température diminue.

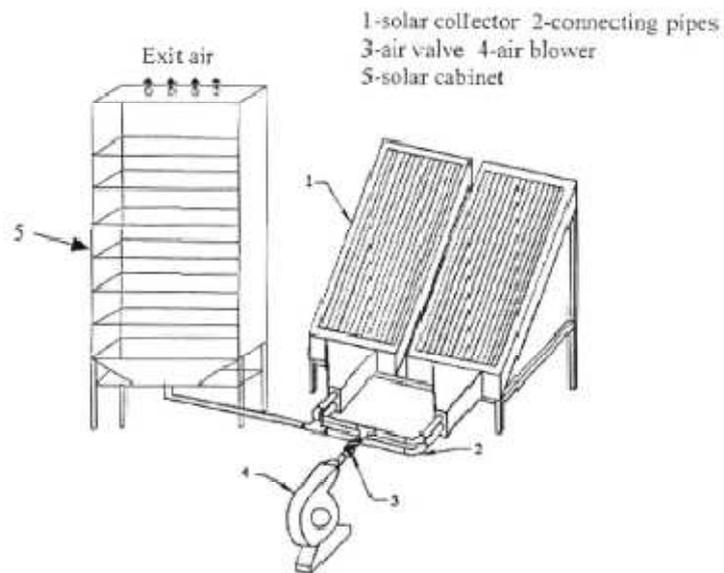


Figure I.17 : schéma descriptif du séchoir utiliser par (Khalil, Al-Juamily. et al. 2007)

Au sein de l'école de l'énergie et études environnementales en Inde, (Dilip R, Sawhney et al. 2002), ont utilisés un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle, leur séchoir est composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Les résultats obtenus par ce séchoir sont encourageantes, dont la température à la sortie varie entre 50 °C et 55 °C. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de Mars à Mai, les températures obtenues étaient suffisantes pour le séchage de plusieurs produits (fruits et légumes). Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend 04 jours, alors que le séchage traditionnel nécessite une durée allant de 07 à 15 jours.

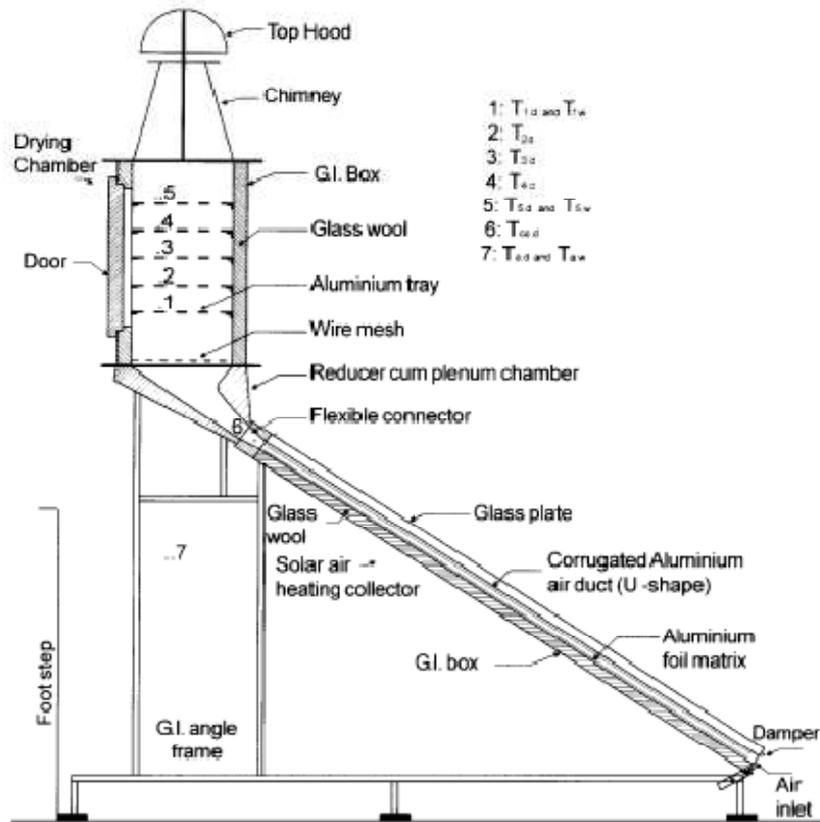


Figure I.18 : schéma descriptif du séchoir utilisé dans le travail de

(Dilip R, Sawhney et al. 2002)

Krokida, Karathanos et al. 2003, dans leur travail, s'intéresse à plusieurs paramètres intrinsèques et extrinsèques. Pour les paramètres extrinsèques ils ont pris en considération, entre autre la température, l'humidité et la vitesse de l'air, pour les paramètres intrinsèques il ont considérés, les dimensions des produits. L'objectif de cette étude est vérifier l'influence de ses paramètres sur la cinétique du séchage. Les intervalles considérés pour les différents paramètres choisis durant l'expérience sont 10 et 15 mm pour le diamètre du produit, 65, 75 et 85 °C pour la température de l'air; et 1,5, 2 et 2,5 m/s pour la vitesse de l'air et finalement 20 %, 30 % et 40 % pour l'humidité relative de l'air.

Ce qui a ressortit des différents résultats obtenus par cette étude est l'importance de certains paramètres, à savoir les conditions extérieures et les attributs du produit pour l'expression d'un modèle mathématique du séchage. Il a été constaté, également l'importance de la température de l'air comparée à sa vitesse, vis-à-vis à l'altération du séchage.

L'étude de Bennamoun and Belhamri 2003, montre 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.19

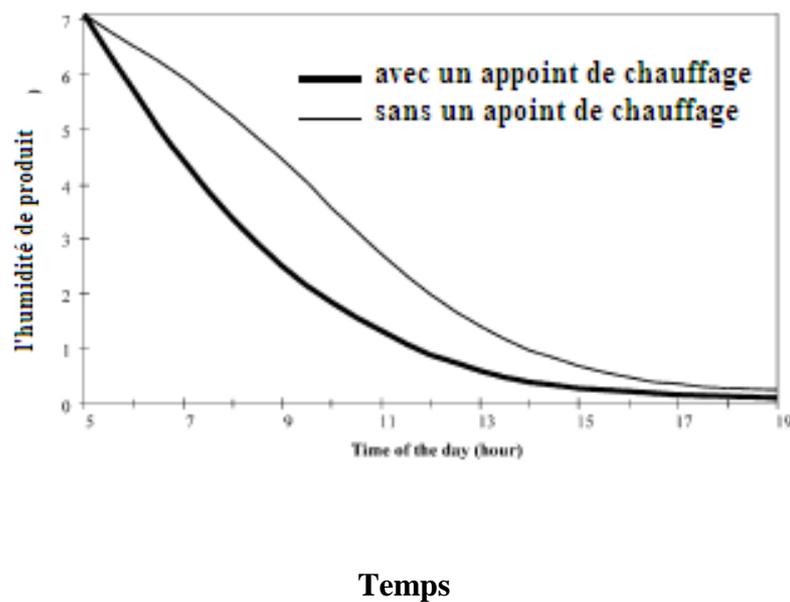


Figure I.19 : influence de l'utilisation d'un appoint de chauffage sur l'humidité de produit (Bennamoun and Belhamri 2003)

Shanmugama and Natarajanb 2006, ont développé un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée, fabriqué et exécuté dans des conditions climatiques chaudes et humides en Inde, pour étudier l'efficacité thermique et l'humidité enlevée pendant le séchage de 75 kg de pois. Ce système est couplé par un capteur solaire orienté vers le sud pour maximiser le rayonnement solaire incident. La conclusion de ces résultats montre que le séchage dans un séchoir de type intégré se continue dans les heures non ensoleillées, en plus, la qualité du produit est améliorée pour un débit d'air variant entre 0,01, 0,02 et 0,03 kg/s par rapport au produit qui sèche en continuité, ainsi que l'efficacité thermique qui atteint 63 % (figure I.20), et le taux d'extraction d'humidité qui varie de 0,55 à 0,85 kg/kWh. (Tableau I.2).

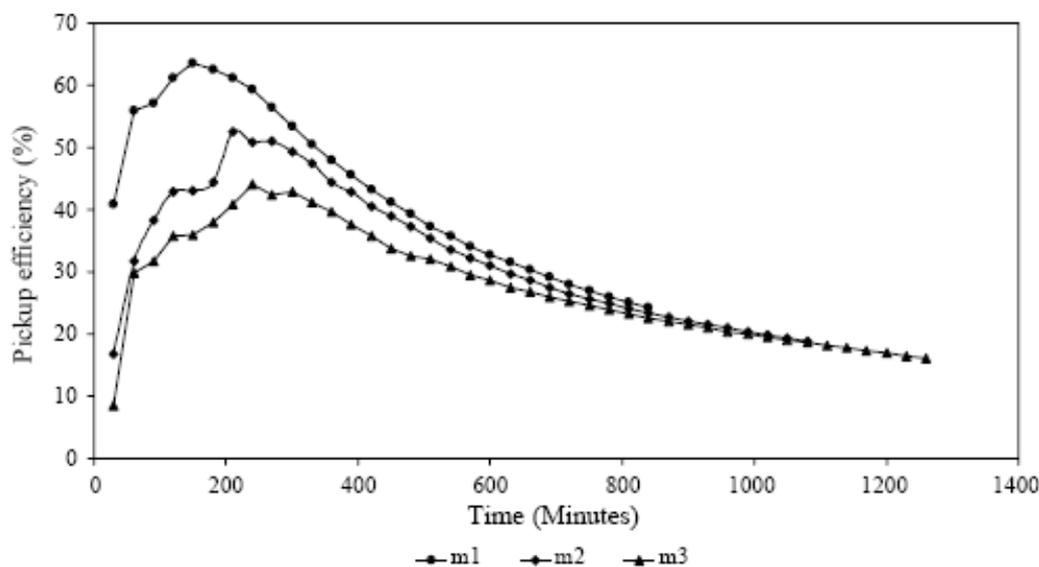


Figure I.20 : variation de l'efficacité thermique avec le temps de séchage

(Shanmugama and Natarajanb 2006)

Débit d'air (kg/ s)	Temps de séchage (h)	Spécifique taux d'extraction d'humidité (kg/kw.h)
0.03	14	0.82
0.02	18	0.65
0.01	21	0.55

Tableau I.2 : Taux d'extraction spécifique d'humidité du système pour le séchage de 20 kg de pois à différents débit d'air (Shanmugama and Natarajanb 2006)

Une autre étude expérimentale a été réalisée par Inci and Pehlivan 2004 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 dont le rayonnement solaire est 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.21 et I.22). 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.

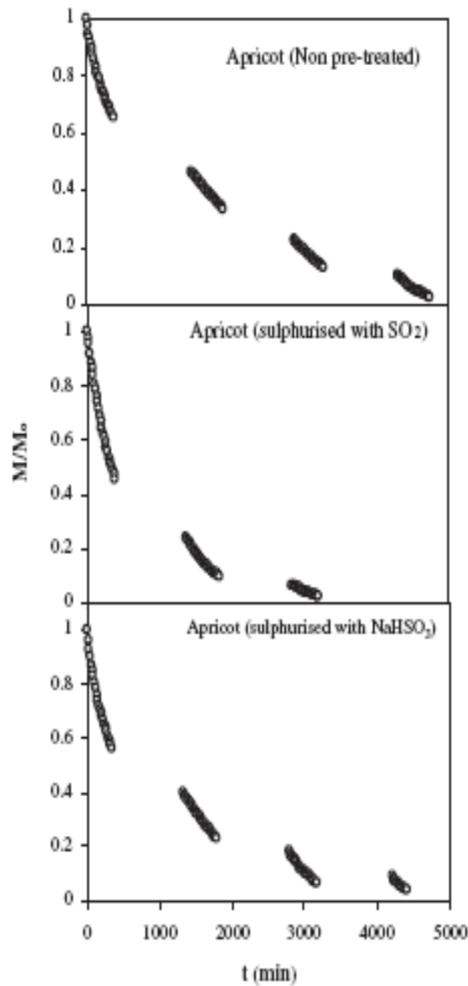


Figure I.21: courbes de séchage des abricots (Inci and Pehlivan 2004)

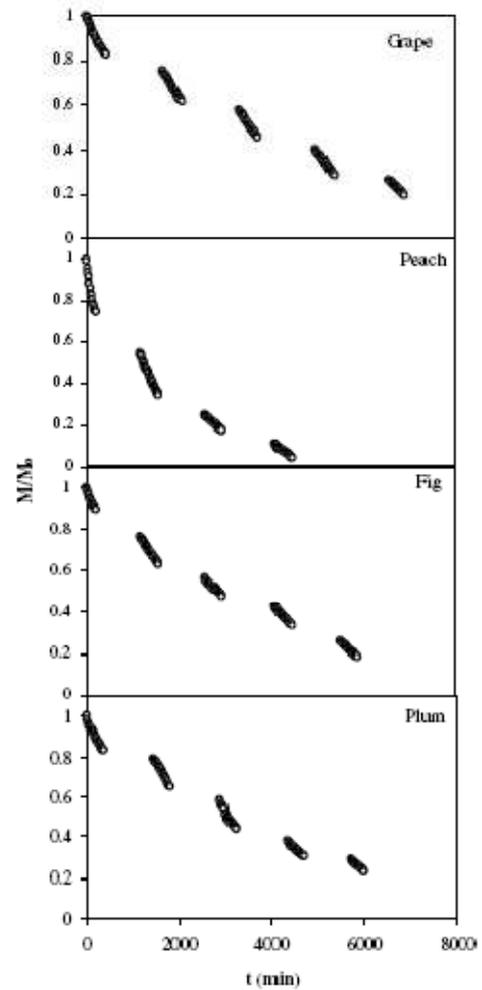


Figure I.22: courbes de séchage (raisin, pêche, figue et prune)

L'étude théorique menée par Akpinar 2006 présente une modélisation mathématique du séchage sur des couches minces de tranches de pomme de terre, de pomme et de potiron dans un séchoir cyclone. Afin d'estimer et choisir l'équation de séchage appropriée, treize modèles différents, semi théoriques et/ou empirique, ont été appliqués aux données expérimentales, puis comparés selon leurs coefficients de détermination (r : coefficient de corrélation et χ^2 : chi carrée), qui ont été prévus par analyse de régression non linéaire élaboré par un programme informatique de statistique. Ils ont déduit que le modèle de Midilli Kucukest est le meilleur modèle qui permet de décrire d'une manière satisfaisante les caractéristiques du séchage pour les tranches de pomme de terre, pommes et potiron, qui ont donnée les meilleurs résultats, et ont montré la bonne concordance avec les données expérimentales obtenues à partir des expériences comprenant le processus de séchage sur des couches minces.

