

Séchage solaire des figues: Bilan thermique et isotherme de désorption

A. Ferradji^{1*}, H. Chabour¹ et A. Malek²

¹. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie
Rue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie

² Division de l'Energie Solaire Photovoltaïque,
Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(reçu le 10 Septembre 2010 – accepté le 27 Décembre 2011)

Résumé - L'objectif de ce travail est d'étudier les performances énergétiques d'un séchoir solaire familial de type coquillage utilisé pour le séchage des figues de la variété taranimt. L'isotherme de désorption de cette variété a été déterminée à 60°C. La teneur en eau de la couche mono moléculaire (X_m) est estimée par l'équation de GAB. L'énergie nécessaire pour chauffer l'air de séchage est de 5,532 kWh.

Abstract - The aim of this work is to study the energy performance of family-type solar dryer having a shell form used for drying figs of variety Taranimt. The desorption isotherm of this variety was determined at 60 °C. The water content of the mono molecular layer (X_m) was estimated by the GAB equation. The energy required to heat the drying air is 5.532 kWh.

Mots clés: Figes - Isotherme de désorption - Activité de l'eau - Séchoir solaire - Equation de G.A.B.

1. INTRODUCTION

La culture du figuier en Algérie occupe 39 830 ha, environ 6,9 % des plantations fruitières. Le figuier est classé en quatrième place, après l'olivier (33%), le palmier (20%) et l'agrumes (9,1%). La production totale des figues est estimée à 606 900 Qx, dont plus de 80 % est consommée à l'état frais, le reste de la production est soumis au séchage.



Fig. 1: Figue à consistance pâteuse

* a_ferradji@yahoo.fr

La production des figues sèches est de l'ordre de 31 200 Qx. Les figues destinées au séchage doivent acquérir sur l'arbre une consistance pâteuse (Fig. 1). La peau est non seulement fendillée, mais ridée et flétrie. On dit alors qu'elle est passerillée (sa teneur en eau est de 40 - 50 %).

Les deux principaux prétraitements nécessaires au séchage des figues sont le blanchiment et le sulfitage. Le blanchiment est un traitement thermique destiné à détruire les enzymes susceptibles d'altérer des figues. Il influe sur la vitesse du séchage.

Une augmentation du temps de blanchiment diminue la durée de séchage significativement. La diminution de la durée du séchage serait due à l'élimination de la gomme et à l'assouplissement de la peau qui devient plus perméable.

Le sulfitage permet, par la fixation de l'anhydride sulfureux sur le fruit et par la formation d'une petite quantité d'acide sulfureux, d'éviter le brunissement des fruits au séchage, de détruire les germes de fermentation, en même temps que les larves issues des premières pontes des parasites, notamment les teignes (*Myelois ceratoniae*) (Guinebault, 1986; Le Bars, 1990).

Le séchage traditionnel en Algérie est généralement pratiqué à l'air libre (Fig. 2). Les pertes résultent des mauvaises conditions météorologiques qui entraînent la détérioration du produit, l'attaque des animaux et d'insectes, ou encore de contamination par la microflore et l'exposition à la poussière.



Fig. 2: Séchage des figues sur claies en roseau

Cette étude est une contribution à l'amélioration du séchage solaire des figues en utilisant un séchoir solaire direct de type coquillage. L'énergie nécessaire pour le séchage d'une quantité donnée de figues est évaluée en se basant sur les énergies de liaison de l'eau du fruit calculées par l'isotherme de désorption à 60 °C

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Matériel végétal

Les figues utilisées pour le séchage sont de la variété Taranimt provenant de la région de Sidi Aïch (Bejaïa). La variété Taranimt, caractérisée par une peau fine de couleur verte claire, est de très bonne qualité en frais et excellente en sec. Taranimt signifie le roseau, à cause de la forme des jeunes rameaux.

2.2 Préparation des figes pour le séchage

Les figes de la variété Taranimt subissent avant le séchage un blanchiment dans l'eau salée (4 %) à 100 °C pendant 4 minutes.