Les résultats indiquent que l'augmentation de la température de l'air entre 60 à 80 °C, une gamme de vitesse de l'air de 1 à 1,5 m/s et les différents diamètres des cubes de ces produits, conduit à l'augmentation du taux de séchage et à la réduction du temps de séchage (figures I.23, I.24 et I.25)

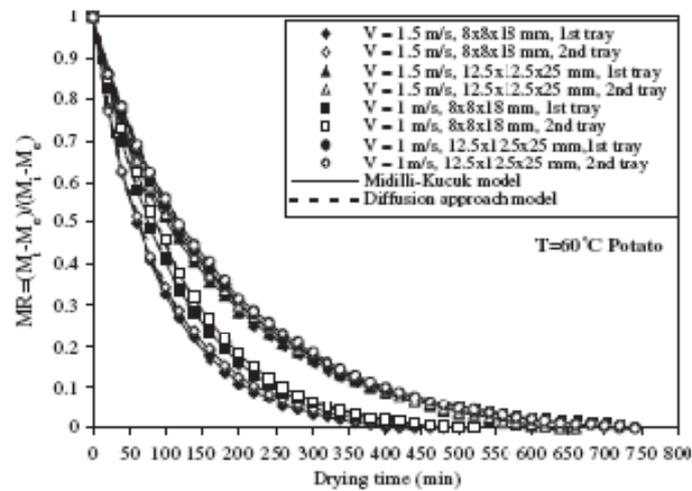


Figure I.23: Variation du taux d'humidité en fonction de temps pour les tranches de pomme de terre à 60 °C (Akpinar 2006)

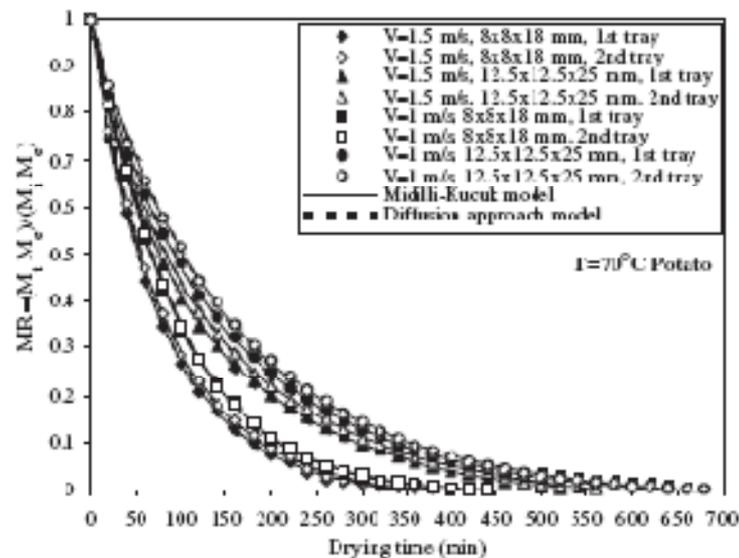


Figure I.24 : Variation de taux d'humidité en fonction de temps pour les tranches de pomme de terre à 70 °C (Akpinar 2006)

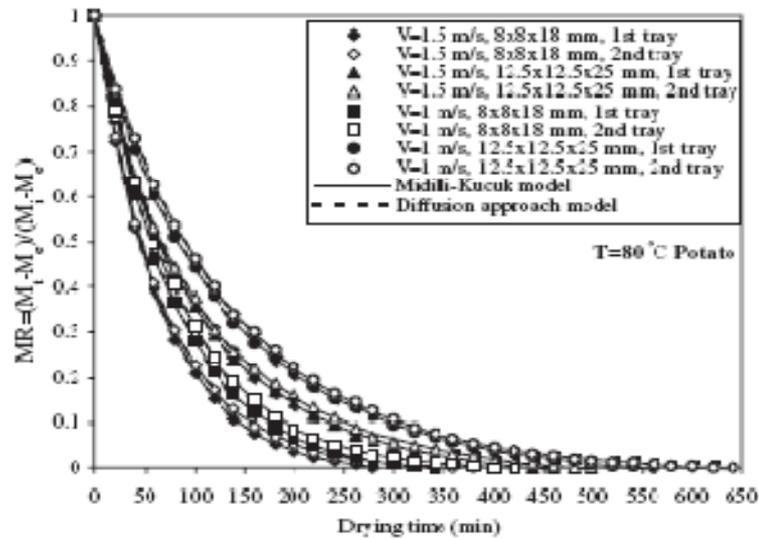


Figure I.25 : Variation de taux d'humidité en fonction de temps pour les tranches de pomme de terre à 80 °C (Akpınar 2006)

L'étude de El-Sebaï, Aboul-Enein et al. 2002 présente une série d'expériences pour le séchage des figues qui sont coupés en tranche et traités chimiquement dans un séchoir solaire indirect avant le séchage pour augmenter l'évaporation de l'humidité à l'intérieur du produit, et par conséquent le temps de séchage va diminuer. Parmi ces résultats obtenus par cette étude ; 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.26), mais la même masse des figues atteint la même valeur après seulement 12 h (figure I.27), quand les échantillons sont coupés et traités. Ils ont remarqué aussi, que la dimension du produit est le facteur principal qui influe sur le processus de séchage solaire.

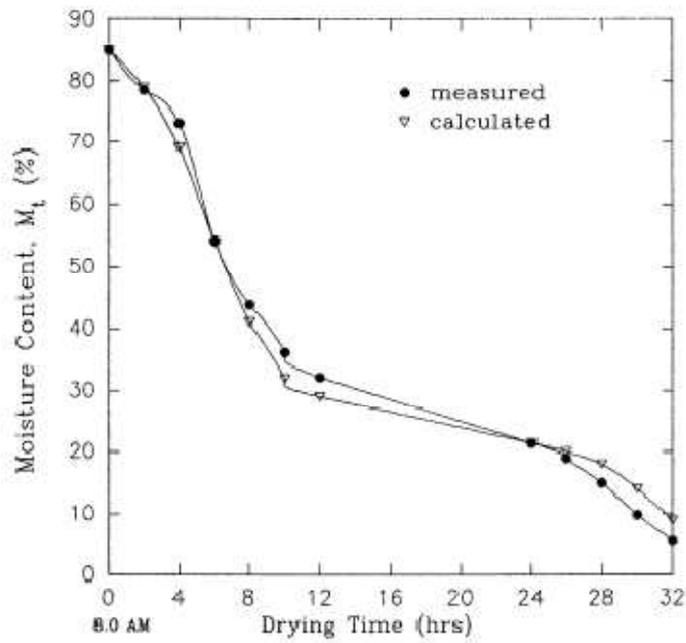


Figure I.26 : Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée (durant 32 h de séchage El-Sebail, Aboul-Enein et al. 2002.

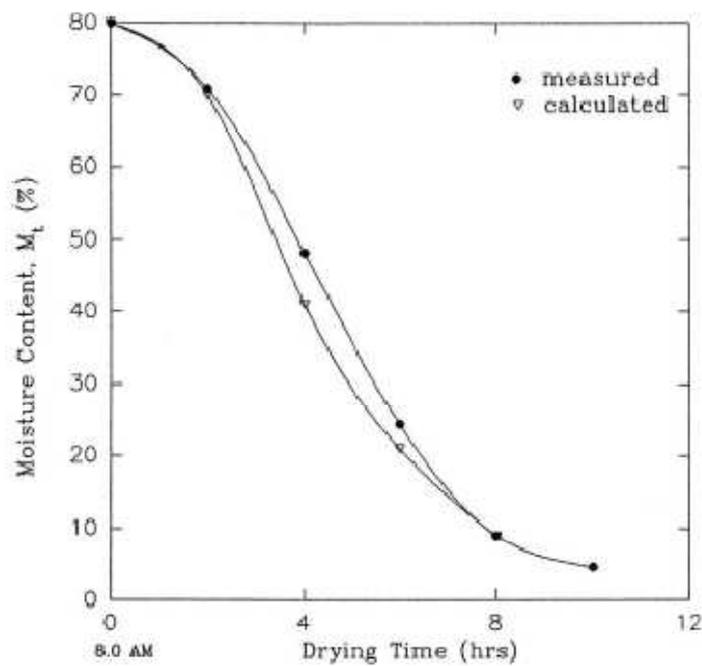


Figure I.27: Comparaison entre la teneur en eau calculée et mesurée durant 12 h de séchage El-Sebail, Aboul-Enein et al. 2002.

Singh et al. 2004 ont réalisés une étude expérimentale au sein d'un séchoir à effet de serre de simple conception et à des petites exploitations agricoles (figure I.28). Dans cette étude, ils ont conclu que ce type de séchoir ne peut engendrer que des faibles vitesses pour l'air asséchant ; la différence de niveau entre le bas et le haut du séchoir est petite. Dans ces conditions, il est à craindre la présence des températures trop élevées qui risqueraient de détériorer le produit. Le séchage ne dépassait pas les six heures les premiers jours (figure I.29) à cause de l'effet du rétrécissement du produit. Au début, ce sont les premières claies qui séchaient, puis et à cause du vide entre les produits crée par le phénomène de rétrécissement, le séchage est inversé, c'est-à-dire que les dernières claies sèchent avant les premières. Ce qui reprend le séchage au jour suivant après avoir vidé les premières claies et remplie les dernières claies.



Figure I.28 : Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle
(Singh et al. 2004)

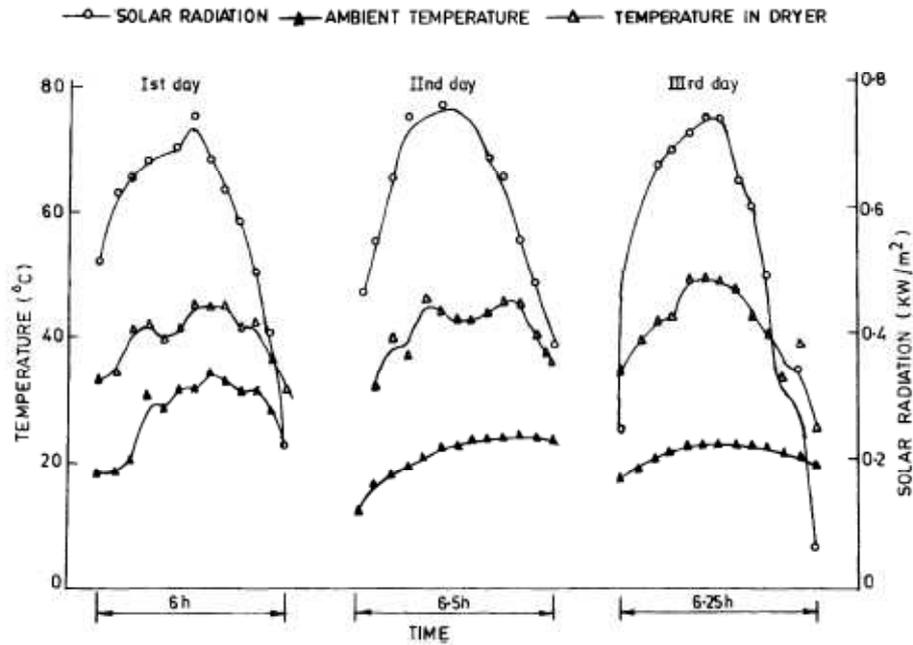


Figure I.29 : Courbes des différentes températures pendant le séchage

(Singh, Singh et al. 2004)

Une étude expérimentale a été réalisée en Turquie par Inci and Pehlivan 2003, sur le comportement de séchage des abricots, à l'aide d'un séchoir simple. Les résultats obtenus par ce séchoir concernant la température de l'air qui varient entre 50, 60, 70 et 80 °C et dont la vitesse d'écoulement de l'air varie entre 0,2, 0,5, 1,0 et 1,5 m/s avec une teneur en eau initiale de 74 % jusqu'à une teneur en eau finale qui a varié entre 16 à 18%, avec l'utilisation de quatorze modèles mathématiques différents, comparés aux coefficients de corrélation, ils indiquent que le modèle logarithmique est le meilleur modèle qui peut décrire les courbes de séchage solaire des abricots, avec un coefficient de corrélation de 0,994. Ils n'observent également que la décroissance du taux de séchage avec le temps, basée sur le changement de la vitesse et de la température de l'air. Voir figures I.30 et I.31.

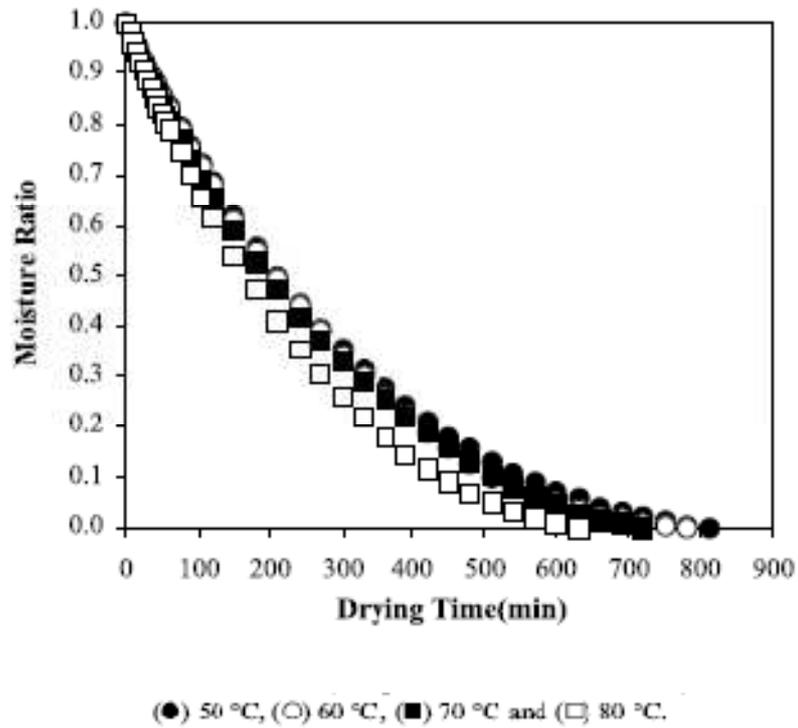


Figure I.30 : Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage
(Inci and Pehlivan 2003)

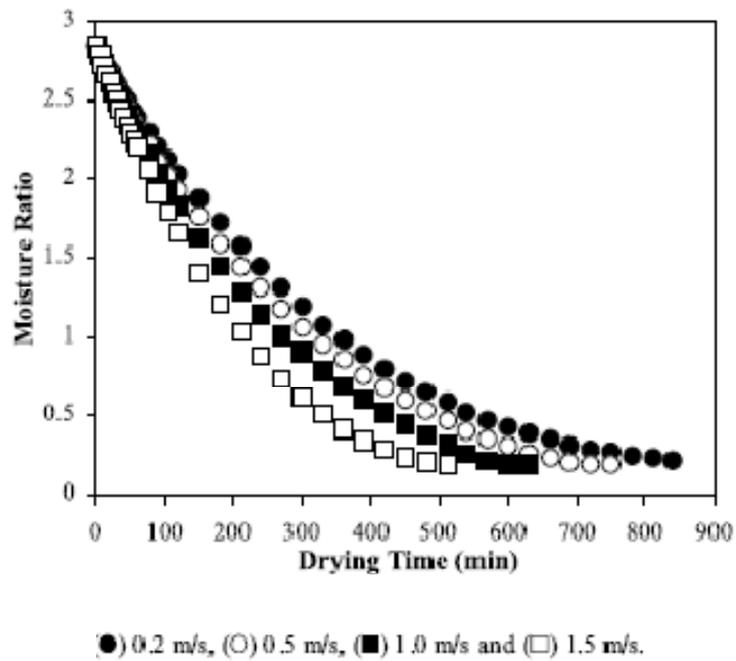


Figure I.31 : Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage
(Inci and Pehlivan 2003)

I.3. Conclusion

A partir de cette étude bibliographique concernant quelques travaux qu'on a pu rencontrer dans la littérature, on conclut que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental.

Partant des constatations et observations faites après un passage en revue à travers une bref étude bibliographique, il a été jugé utile d'entamer une étude expérimental basé sur l'influence de quelques paramètres physiques sur la cinétique de séchage (la vitesse de séchage), en ayant pour objectif d'établir des courbes caractéristiques du séchage à partir des résultats expérimentaux réalisés dans le site expérimental à proximité du Hall technologique de l'université Mohamed Khider de Biskra.

I.4. Référence

- Akpınar, E., K. (2006). "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits." Journal of Food Engineering 73: 75-84.
- Aoues, K., N. Moumimi, et al. (2009). "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.
- Benkhelfellah, R., S. El mokretar, et al. (2005). SECHOIRS SOLAIRES. ETUDE COMPARATIVE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES DANS DES MODELES DE TYPE DIRECT ET INDIRECT. 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc.
- Bennamoun, L. and A. Belhamri (2003). "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products." Journal of Food Engineering 59: 259-266.
- Boulemtafes, A. and D. Semmar (1999). "Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect." Rev. Energ. Ren.: 97-700.
- Dilip, J. (2007). "Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer." Journal of Food Engineering 78: 637-647.
- Dilip R, P., R. Sawhney, L., et al. (2002). "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer." Energy 27: 579–590.
- El-Sebaï, A., A., S. Aboul-Enein, et al. (2002). "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables." Energy 27: 845–859.
- Inci, T. and D. Pehlivan (2003). "Modelling of drying kinetics of single apricot." Journal of Food Engineering 58 (2003) 23–32 58: 23-32.
- Inci, T. and D. Pehlivan (2004). "Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process." Journal of Food Engineering 65: 413-425.
- Khalil, E. J., Al-Juamili., et al. (2007). "Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq." ScienceDirect 209: 163-170.
- Krokida, M., K., V. Karathanos, T., et al. (2003). "Drying kinetics of some vegetables." Journal of Food Engineering 59: 391-403.
- Semmar, D., S. Betrouni, et al. (1998). "Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air." Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique: 33 - 38.
- Shanmugama, V. and E. Natarajanb (2006). "Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer." Renewable Energy 31: 1239-1251.
- Singh, S., P. Singh, P., et al. (2004). "Multi-shelf portable solar dryer." Renewable Energy 29: 753-765.

Introduction

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide.

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année).

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

Comme tous les phénomènes physiques le séchage est régi par des différentes équations mathématiques, gouvernant le transfert de chaleur et de masse dans le produit tel que la variation de sa masse et sa température.....etc.

Dans ce chapitre on va présenter les paramètres essentiels qui gouvernent le phénomène de séchage, les différents théorèmes de séchage, les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide enfin une présentation des différents types de séchoir utilisés.

Caractéristiques de l'air de séchage

Humidité absolue (Arditti 1972)

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad \text{II.1}$$

Si on considère P la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$H_a = \frac{18}{29} \left[\frac{P}{P - P_v} \right] = 0,622 \left[\frac{P}{P - P_v} \right] \quad \text{II.2}$$

Humidité relative (Arditti 1972)

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.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad \text{II.3}$$

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 :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad \text{II.4}$$

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 :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad \text{II.5}$$

Températures caractéristiques de l'air humide

II.2.4.1 Température de bulbe humide (Arditti 1972)

L'évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique. Si l'opération est réalisée adiabatiquement (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur) sous l'action d'un courant de gaz non saturé en vapeur du liquide en cause, la chaleur nécessaire à l'opération ne peut provenir que du système lui-même.

Si la température initiale du liquide est supérieure à la température du gaz, la chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par le liquide dont la température s'abaisse. Mais on observe généralement que cette dernière température se stabilise à une valeur inférieure à celle

du gaz; c'est le gaz qui cède alors au liquide, en se refroidissant, une partie de chaleur sensible. Le liquide s'évapore et la vapeur formée se mélange au gaz.

A la diminution de chaleur sensible du gaz correspondant à sont humidité et un abaissement de température qui reste toujours supérieur à celle du liquide.

Nous supposons que la température (bulbe sec) et l'humidité initiales du gaz provoquant l'opération ne changent pas de façon appréciable. Après un certain temps, il s'établit un régime stationnaire, ce qui signifie que la température demeure constante en tous les points du système, car il n'y a en ces points, ni accumulation ni diminution de chaleur, la chaleur sensible cédée par le gaz ne sert alors qu'à l'évaporation du liquide. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la température du liquide en un point de sa surface libre est dite température de bulbe humide.

II.2.4.2 Température de rosée (Point de rosée) (Arditti 1972)

Dans un mélange de gaz et de vapeur, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Quand on refroidit ce mélange sous pression totale constante, la pression partielle de la vapeur demeure inchangée mais par contre, la tension maximale P_s de la vapeur diminue, tant que cette tension maximale P_s est supérieure à la pression partielle P_v de la vapeur dans le mélange, la vapeur reste sèche et l'humidité (absolue) du gaz reste constante.

Pour une certaine température T_r , la tension maximale P_s devient égale à la pression partielle P_v . La vapeur devient saturante et les premières traces de phase condensée (liquide généralement) apparaissent à cette température T_r . on donne le nom de point de rosé.

A la température T_r on a donc $H_r = 1$, un refroidissement au-dessous de T_r provoque une condensation de la vapeur (brouillard) et par la suite une diminution de l'humidité du gaz.

Caractérisation des solides humides

Humidité absolue (McCabe, Smith et al. 1956)

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

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad \text{II.6}$$

Humidité relative (McCabe, Smith et al. 1956)

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.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad \text{II.7}$$

Hygroscopicité (McCabe, Smith et al. 1956)

Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur P_m qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur P_m du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus finis. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur P_m du liquide est, ici encore, égale à la tension maximale du liquide pour la température où l'on se trouve.

Caractéristiques d'un solide poreux

Les caractéristiques du solide sont liées à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo-physiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraites et

donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté).

Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

Porosité volumique d'un produit (McCabe, Smith et al. 1956)

La porosité volumique ϵ (figure II.1) est définie par :

$$\epsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent de produit}} \tag{II.8}$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \epsilon$

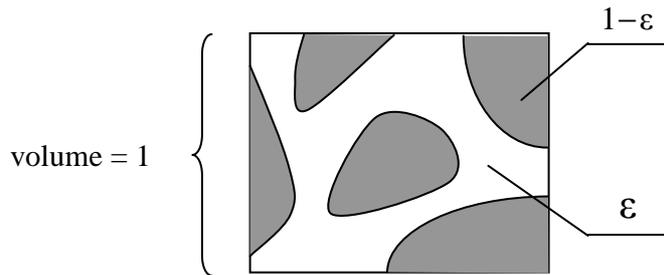


Figure II.1 : Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure II.2). La définition est équivalente.

$$\epsilon = \frac{\text{volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{volume de l'amas}} \tag{II.9}$$

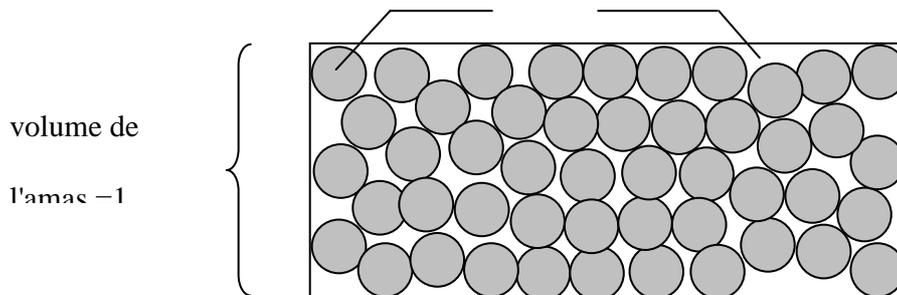


Figure II.2 : Volume de contrôle macroscopique

Compacité d'un produit (McCabe, Smith et al. 1956)

Les échanges convectifs, à toutes les échelles, demandent de quantifier la surface d'échange A contenue dans le volume V dans lequel on caractérise les transferts. Le rapport entre ces deux grandeurs constitue la compacité

$$C = \frac{S}{V} \quad \text{II.10}$$

A l'échelle du produit, la surface d'échange est la surface extérieure dite surface exposée. Pour des volumes classiques (bille de diamètre d , produit plat d'épaisseur) nous trouvons :

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Bille : } C = \frac{6}{d} \\ \bullet \text{ produit plat (2 faces) : } C = \frac{2}{e} \\ \bullet \text{ produit plat (1 face) : } C = \frac{1}{e} \end{array} \right\} \quad \text{II.11}$$

Pour le cas d'un amas de produit, la porosité ε de l'amas intervient soit :

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Amas de billes : } C = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \\ \bullet \text{ Amas de produits plats (2 faces) : } C = \frac{2(1-\varepsilon)}{e} \end{array} \right\} \quad \text{II.12}$$

Répartition de l'eau dans le matériau (McCabe, Smith et al. 1956)

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états (figure II.3) : eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau.

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

L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau (un produit constitué de "petits pores " aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores").

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

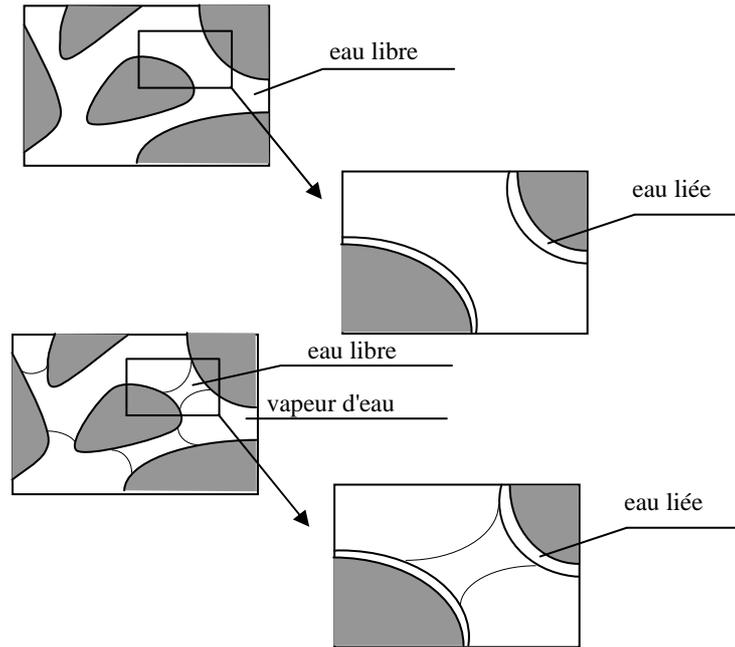


Figure II.3 : Les différents types d'eau dans le matériau

Loi de Fick

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

$$J_c = -\rho_f D_f \frac{dC_m}{dx} \quad \text{II.13}$$

Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérisée la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est k la perméabilité intrinsèque.

$$J_c = -\rho_f \frac{K_f}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad \text{II.14}$$

Séchage des produits agricoles

Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agricoles. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entrainement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.

Le séchage convectif: (Charreau and Cavaille 1991), (Bimbenet 1984)

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

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

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

Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air dont les propriétés thermo-physiques lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée.

L'enceinte où est placée le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

La vitesse avec laquelle des quantités d'eau de produit sont évaporées est appelée vitesse de séchage. Cette dernière est intimement liée au mode d'apport de l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation de l'eau. Dans le séchage par entraînement, la convection est le mode de transfert prépondérant. D'autres modes de transfert thermique peuvent cependant s'y ajouter. La conduction par les claies supportant le produit et le rayonnement par les parois du séchoir représentent les autres modes d'apport de cette chaleur latente de vaporisation.

Les théories descriptives du phénomène de séchage

- **La théorie diffusionnelle (Charreau and Cavaille 1991), (Daoued 2004)**

La théorie diffusionnelle s'applique à des produits à structure continue.

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la seconde loi de Fick qui permet d'exprimer le flux de matière au sein d'une particule en fonction du gradient d'humidité.

Rappelons que la loi de Fick traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau, autrement dit du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques en la simple différence de concentration (et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits).

Cette diffusivité ne peut être calculée que dans de rares cas. Il est pratiquement toujours nécessaire de la connaître. Quelques valeurs de la diffusivité de l'eau dans des produits alimentaires à 50°C sont données ci-dessous(en m²/s) :

— betterave à sucre 5×10^{-10} ;

— blé $7,2 \times 10^{-11}$;

— maïs (2,6 à 8,2) $\times 10^{-11}$;

— pomme $3,6 \times 10^{-9}$;

— pomme de terre $(0,9 \text{ à } 1,5) \times 10^{-10}$;

— feuilles de tabac $7,8 \times 10^{-13}$.

La diffusivité dépend de nombreux facteurs comme la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

- **La théorie capillaire (1937) (Charreau and Cavaille 1991), (Daoued 2004)**

Elle s'applique à des produits poreux ou à des produits granulaires (dans ce dernier cas, les espaces entre les particules ont un comportement analogue à celui des pores).

La théorie capillaire repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsque l'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on constate une élévation du niveau du liquide (appelée aussi ascension capillaire) dans le tube par rapport au niveau dans la cuve.

La capillarité dans les produits se réfère à l'écoulement du liquide à travers les interstices jusqu'à la surface du produit, en raison de l'attraction moléculaire entre le liquide et le solide.

Krischer de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre.

D'autres théories ont été établies et développées en se basant sur les deux précédentes, tels

- **La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938)(Bennamoun 2001)**

Le premier suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires et dans l'état de vapeur au gradient de concentration de la vapeur. Les deux derniers proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration; quant à la diffusion de la vapeur ; elle est due au gradient de pression de la vapeur.

- **La théorie de Luikov (1934)(Bennamoun 2001)**

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité (le gradient de température est l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité).

- **La théorie de Whitaker (Whitaker 1980)**

C'est la théorie la plus récente (donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux) basée sur l'équation de continuité, de la quantité de mouvement, d'énergie pour les trois phases de la matière et des lois de la thermodynamique.

Cinétique de séchage : (Touati 2001)

Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. La complexité des mécanismes mis en jeu et le caractère variable des produits (nature, forme, propriétés physiques) empêchent de trouver un modèle unique susceptible de représenter toutes les situations. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que les courbes caractéristiques de la cinétique de séchage présentent plusieurs étapes qui, individuellement et au cours d'une même opération, sont contrôlées par différents phénomènes de transfert.

Le suivi de la teneur en eau "w" du produit exprimée en fonction du temps permet d'obtenir la vitesse de séchage (dw/dt) en fonction du temps ou de la teneur en eau, et d'établir les courbes classiques de séchage. Habituellement on considère l'existence d'une succession d'étapes au cours de l'opération de séchage. Après une période de mise en régime dite période d'initialisation (période AB) on observe souvent une période de séchage à vitesse constante (période BC) puis une ou deux périodes à allure décroissante figure (II.1).

Les périodes du séchage

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de vitesse de séchage.

Sur cette courbe figure (II.4), on distingue trois régions :

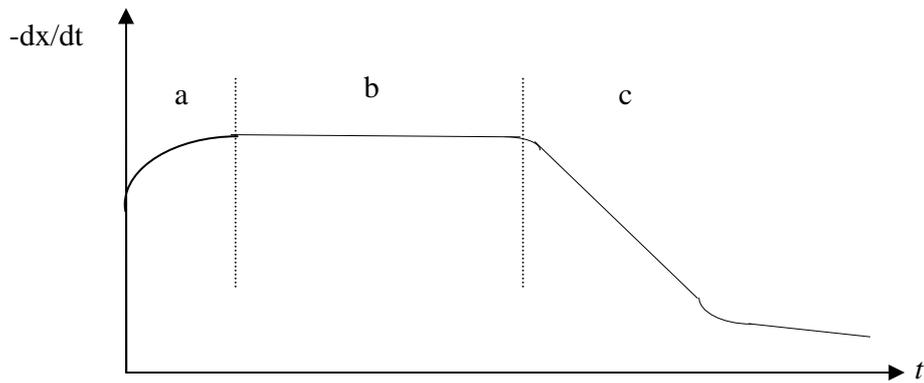


Figure II.4 : périodes du séchage

II.6.4.1 Période de mise en température (région a) (Touati 2001)

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

II.6.4.2 Période à allure constante (région b)(Touati 2001), (Nadeau and Puiggali 1995)

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

II.6.4.3 Période de ralentissement (région c)(Touati 2001)

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

- **Disparition de l'eau libre en surface de produit :**

Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit

s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

- **L'épaisseur du produit :**

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

- **La diffusivité de l'eau dans le produit :**

Elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes :**

Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- **Le croutage :**

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

Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

II.6.5.1 Influence de la température de l'air (Touati 2001)

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température.

II.6.5.2 Influence de la vitesse de l'air(Touati 2001)

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

II.6.5.3 Influence de l'humidité de l'air(Touati 2001)

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

Types de modifications de la qualité du produit a séché :

II.6.6.1 Modification biochimiques dues à la température :

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes :

- Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- Oxydations de matières grasses (rancissement)
- Destruction de vitamines
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant.
- Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols, hydrolyse des lipides,...etc.

II.6.6.2 Pertes d'arômes :

Le séchage un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule. Mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

II.6.6.3 Modifications physiques et mécaniques :

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- Migration des solutés vers la surface : outre son effet sur l'aspect du produit, cette accumulation de sucres ou d'autres solutés en surface est préjudiciable à la valeur du produit lorsqu'il est consommé réhydraté
- Fusion et migration de matières grasses.
- Modifications de forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permettent d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

II.7. Classification des séchoirs

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories (Communay 2002) :

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

Les séchoirs solaires directs

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

II.7.1.1. Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent, sert généralement de toit mais en peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

Avantage :

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

Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration (Madhlope, Jones et al. 2001).
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments (Lahsasni, Kouhila et al. 2004).
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

II.7.1.2. Type des séchoirs directs

II.7.1.2.1 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 (Pangavhane and Sawhney 2002).

Un séchoir a généralement la forme d'une boîte rectangulaire figure II.5, contenant des claies de séchage. L'air pénètre par les orifices percés dans le fond du caisson et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boîte ainsi que les parois sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit. Une porte dans le panneau arrière permet de réguler la température

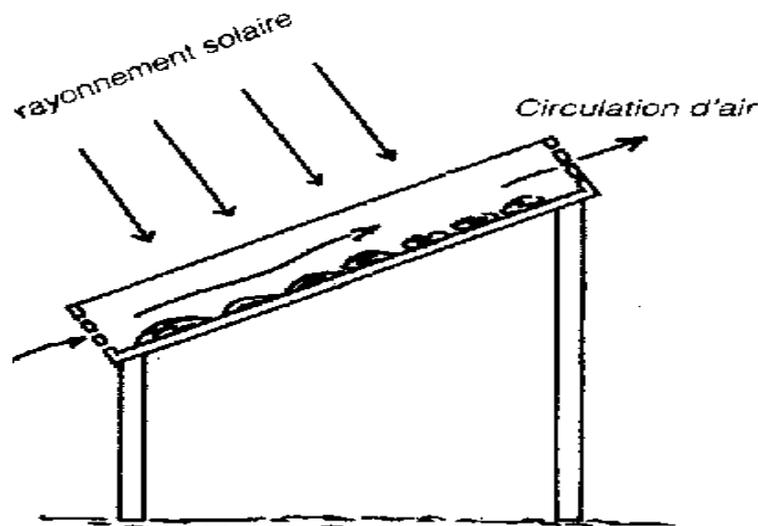


Figure II.5 : séchoir solaire coffre (Pangavhane and Sawhney 2002)

Avantages

- 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

II.7.1.2.2 Séchoir intégral à convection naturelle

Le séchoir intégral (figure II.6) est un séchoir direct, dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empiète 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 (Ekechukwn and Norton 1999).

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 (Ekechukwn and Norton 1999).

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

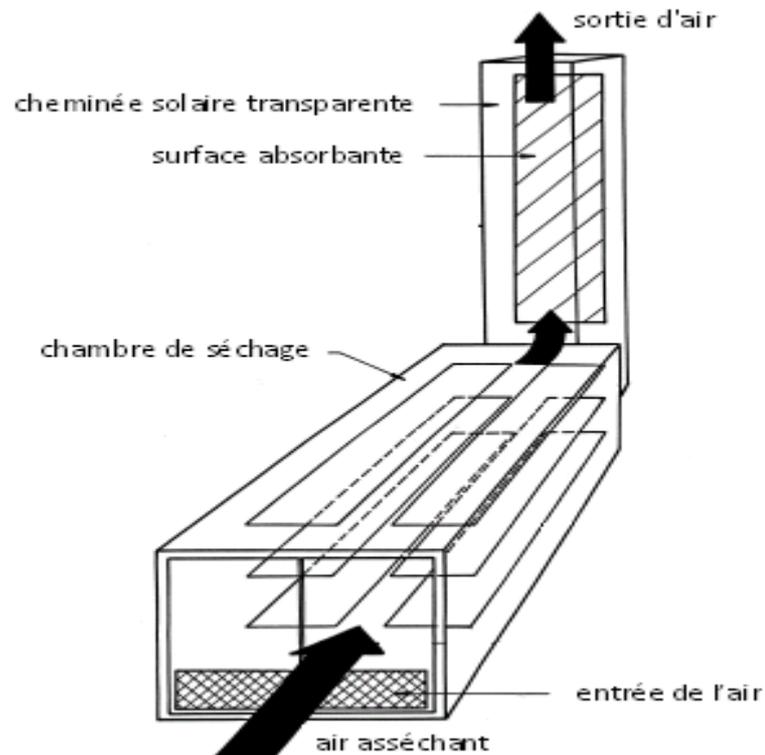


Figure II.6 : séchoir solaire intégral (Ekechukwn and Norton 1999)

II.7.1.2.3 Séchoir coquillage

Le séchoir coquillage (figure II.7) est un séchoir solaire direct à convection naturelle.

Il est composé des connes métalliques reliées par une charnière, il est conçu pour protéger les aliments de la lumière directe, des ravageurs (insectes, rongeurs...) et de la poussière.

La circulation d'air par convection naturelle est faible, ce qui contribue à la montée en température de l'air et à l'efficacité du séchoir en fin de séchage.

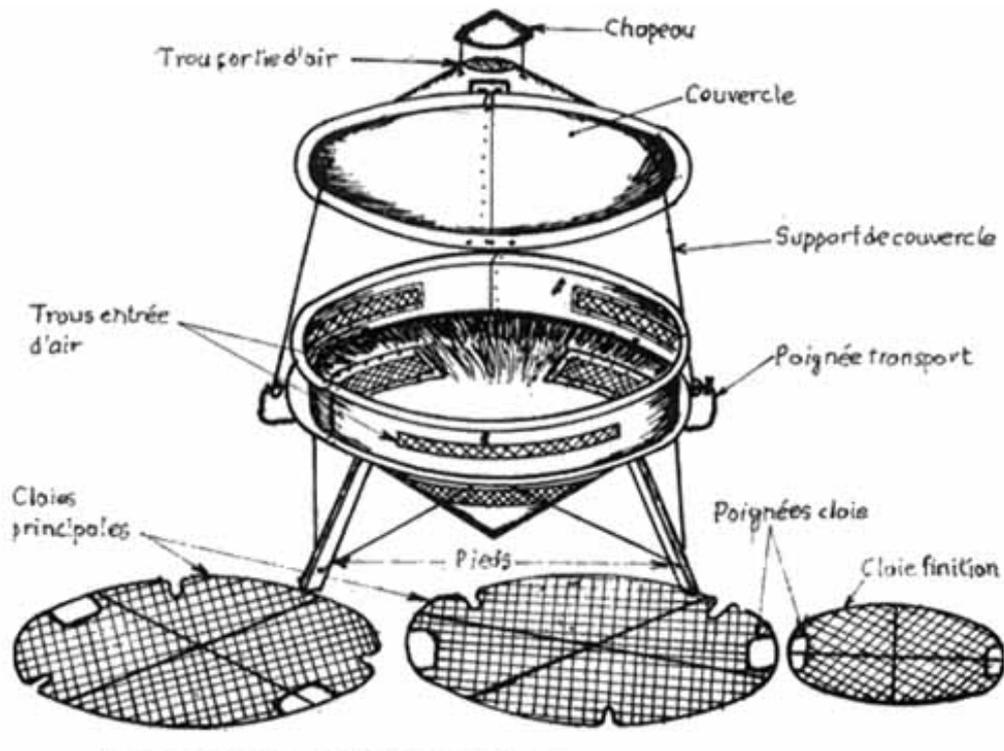


Figure II.7 : séchoir solaire coquillage à trois claies

Avantages

- Fiable et résistant et peu d'entretien.

Inconvénients

- Efficacité de séchage fortement liée à la qualité de la fabrication et au respect du plan du séchoir
- Peu de possibilité de réguler le séchage, l'efficacité dépend des conditions climatiques

II.7.1.2.4 Séchoir cabane

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7 m² (Dudez 1999) (Figure II.8). Les produits sont placés dans le séchoir tente sur des claies surélevées du sol. La toile en plastique permet de capter l'énergie solaire.

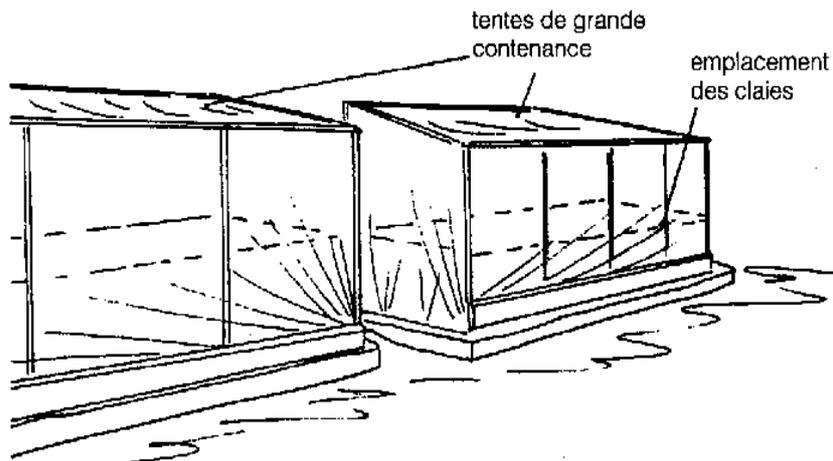


Figure II.8 : séchoir solaire cabane (Dudez 1999)

Avantages

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

Inconvénients

- Coût 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.

Séchoirs solaires indirects

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive (Dudez 1999). Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

II.7.2.1 Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure II.9). L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud

monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques (Dudez 1999).

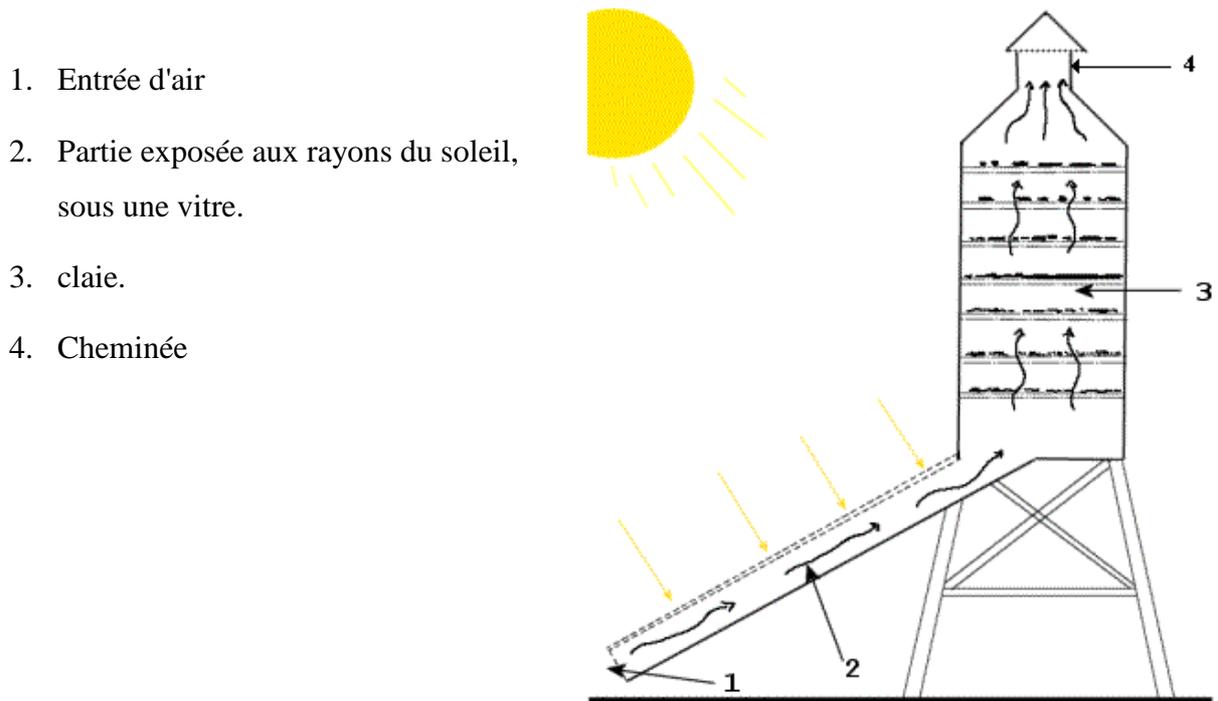


Figure II.9 : Séchoir solaire indirect (Dudez 1999)

Avantages

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit (Bala, Mondol et al. 2003).
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles (Simatc 2003).

Inconvénient

- 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.7.2.2 Type du séchoir indirect (le séchoir armoire)

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

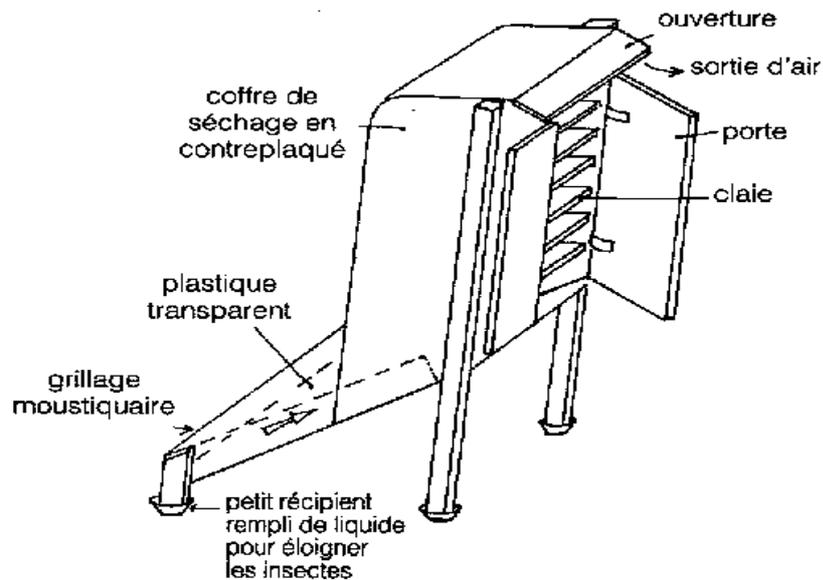


Figure II.10 : séchoir solaire armoire (Dudez 1999)

Avantages

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

Inconvénient

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

Séchoirs 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 (Dudez 1999) :

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur 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 la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

Avantages

- 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.

Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

II.7.3.1. Types des séchoirs hybrides

II.7.3.1.1 Séchoir hybride à convection forcée

Ce type de séchoir est constitué d'un toit (Figure II.11) 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 où le produit à sécher se trouve sur les rangées de claies superposées.

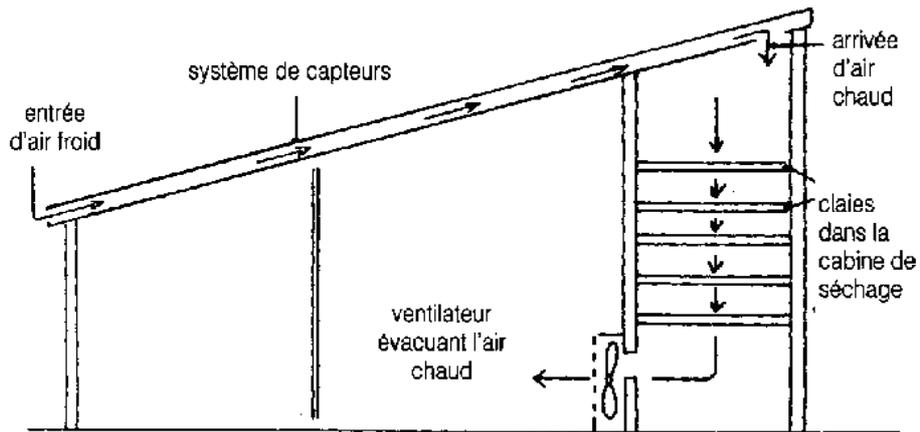


Figure II.11 : séchoir solaire hybride à convection forcée (Dudez 1999)

Avantages

- Séchoir très performant.
- Facilement aménageable dans un bâtiment

Inconvénient

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

II.7.3.1.2 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 brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc être sécher quelles que soient les conditions climatiques.

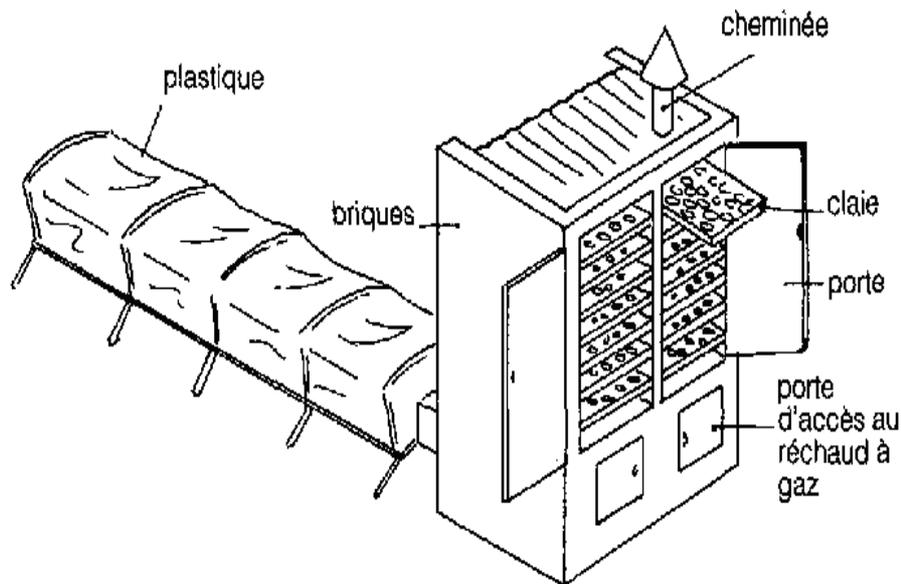


Figure II.12 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz (Dudez 1999)

Avantages

- Séchage rapide et d'excellente qualité
- Contrôle de la température
- Très grande productivité

Inconvénient

- Coût très élevé de l'investissement
- Nécessite d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits

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 II.13) 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 empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral (Ekechukwn and Norton 1999).

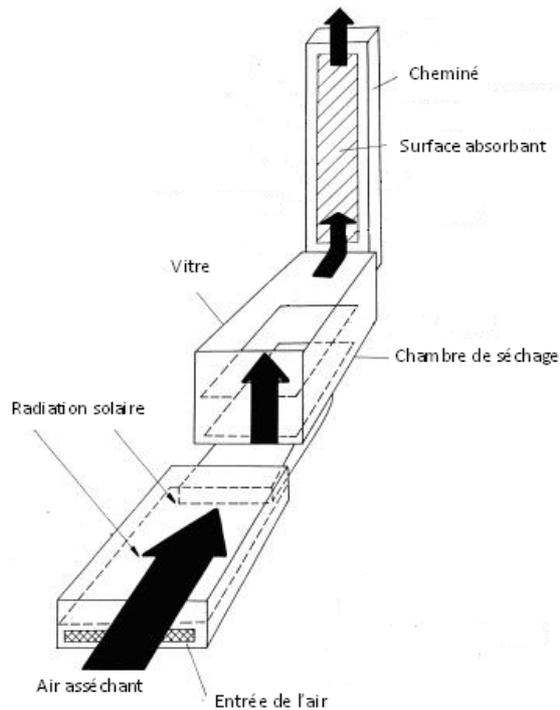


Figure II.13 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1

(Ekechukwn and Norton 1999)

Une autre conception (figure II.14) 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-plaqués, 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 (Ekechukwn and Norton 1999).

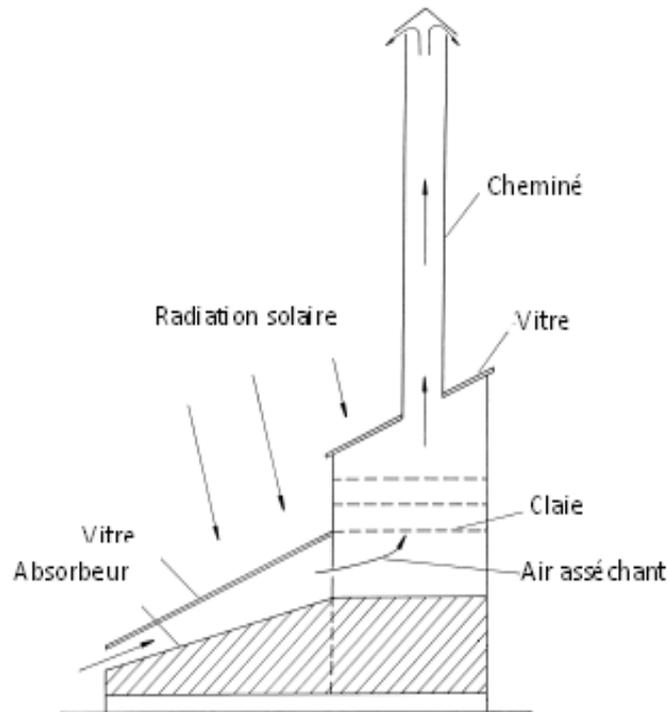


Figure II.14 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-

(Ekechukwn and Norton 1999)

II.8 Conclusion

A travers le second chapitre on a pu citer les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide ceci est dans le but de trouver leurs humidités relatives, la température et la variation de la cinétique de séchage pour le produit à sécher. Ainsi que l'influence de séchage sur les produits agro-alimentaires suivant les modifications biochimiques dues à la température et les modifications physiques et mécaniques.

Pour comprendre le principe de fonctionnement de ces dispositifs, une partie est réservée aux différents types de séchoirs existants, aux avantages et aux inconvénients ainsi que leur classification suivant le principe de fonctionnement.

II.9 Référence

Arditti, G. T. c. i., tome III. Paris, France.

Bala, B., K., M. Mondol, R.A., et al. (2003). "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier." *Renewable Energy*28: 90-183.

Bennamoun, L. (2001). Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local. Faculté des Sciences, Département de physique, Thèse de magister Université de Mentouri Constantine.

Bimbenet, J., J. (1984). Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.

Charreau, A. and R. Cavaille (1991). "Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés,." **2480-1; 2480-23.**

Communay, P. H. H., le gisement solaire, méthode et calculs", Groupe de Recherche et D'édition, France.

Daoued, M. (2004). Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application.

Dudez, P. (1999). "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés."

Ekechukwn, O., V. and B. Norton (1999). "Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology"." *Energy Conversion and Management*40: 615 - 655.

Lahsasni, S., M. Kouhila, et al. (2004). ""Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel "." *Energy*29: 211 - 244.

Madhlope, A., S. Jones, A. , et al. (2001). " "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration "." *Renewable Energy*27: 27-37.

McCabe, L., C. Smith, et al. (1956). Unit operation of chemical engineering.

Nadeau, J. and R. Puiggali (1995) .(Séchage des processus physiques aux procédés industriels",
Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France.

Pangavhanc, D., R., R. Sawhcy, L., et al. (2002). "Design, development and performance testing
of new natural convection." *Energy* 27: 579-590.

Pangavhane, D., R. and R. Sawhney, L. (2002). " "Review of research and development work
on solar dryers for grape drying "." *Energy Conversion and Management*43: 45 - 61.

Simatc, I., N. (2003). "Optimization of mixed mode and indirect modenatural convection solar
dryers." *Renewable Energy*28: 435 - 453.

Touati, B. (2001). Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du
séchage des feuilles de menthe, Thèse de Magistère Centre Universitaire, Bechar,
Algerie.

Whitaker, S. (1980). Heat and mass transfert in granular parous media *Advances in drying I*,
Hemisphere publication, pp 23-61.

III.1 Description du séchoir solaire

Le séchoir solaire utilisé se divise en deux parties, un capteur solaire plan à air et une chambre de séchage. Les deux parties sont assemblées de façon que la sortie du capteur soit branchée directement avec l'entrée de la chambre pour assurée que l'air chaud sortant du capteur entre dans la chambre de séchage.



Figure III.1 : séchoir solaire utilisé

III.1.1 Capteur solaire expérimental utilisé

Le capteur solaire plan à air utilisé dans l'étude expérimentale est d'une longueur de 1,95 m et une largeur de 0,89 m, il est recouvert 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. La partie inférieure est isolée thermiquement avec une plaque de bois et en polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de 34.8° par rapport au plan horizontal et orienté vers sud.



Figure III.2 : capteur solaire utilisé

III.1.2 Chambre de séchage :

La chambre de séchage est une boîte fabriquée en acier galvanisé de forme parallélépipédique, d'une hauteur de 1,05 m, d'une largeur de 0,51 m et d'une longueur égale à 0,53m.

Les parois latérales, les parties inférieures et supérieures sont isolées thermiquement avec de la laine de verre, la porte est isolée par une plaque de polystyrène.

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la chambre sur une claie mobile d'une forme circulaire.

Deux petites aspirateurs sont placées a la sortie de la chambre pour assurer le dégagement de l'air humide.



Figure III.3 : chambre de séchage

III.2 Protocole expérimental

Notre travail consiste à déterminer la variation de la masse des produits (piment vert et pomme de terre) durant le séchage, afin de suivre l'évolution des courbes de la variation de l'humidité relative des produits à sécher et la cinétique de séchage, on a utilisé une balance électronique de précision de 0,1g. D'autre part, pour mesurer la température de l'air asséchant à

l'entrée et la sortie du capteur solaire, également dans l'enceinte de séchages on a utilisé des thermocouples reliés à un enregistreur à douze voies.

III.2.1 Forme de découpage des produits

Pour cette condition on va varier la façon de découpage du produit, mais en gardant la même masse initiale, pour cela on a considéré trois formes de découpage :

- Pour le piment vert :
 - En forme de petites rondelles (figure III.4.A).
 - En forme de grandes rondelles (figure III.4.B).
 - En forme de feuilles (figure III.4.C).
- Pour la pomme de terre :
 - Des rondels avec une épaisseur mince (figure III.4.D).
 - Des rondels avec une grande épaisseur (figure III.4.E).
 - Des parallélépipèdes rectangles (figure III.4.F).

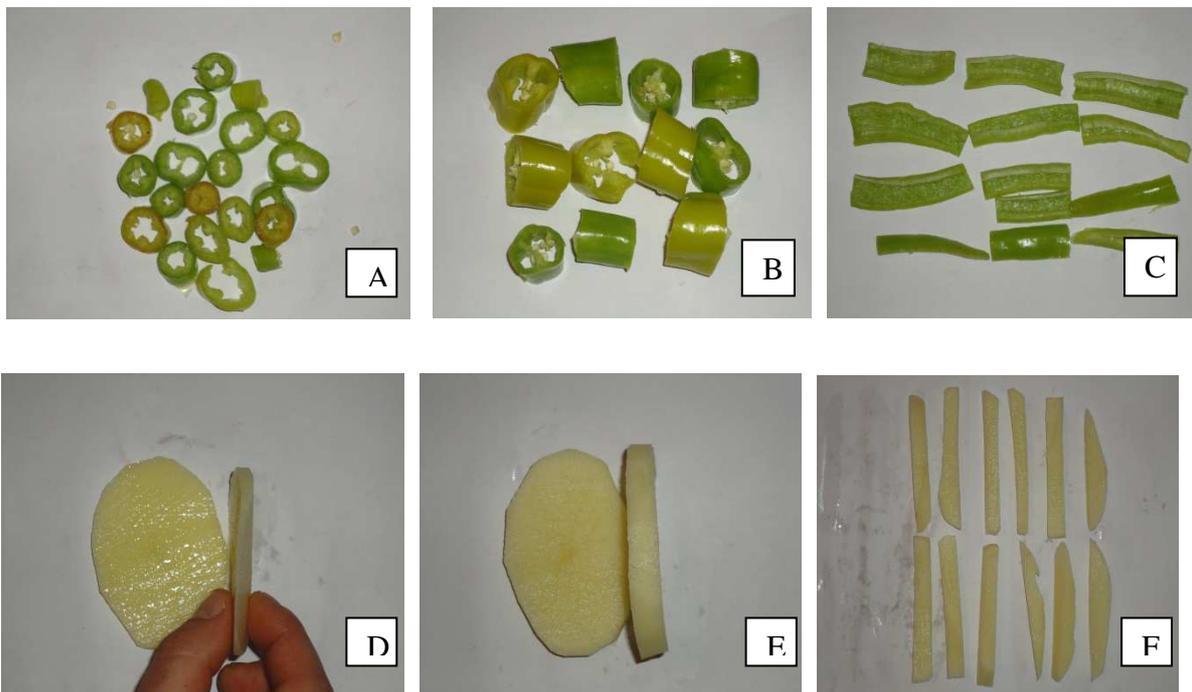


Figure III.4 : formes de découpage du piment vert (A, B, C) et de la pomme de terre (D,F,E)

On introduit dans la chambre de séchage au début des expérimentations différentes masses initiales qui sont respectivement de 50, 100 et 150 g.

III.2.2 la disposition du produit

D'autre part, pour étudier l'effet de disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage, on a considéré trois configurations, qui sont respectivement égales à 10, 20 et 30 cm par rapport à l'entrée de la chambre de séchage, le réglage de la position est assuré par l'utilisation d'une claie mobile.

Comme valeurs de débit volumique horaire d'air asséchants, on a ajusté le potentiomètre de telle sorte à ce que les débits soient égaux à 50, 80 et 100 m³/h.



Figure III.5 : différentes dispositions du produit

III.3 Etude expérimentale de l'effet de la forme, de la masse, de la disposition du produit et le débit d'air sur le séchage

III.3.1 Effet de formes du produit sur les performances du séchage

En considérant la même masse initiale de 100 g, le piment et la pomme de terre on est découpés suivant trois formes différentes figure (III.4).

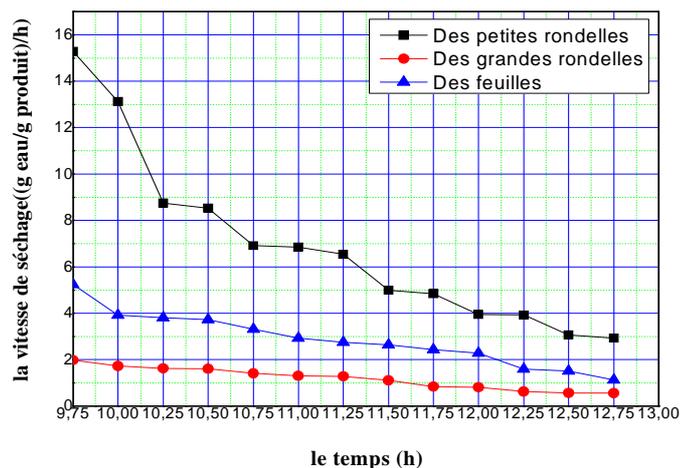


Figure III.6 : évolution de la vitesse de séchage pour les trois formes de découpage

Pour le piment vert

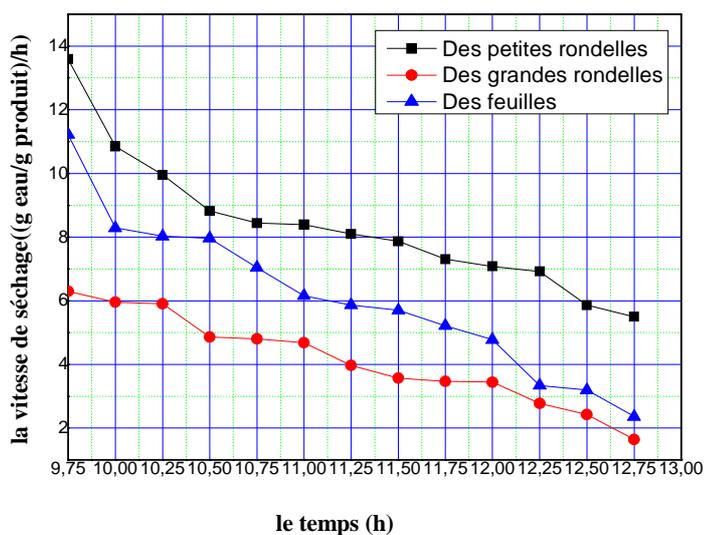


Figure III.7 : Evolution de la vitesse de séchage pour les trois formes

de découpage pour la pomme de terre

Les figures (III.6) et (III.7) montrent la variation de la vitesse de séchage pour les trois formes du produit. La vitesse la plus élevée est donnée par les petites rondelles qui correspondent à 15,28 (g eau/g piment/h) et 13,59 (g eau/g pomme de terre/h), suivies ensuite par celle des

feuilles de 5,23 (g eau/ g piment/h) et 11,22 (g eau/ g pomme de terre/h). La plus faible est celle des grandes rondelles de l'ordre de 1,98 (g eau/g piment /h) et 6,30 (g eau/ g pomme de terre/h).

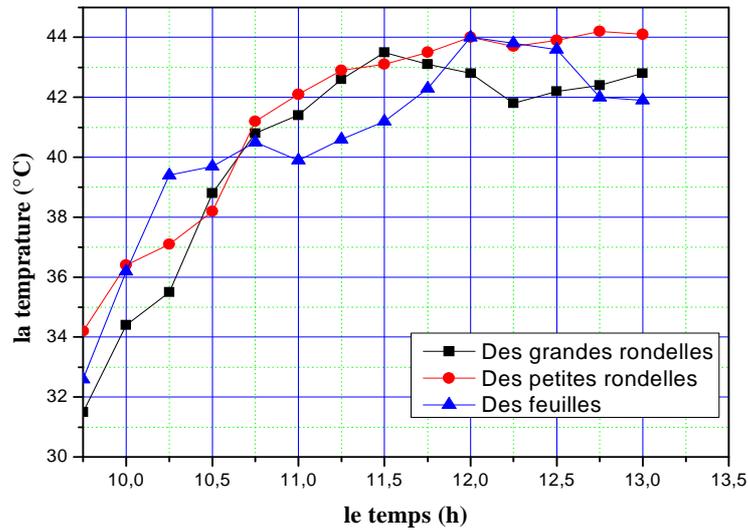


Figure III.8 : Evolution de la température du produit pour les trois formes de découpage pour le piment vert

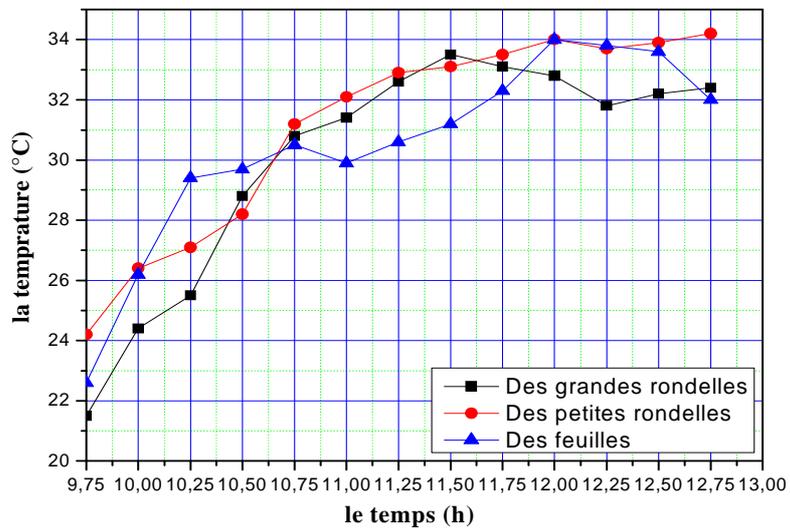


Figure III.9 : Evolution de la température du produit pour les trois formes pour la pomme de terre

d'après les figures (III.8) et (III.9) On remarque aussi que la valeur maximale de la température du produit est atteinte par les petites rondelles au environs de 44,2 °C pour le piment vert et de 34,6 °C pour la pomme de terre, alors que celle en forme de feuilles est de 44 °C pour le piment et 32,9 °C pour la pomme de terre, tandis que pour les grandes rondelles elle est de 43,5 °C pour le piment et 32,6 °C pour la pomme de terre.

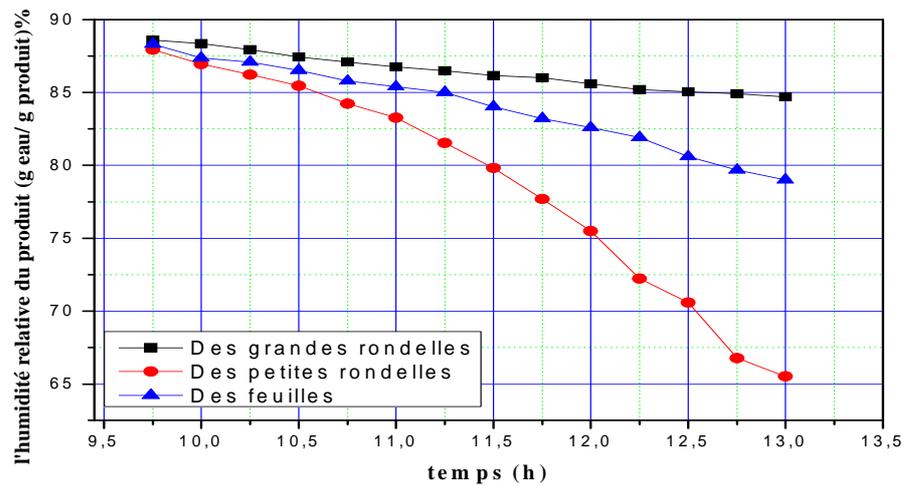


Figure III.10 : Evolution de l'humidité relative en fonction de la forme de découpage pour le piment vert

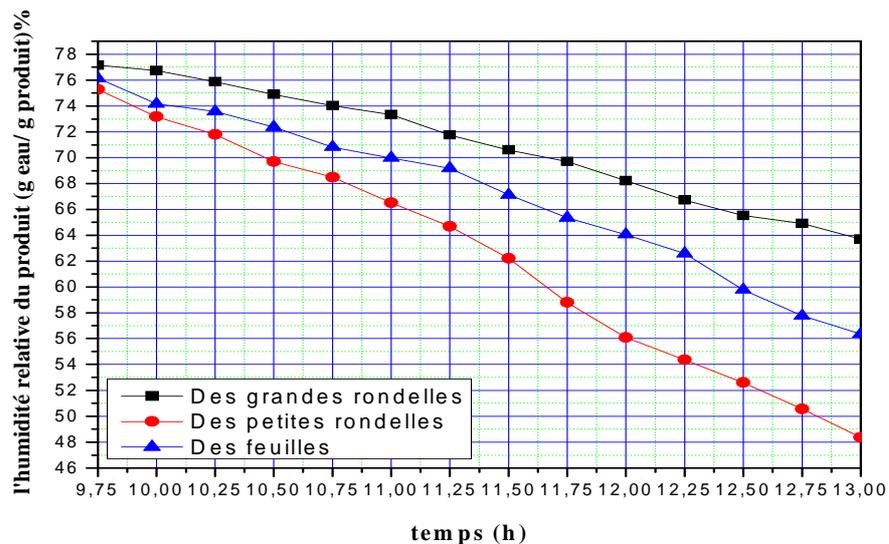


Figure III.11 : Evolution de l'humidité relative en fonction de la forme de découpage pour la pomme de terre

Les figures (III.10) et (III.11) montrent que l'humidité relative finale pour la même durée de séchage de 03H : 15mn est de 65,52 (%) pour le piment vert et 48,2 (%) pour la pomme de terre relativement aux petites rondels, alors qu'en présence des grandes rondelles, elle est de 84,70 (%) pour le piment vert et 63,9 (%) pour la pomme de terre, d'autre part, l'humidité relative obtenue en forme de feuille est de 79,01 (%) pour le piment vert et 56,3 (%) pour la pomme de terre.

L'analyse des résultats obtenus montre que le paramètre de la forme du produit influe sur la variation de l'humidité relative, en effet l'épaisseur mince permet d'absorber une quantité de chaleur importante au cours d'une durée réduite, qui se manifeste par conséquent par une élévation de la température de la matière à sécher, qui provoque une augmentation de la vitesse de séchage par diffusion à l'intérieur du produit et par la suite l'eau sera facilement évaporé.

III.3.2 Effet de masse du produit sur le séchage :

Pour étudier l'influence de la masse de la matière à sécher sur le phénomène de séchage, on a maintenu certains paramètres externes constants ; particulièrement pour la même valeur d'un débit d'air asséchant, une température d'entrée et une disposition identiques et pour une forme de découpage similaire. Le séchage du piment vert et de la pomme de terre est effectué, en introduisant trois masses différentes du produit respectivement égales à 50 ,100 et 150 g dans l'enceinte de séchage. Les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis de traduire les valeurs enregistrés sous formes de graphiques tels qu'illustrés par les figures (III.12) et (III.13) qui montrent la variation de la vitesse de séchage pour les trois valeurs de la masse étudiée.

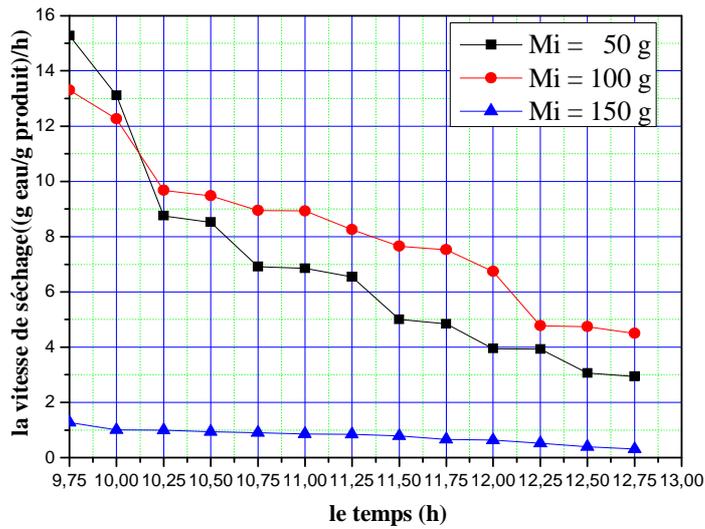


Figure III.12 : Variation de la vitesse de séchage pour trois valeurs de masse du piment vert

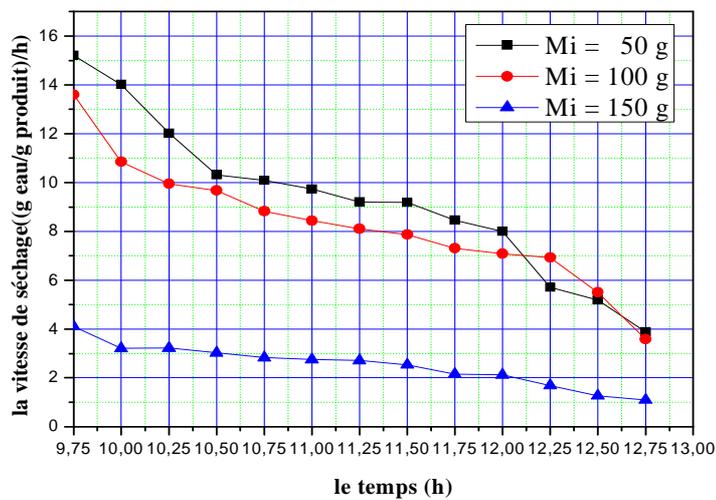


Figure III.13 : Variation de la vitesse de séchage pour trois valeurs de masse de pomme de terre)

A partir des allures tels que représentés par les figurent ci-dessus, on constate que les vitesses initiales du séchage sont différentes, qui sont respectivement :

- 15,28 (g eau/ g piment/h), et 15,2 (g eau/ g pomme de terre/h) pour la masse de 50 g.
- 13,30 (g eau/ g piment/h) et 13,59 (g eau/ g pomme de terre/h) pour la masse de 100 g.
- 1,28 (g eau/ g piment/h), 4,11 (g eau/ g pomme de terre/h) pour la masse de 150 g.

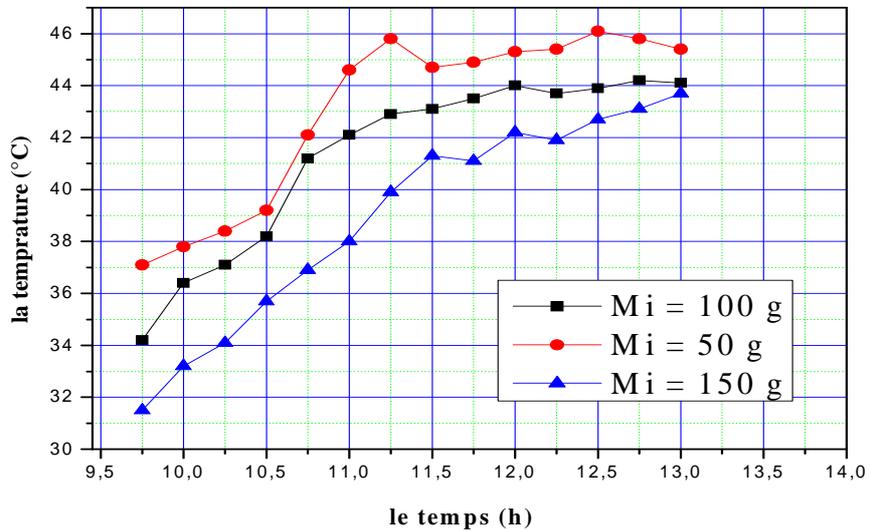


Figure III.14 : Evolution de la température pour trois valeurs de la masse du piment vert

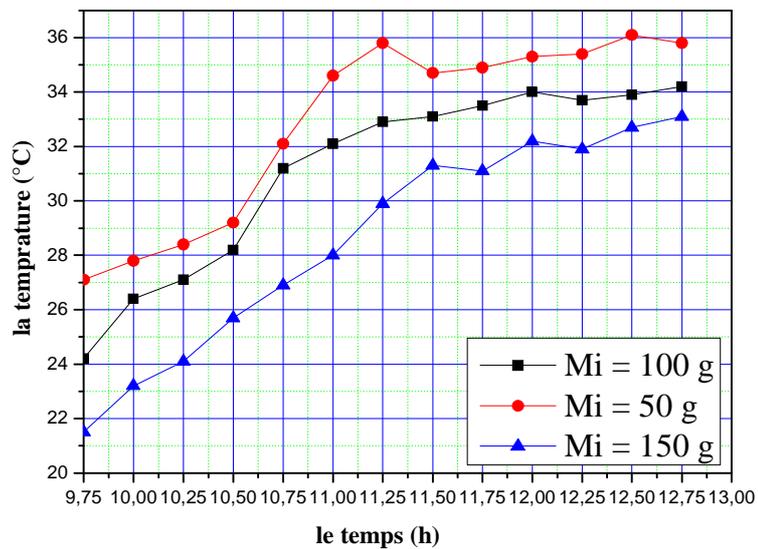


Figure III.15 : Evolution de la température pour trois valeurs de la masse de la pomme de terre

Les figures (III.14) et (III.15) qui décrit la variation de la température de au cours du séchage montrent qu'elle atteint sa valeur maximale pour la masse de 50 g au environ de 46,1°C pour le piment vert alors qu'elle est de 36,3°C pour la pomme de terre.

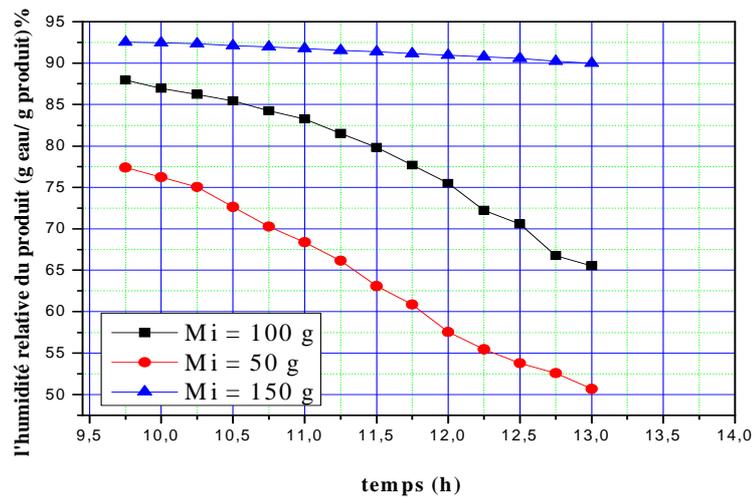


Figure III.16 : Evolution de l'humidité relative pour trois valeurs de la masse du piment vert.

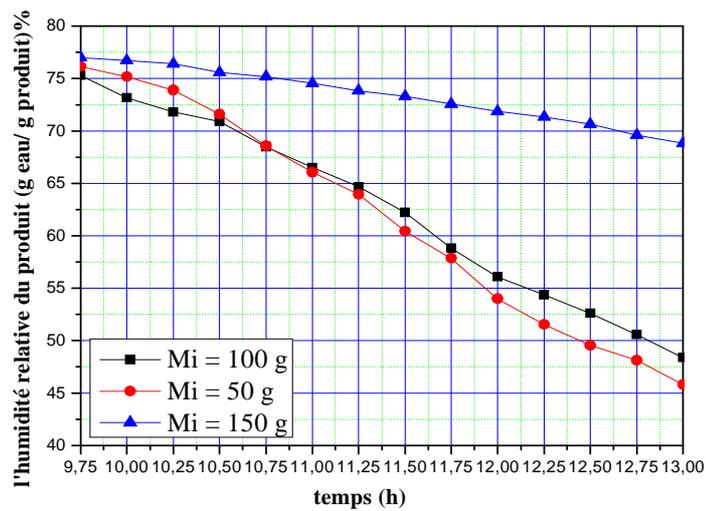


Figure III.17 : Evolution de l'humidité relative pour trois valeurs de la masse de la pomme de terre

A travers les figures (III.16) et (III.17), on constate que l'humidité relative finale pour la même durée de séchage égale à 03 H : 15mn est de 50,67 (%) pour le piment vert et 45,81(%) pour la pomme de terre, correspondant à une masse du produit de 50 g, pour la masse de 100 g du produit à sécher, l'humidité relative est de 65,52 (%) en présence du piment vert et 48,36 (%) pour la pomme de terre, alors qu'elle est de 89,98 (%) pour le piment et 68,81 (%) pour la pomme de terre et relativement à une masse de 150 g, correspondant à une évaporation d'eau respectivement de l'ordre de 27,7g pour le piment et 29,8 g pour la pomme de terre, relativement à une mase du produit de 50 g, par contre la perte en eau correspondant à une masse de 100 g du produit est de 68,1 g pour le piment vert et 57,4 g pour la pomme de terre, finalement pour la masse à sécher de 150 g, l'évaporation en eau est de 40,2 g pour le piment vert et 44 2 g pour la pomme de terre.

D'après ces constatations, on déduit que la masse initiale du produit influe sur la vitesse de séchage, en effet, lorsque la masse du produit augmente la quantité d'eau évaporé augmente aussi, ce qui demande par conséquent une quantité d'énergie importante, ce qui explique que la température dans le cas d'une masse du produit à sécher de 50g est plus élevée comparativement aux autres valeurs de la masse initiale du produit, par conséquent, on déduit que l'augmentation de la masse se répercute sur les performances du séchage par une faible évaporation d'eau contenue dans le produit à sécher.

III.3.3 Effet de la disposition du produit dans l'enceinte du séchage

Concernant l'influence de la disposition sur le déroulement du séchage, on va considérer trois positions différentes du produit respectivement égales à 10, 20 et 30 cm, tout en gardant constant les autres paramètres, tel que le débit d'air asséchant et la forme de découpage de la matière à traiter.

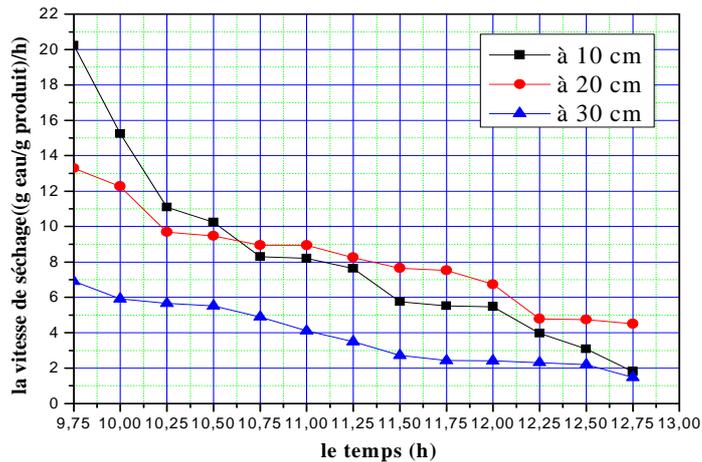


Figure III.18 : Variation de la vitesse de séchage pour trois dispositions différentes du piment vert

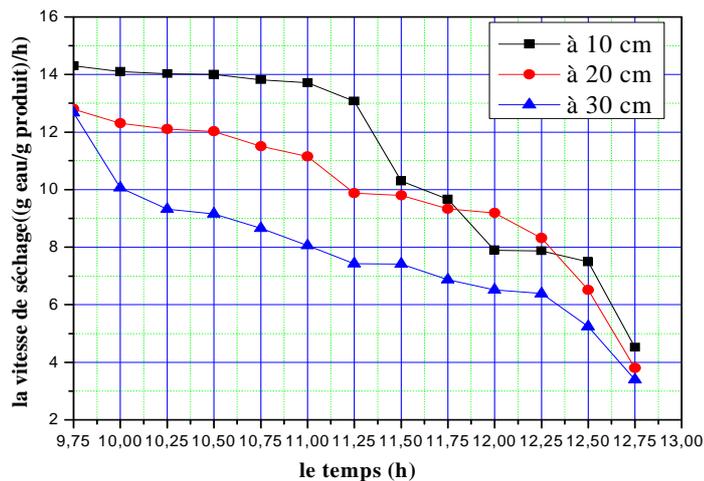


Figure III.19 : Variation de la vitesse de séchage pour trois dispositions différentes de la pomme de terre

Les figures (III.18) et (III.19) montrent la variation de la vitesse de séchage pour trois positions différentes de la claie qui supporte la matière à sécher, l'analyse des courbes de la variation de la vitesse de séchage montre qu'il existe trois vitesses initiales suivantes :

- La vitesse de séchage pour 10 cm est de 20,23 (g eau/ g piment/h) et 14,30 (g eau/ g pomme de terre/h).
- La vitesse de séchage pour 20 cm est de 13,30 (g eau/ g piment /h) et 12,80 (g eau/ g pomme de terre/h).
- La vitesse de séchage pour 30 cm est de 6,90 (g eau/ g piment/h) et 12,67 (g eau/ g pomme de terre/h).

Par conséquent, c'est pour les dispositions faibles par rapport à l'entrée de la chambre qu'on peut atteindre des vitesses maximales de séchage, tel que observée dans notre cas, ou la vitesse maximale atteinte est obtenu pour une disposition de 10 cm dès l'entrée de l'air asséchant dans l'enceinte de séchage.

Les figures (III.20) et (III.21) expriment la variation de la température du produit durant de séchage dans trois dispositions différentes, où on remarque que la température maximale atteinte correspond à une disposition de 10 cm, qui de l'ordre de 46,30°C pour le piment vert, alors qu'elle est 36,4 °C pour la pomme de terre. Par contre, lorsque le produit est disposé à 30 cm depuis l'entrée de l'air asséchant dans la chambre, sa température est faible qui est au voisinage de 37,60°C pour le piment vert et de 26,9°C pour la pomme de terre.

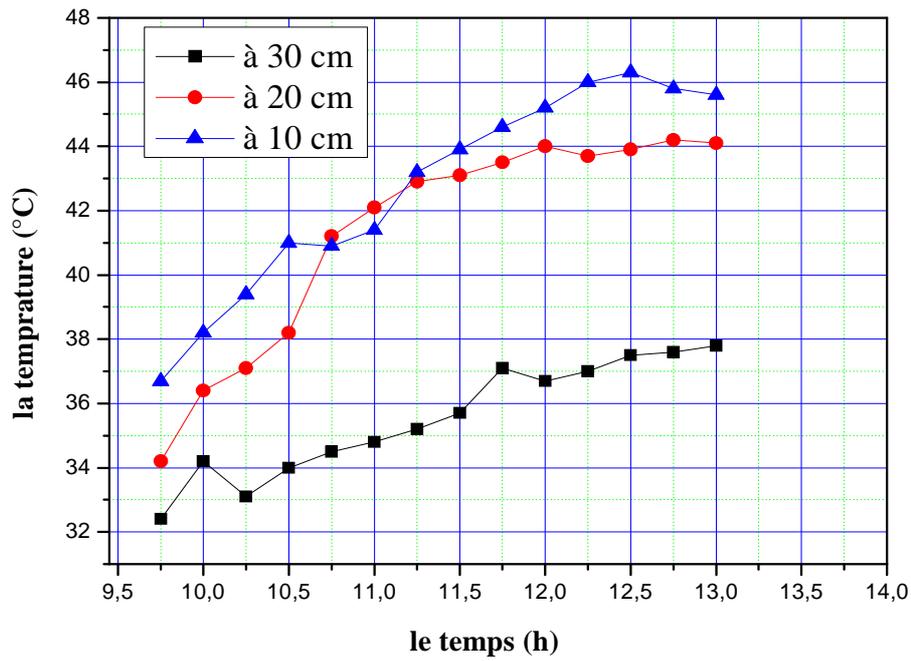


Figure III.20 : Evolution de la température pour trois dispositions

Dans le cas de séchage du piment vert

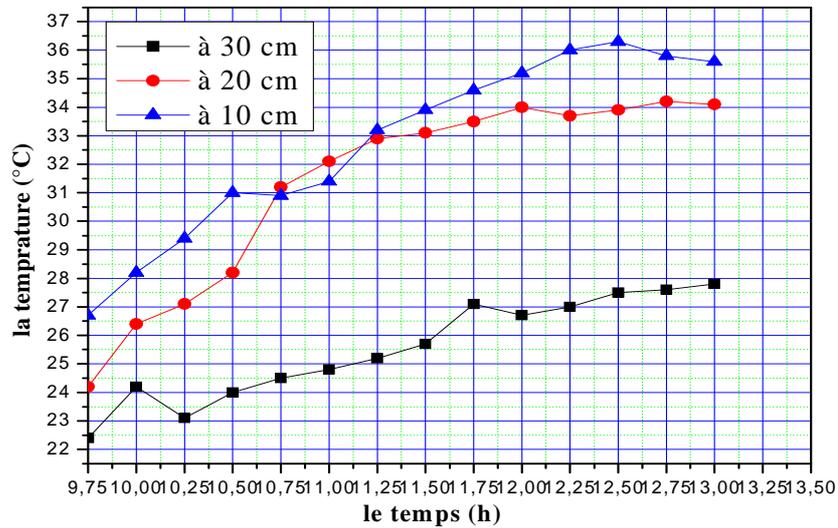


Figure III.21 : Evolution de la température pour trois dispositions

Dans le cas de séchage de la pomme de terre

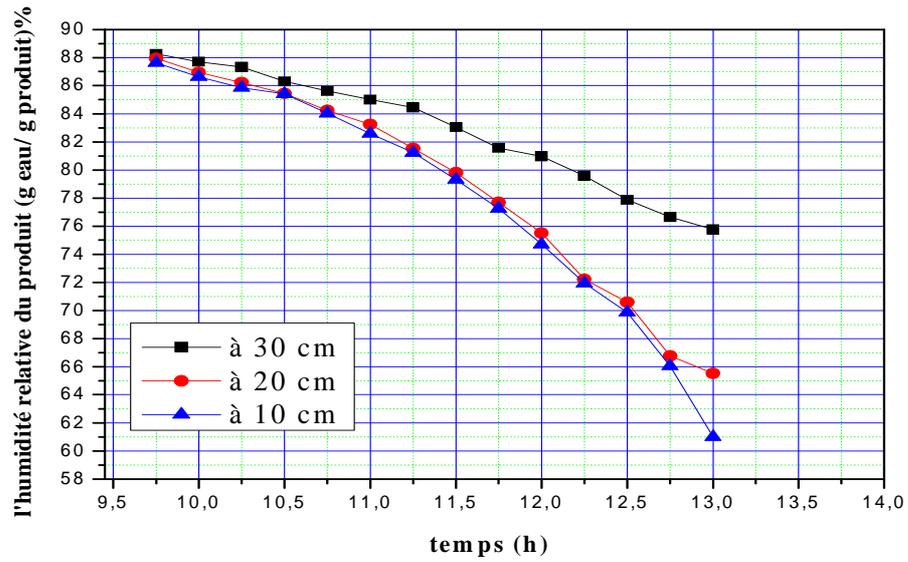


Figure III.22 : Variation de l'humidité relative pour trois dispositions

Dans le cas du séchage du piment vert

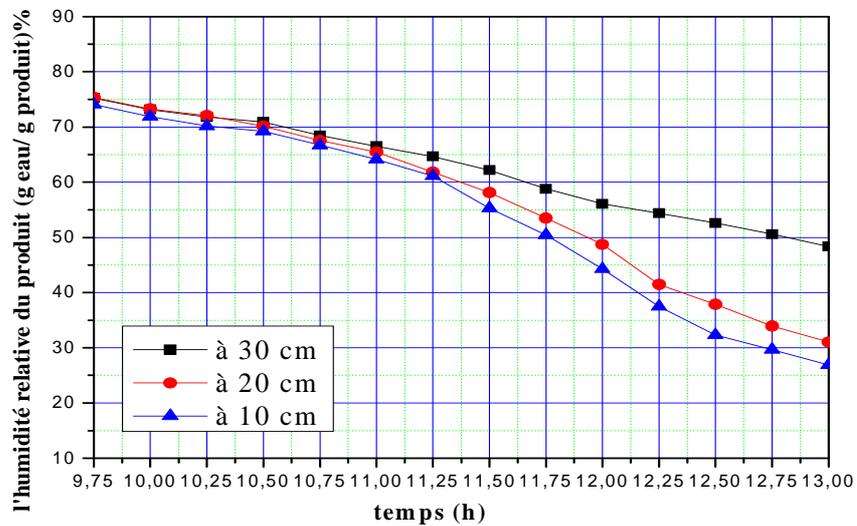


Figure III.23 : Variation de l'humidité relative pour trois dispositions

dans le cas du séchage de la pomme de terre

D'après les figures (III.22) et (III.23), on remarque que l'humidité relative finale pour la même durée de séchage de 03 H :15mn est de 60,99 (%) pour le piment vert et 29,5 (%) pour la

pomme de terre dans le cas d'une disposition de 10 cm de l'entrée de l'air asséchant dans la chambre de séchage, alors qu'elle de 65,52 (%) pour le piment vert et 31,2 (%) pour la pomme de terre à une disposition de 20 cm, par contre l'humidité relative déterminée est de 75,77 (%) pour le piment et 49,5 (%) en présence de la pomme de terre, correspondant à une disposition de 30 cm, correspondants à une évaporation d'eau de 71,8 g eau pour le piment, et 68,5 g eau pour la pomme de terre à 10 cm de disposition, alors que pour une disposition de 20 cm, la quantité d'eau évaporée de la matière à sécher est de 68,1 g eau pour le piment et 65,5 g eau pour la pomme de terre. Finalement, la quantité d'eau perdue dans le cas de 30 cm est de 54,6 g eau pour le piment et 56,7 g eau pour la pomme de terre.

Les figures précédentes nous montrent que la disposition du produit par rapport à l'entrée de l'air chaud dans la chambre a une influence importante sur sa température, par contre, lorsque les claies sont distants depuis l'entrée de l'air asséchant, se manifeste par des pertes considérables de la chaleur qui est absorbée par les composants de l'enceinte (claire, support de la claire...etc.), donc une diminution dans la quantité de chaleur qui devrait être absorbée par le produit qui se traduit par une faible évaporation d'eau contenue sous forme d'humidité dans la matière.

III.3.4 Effet du débit d'air asséchant sur le séchage :

Dans ce qui suit, on va changer le débit d'air asséchant qui entre dans la chambre de séchage par l'utilisation d'un variateur (potentiomètre) pour ajuster convenablement le débit d'air, tout en gardant constant les autres paramètres.

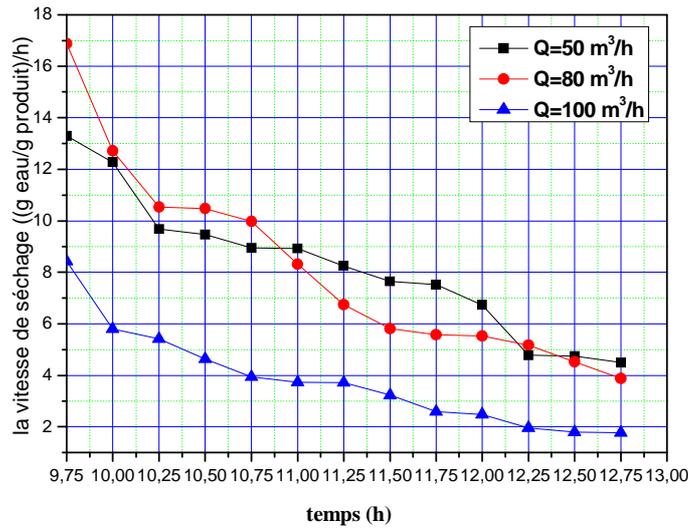


Figure III.24 : Variation de la vitesse de séchage pour trois valeurs de débit d'air chaud pour le piment vert

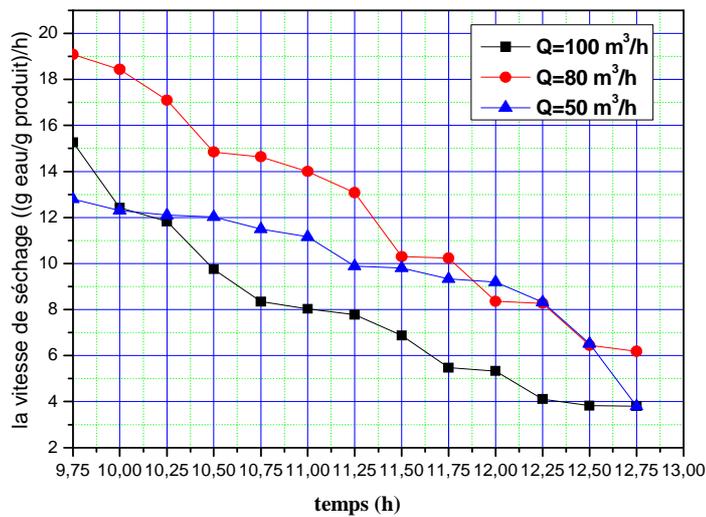


Figure III.25 : Variation de la vitesse de séchage pour trois valeurs de débit d'air chaud pour la pomme de terre

Les figures III.24 et III.25 montrent la variation de la vitesse de séchage pour trois valeurs de débits d'air chaud respectivement de 50, 80 et 100 m³/h, où on remarque l'existence de trois vitesses initiales correspondantes tels que :

- 13,30 (g eau/ g piment/h) et 15,26 (g eau/ g pomme de terre/h) pour un débit de 50 m³/h d'air chaud.
- 16,88 (g eau/ g piment/h) et 19,08 (g eau/ g pomme de terre/h) pour un débit de 80 m³/h d'air chaud.
- 8,42 (g eau/ g piment/h) et 12,80 (g eau/ g pomme de terre/h) pour un débit de 100 m³/h d'air chaud.

Les figures (III.26) et (III.27) montrent la variation de la température du produit au cours de l'opération de séchage pour les trois valeurs de débit d'air chaud à l'entrée de l'enceinte de séchage. On remarque d'après les figures que la température pour le débit de 80 m³/h elle est la plus élevée par rapport aux autres débits.

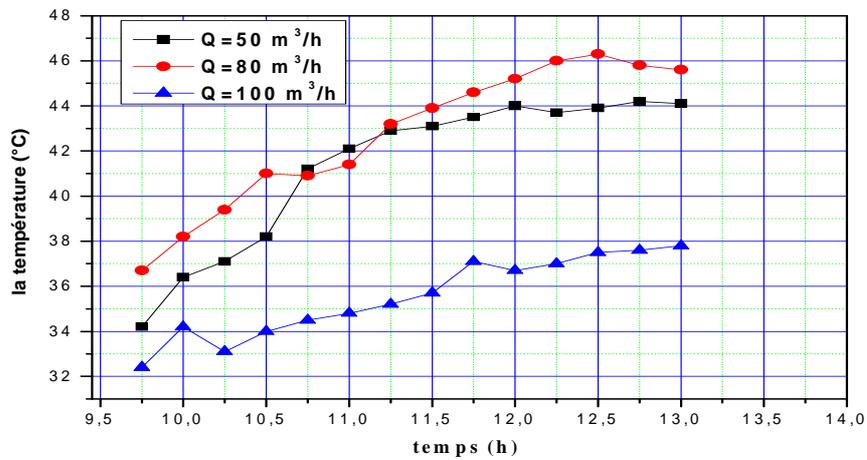


Figure III.26: Evolution de la température pour trois valeurs de débit d'air asséchant

Dans le cas du séchage du piment vert

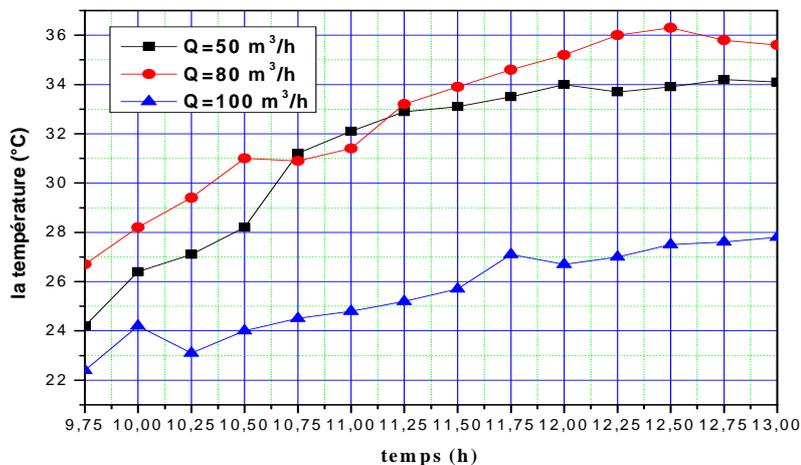


Figure III.27 : Evolution de la température pour trois valeurs de débit d'air asséchant

Dans le cas du séchage de la pomme de terre)

D'après les figures (III.27) et (III.28), l'humidité relative finale pour une durée de séchage identique de 03 H : 15mn est de 65,52 (%) pour le piment vert et 34,9 (%) pour la pomme de terre correspondant à un débit d'air chaud de 50 m³/h, alors que pour un débit d'air chaud de 80 m³/h l'humidité relative est de 66,67 (%) pour le piment vert et 29,8 (%) pour la pomme de terre, par contre elle est de 75,82 (%) pour le piment vert et de 50 (%) pour la pomme de terre relativement à un débit de 100 m³/h, qui correspondent à une évaporation d'eau de 68,1g d'eau pour le piment vert et 58,8 g d'eau pour la pomme de terre à un débit d'air chaud de 50 m³/h. Par contre lorsque le débit est au voisinage de 80 m³/h, la quantité d'eau perdue est de 67 g pour le piment et 68,8 g pour la pomme de terre. Finalement, pour le dernier débit d'air chaud de 100 m³/h, l'évaporation en eau pour le piment est de 54,5 g alors qu'elle est de 39,5 g pour la pomme de terre.

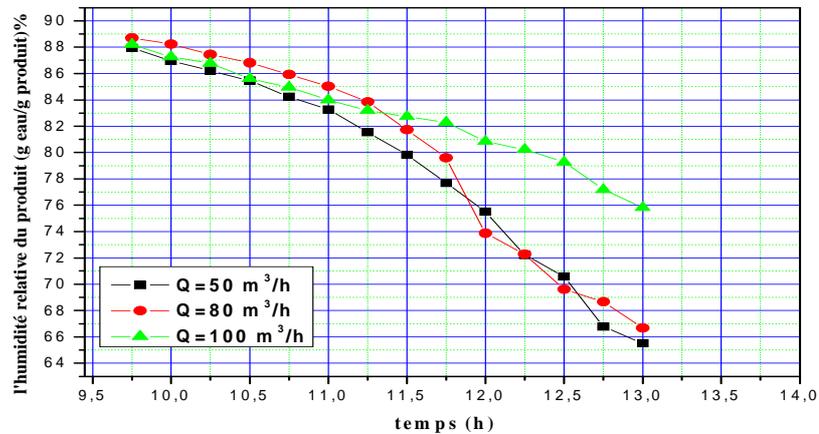


Figure III.28 : Evolution de l'humidité relative pour les trois débits

d'air chaud dans le cas du séchage du piment vert

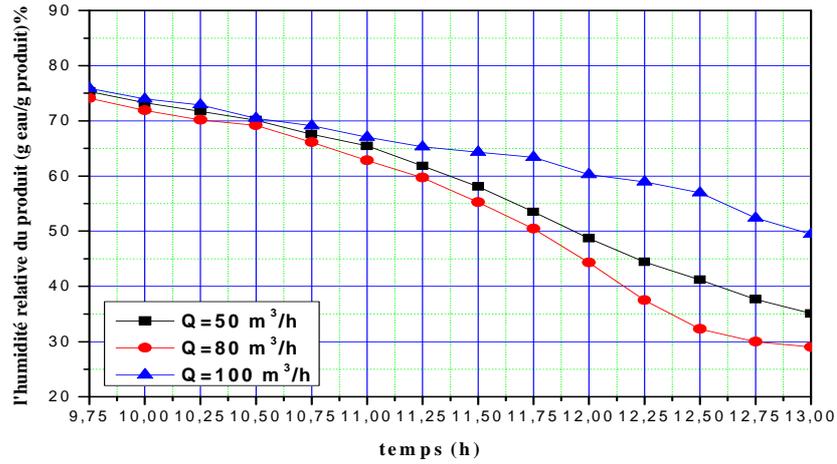


Figure III.29 : Evolution de l'humidité relative pour les trois débits

d'air chaud dans le cas du séchage de la pomme de terre

Le séchage s'effectue après un contact direct entre le produit et l'air chaud, l'augmentation de la vitesse de l'air assure le changement rapide de l'état de l'air (l'air sec et chaud), ce qui favorise un bon transfert de chaleur et de masse qui se traduit par une vitesse de séchage très rapide, d'autre part l'augmentation du débit d'air au niveau du capteur solaire plan à air, se manifeste par une diminution de la température de sortie du capteur vers l'entrée de l'enceinte de séchage.

3. Conclusion générale

Dans ce travail on s'intéresse à suivre l'évolution de certains paramètres de performances du séchage solaire indirect par convection forcée de l'air chaud qui est assuré par un capteur solaire plan à air, ce dernier est véhiculé à travers une conduite vers une chambre de séchage fabriqué d'acier galvanisé bien isolé thermiquement.

La partie expérimentale est basée sur le séchage par l'énergie thermique solaire indirect de deux produits agro-alimentaires ; le piment vert et la pomme de terre, dont l'objectif est de suivre durant la journée au cours du déroulement du processus, les courbes de la variation de la vitesse de séchage, la température et la variation de la teneur en eau pour ces produits.

On établit ces courbes en fonction des paramètres suivants :

- La forme de découpage du produit.
- La variation de la masse initiale du produit.
- La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de l'air asséchant dans la chambre de séchage.
- Des débits d'air chaud différents.

L'analyse de la variation de ces paramètres a montré une influence sur la température, la teneur en eau et la vitesse de séchage du produit de tel sort que :

- La forme de découpage du produit : l'épaisseur mince permet de faciliter le transfert de chaleur, ce qui donne la possibilité au produit d'absorber rapidement une quantité de chaleur importante, ce qui se traduit par une augmentation de sa température qui favorise l'évaporation de l'eau contenue sous forme d'humidité, d'autre part, le phénomène de diffusion d'eau liée par suite d'un transfert de chaleur et de masse qui se manifeste par une vitesse de séchage rapide et atteindre par conséquent une faible teneur en eau dans une durée très courte.
- La variation de la masse initiale : le but de séchage est l'utilisation de l'énergie sous forme de chaleur pour éliminer l'eau contenue dans le produit, suivant la quantité d'eau on peut estimer la quantité de chaleur nécessaire et suffisante.

Pour cela, on a pu démontrer que la masse initiale influe sur la température du produit, que si on maintient les mêmes conditions de fonctionnement du séchoir, pour une

même quantité d'énergie qui provoque un faible transfert de chaleur et un faible transfert de masse engendre une diminution de la vitesse de séchage.

- La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage : lorsque le produit est très loin de l'entrée de la chambre, l'air chaud va perdre une quantité de chaleur qui va être absorbée par les composants qui se trouvent à l'intérieur de la chambre, autrement, lorsque le produit à sécher est disposé loin de la bouche de soufflage de l'air chaud, la température de produit va diminuer par la suite d'un faible transfert de chaleur qui provoque en occurrence un faible transfert de masse et qui se traduit par conséquent par une faible vitesse de séchage.
- L'utilisation des débits d'air chaud différents: pour assurer le changement de ce paramètre par le moyen d'un variateur de vitesse, et en vue de modifier le transfert de chaleur qui permet d'abaisser ou d'augmenter la température de l'air chaud afin de provoquer un changement du transfert de masse, et une variation de l'humidité de l'air asséchant. Cependant, dans les capteurs solaire plans à air, lorsqu'on augmente le débit d'air à un certain niveau, la température de l'air à la sortie du capteur qui se trouve liée à l'entrée de la chambre de séchage, va diminuer et qui se traduit par une faible énergie véhiculée par le fluide caloporteur, qui nous donne un faible transfert de chaleur et de masse et par la suite une faible vitesse de séchage.

Cette étude nous ramène à conclure que, le contrôle des paramètres étudiés nous donne une augmentation dans la vitesse de séchage et par conséquent la possibilité l'améliorer les performances de ce procédés.

Si on prend en considération les paramètres précédents, on peut améliorer notre dispositif de séchage solaire indirect.

Nous suggérons aussi, de prévoir un appareillage bien dimensionné en fonction d'un ensemble de produits à sécher, notamment les produits en surproduction qui demandant ce type de traitement.

L'orientation moderne de la consommation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales se dirige vers les produits quasi-biologiques dans notre pays on commencer à développer ces techniques modernes économiques.

En vue de conserver leur cycle naturel de production, et en vu de leur impact économique et médicinal, nous suggérons une industrialisation des procédures de séchage solaire qui va permettre un développement de l'exportation, ainsi que l'économie national.

Références Bibliographiques

Akpinar, E., K. (2006). "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits." *Journal of Food Engineering* 73: 75-84.

Aoues, K., N. Moumami, et al. (2009). "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.

Arditti, G. T. c. i., tome III. Paris, France.

Bala, B., K., M. Mondol, R.A., et al. (2003). "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier." *Renewable Energy* 28: 90-183.

Bennamoun, L. (2001). Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local. Faculté des Sciences, Département de physique, Thèse de magister Université de Mentouri Constantine.

Benkhelfellah, R., S. El mokretar, et al. (2005). SECHOIRS SOLAIRES. ETUDE COMPARATIVE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES DANS DES MODELES DE TYPE DIRECT ET INDIRECT. 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc.

Bennamoun, L., A. Belhamri, "Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles." *Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda*: 201-204 (2007).

Bimbenet, J., J. (1984). Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.

Boulemtafes, A. and D. Semmar (1999). "Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect." *Rev. Energ. Ren.*: 97-700.

Busunia, M., "Characteristics of rough rice under natural convection." *Journal of Food Engineering* 47: 295-301 (2001).

Charreau, A. and R. Cavaille (1991). "Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés,." **2480-1; 2480-23.**

Communay, P. H. H., le gisement solaire, méthode et calculs", Groupe de Recherche et D'édition, France.

Daoued, M. (2004). Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation., université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application.

Dilip, J. (2007). "Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer." Journal of Food Engineering 78: 637-647.

Dilip R, P., R. Sawhney, L., et al. (2002). "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer." *Energy* 27: 579-590.

Dudez, P. (1999). "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés."

Ekechukwn, O., V. and B. Norton (1999). ""Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology"." *Energy Conversion and Management*40: 615 - 655.

El-Sebaili, A., A., S. Aboul-Enein, et al. (2002). "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables." *Energy* 27: 845-859.

Farhat, A., S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, A. Belghith, "Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse." *International Journal of Thermal Science* 43: 53-58 (2004).

Inci, T. and D. Pehlivan (2003). "Modelling of drying kinetics of single apricot." Journal of Food Engineering 58 (2003) 23–32 58: 23-32.

Khalil, E. J., Al-Juamily., et al. (2007). "Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq." *ScienceDirect* 209: 163-170.

Krokida, M., K., V. Karathanos, T., et al. (2003). "Drying kinetics of some vegetables." *Journal of Food Engineering* 59: 391-403.

Lahsasni, S., M. Kouhila, et al. (2004). ""Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel "." *Energy*29: 211 - 244.

Madhlope, A., S. Jones, A. , et al. (2001). " "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration "." *Renewable Energy*27: 27-37.

McCabe, L., C. Smith, et al. (1956). *Unit operations of chemical engineering*.

Nadeau, J. and R. Puiggali (1995)_. (Séchage des processus physiques aux procédés industriels),
Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France.

Pangavhanc, D., R., R. Sawhcy, L., et al. (2002). "Design, development and performance testing of new natural convection." *Energy* 27: 579-590.

Pangavhane, D., R. and R. Sawhney, L. (2002). " "Review of research and development work on solar dryers for grape drying "." *Energy Conversion and Management*43: 45 - 61.

Semmar, D., S. Betrouni, et al. (1998). "Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air." *Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique*: 33 - 38.

Shanmugama, V. and E. Natarajanb (2006). "Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer." *Renewable Energy* 31: 1239-1251.

Simatc, I., N. (2003). "Optimization of mixed mode and indirect modenatural convection solar dryers." *Renewable Energy*28: 435 - 453.

Singh, S., P. Singh, P., et al. (2004). "Multi-shelf portable solar dryer." *Renewable Energy* 29: 753-765.

Touati, B. (2001). *Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe*, Thèse de Magistère Centre Universitaire, Bechar, Algerie.

Whitaker, S. (1980). Heat and mass transfert in granular parous media *Advances in drying I*, Hemisphere publication, pp 23-61.

Résumé

L'objectif essentiel de ce travail est de déterminer les courbes de perte d'humidité relative, de la vitesse du séchage et de la température du produit pour le piment vert et la pomme de terre au cours de l'opération de séchage.

Dans cette étude expérimentale effectuée au moyen d'un séchoir solaire de type indirect, qui fonctionne en mode de convection forcée destiné pour le traitement thermique à moyenne durée des produits agroalimentaires.

Dans ce travail on s'est intéressé à l'influence des quatre paramètres (la masse initiale, la disposition, la forme de découpage du produit et le changement de débit d'air) sur la vitesse de séchage.

Mots Clés : Séchage solaire, convection forcée, cinétique de séchage, piment vert, pomme de terre, humidité relative, vitesse de séchage, température.

الملخص:

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو رسم المنحنيات المتعلقة بالضياع في الرطوبة النسبية و سرعة التجفيف و كذا درجة الحرارة لكل من الفلفل الأخضر و البطاطا خلال عملية التجفيف .

هذه الدراسة التجريبية تمت باستعمال مجفف شمسي يعمل على التحميل الحراري المدعم المخصص للمعالجة الحرارية في مدة زمنية متوسطة للمواد الغذائية.

و في هذا العمل ركزنا على دراسة تأثير أربع عوامل (الكتلة الأولية، توضع و كيفية تقطيع المادة و كذا تغيير سرعة تدفق الهواء) في سرعة التجفيف.

الكلمات المفتاح : التجفيف الشمسي، التحميل الحراري، سرعة التجفيف، الفلفل الأخضر، البطاطا، الرطوبة النسبية، درجة الحرارة

Abstract :

The main objective of this work is to determine curves of loss of relative humidity, the speed of drying and the temperature of the product for the green pepper and potatoes in the drying operation.

In this experimental study using a solar dryer of indirect type, which operates in forced convection for heat treatment for average duration of agri-food products.

In this work it is interested in the influence of the four parameters (initial mass, the layout, the form of the product cutting and change of air flow) on the rate of drying.

Key words: Solar drying, convection forced, green pepper, potato, relative humidity, drying speed, temperature.