Le sulfitage des échantillons est réalisé par fumigation à raison de 2 grammes de soufre comburé par kg de figes.

2.3 Détermination de la teneur en eau

Un humidimètre à infrarouge (Sartorius MA) est utilisé pour la détermination de la teneur en eau des produits végétaux.

2.4 Calcul de la contrainte hydrique de l'air atmosphérique du lieu séchage

L'expression suivante permet de calculer les contraintes hydriques de l'air. Elle est proposée par Beltran *et al.* (1945), et est utilisée pour le calcul de la contrainte hydrique de l'air de séchage d'un site.

$$C = 1.0833 \times T \times \log\left(\frac{100}{H}\right) \quad (1)$$

La contrainte hydrique est définie comme étant l'énergie nécessaire pour ramener la vapeur de l'eau à son point de rosée. Cette expression tient compte à la fois de la température T et de l'humidité relative de l'air H.

Beltran *et al.* (1945) ont rapporté que le séchage solaire est réalisable que pour les contraintes hydriques supérieures à 100. Le lieu de séchage situé à l'Institut National Agronomique d'Alger (littoral), caractérisé en été par une température moyenne de 25°C et une humidité relative de 80 %, a une contrainte hydrique de 31.

Ainsi ce site ne présente pas d'aptitude au séchage solaire à l'air libre. D'où l'intérêt d'utiliser un séchoir indirect de type coquillage hybride (énergie solaire + gaz).

2.5 Description du séchoir coquillage hybride familial

Le séchoir solaire indirect de type coquillage, fabriqué en tôle métallique est composé d'un couvercle et d'une partie inférieure en forme conique, d'où son nom 'coquillage'. Le séchage des figes est effectué par une énergie d'appoint en utilisant le réchaud à gaz (Fig. 3).



Fig. 3: Séchoir coquillage hybride

2.6 Détermination du bilan thermique du séchoir

Le bilan thermique du séchoir solaire type coquillage est déterminé en réalisant un essai de séchage sur 9,5 kg de figes de la variété Taranimt ayant une teneur en eau initiale de 50,77 % et finale de 20,81 %.

2.6.1 Détermination du débit d'air chaud

Le débit nécessaire en air chaud est déterminé par la relation suivante:

$$D_s = \frac{1000 \times T_{se}}{1,2 (X_m - X_a)} \quad (2)$$

où, D_s , représente le débit nécessaire en air chaud (m^3/h), X_a , l'humidité absolue 'air ambiant' ($kg_{eau}/kg_{air \ sec}$), X_m , l'humidité absolue de l'air à la sortie du séchoir ($kg_{eau}/kg_{air \ sec}$).

X_m et X_a sont déterminées à partir du diagramme enthalpique de l'air humide.

2.6.2 Chauffage de l'air de séchage

L'énergie nécessaire pour chauffer l'air de séchage peut être déterminée par la relation suivante:

$$E_n = P_n \times t_s \quad (3)$$

avec, t_s , la durée de séchage et P_n , la puissance du séchoir.

2.6.3 Puissance du séchoir

La puissance du séchoir est calculée par l'expression suivante:

$$P_n = \frac{1,2 (H_s - H_a)}{3600} \times D_s \quad (4)$$

où, P_n est la puissance nécessaire en kW; H_s l'enthalpie de l'air sec en kJ/kg; H_a l'enthalpie de l'air ambiant en kJ/kg et D_s le débit d'air chaud en m^3/h .

2.7 Détermination des isothermes de désorption

L'isotherme de désorption est déterminée par la méthode gravimétrique (Spiess *et al.*, 1983). Les neuf solutions d'acide sulfurique à différentes concentrations placées dans les hygromètres, maintiennent des humidités relatives constantes comprises entre 0,11 et 0,83 (Fig. 3) (**Tableau 1**).

Les valeurs des humidités relatives de ces solutions sont vérifiées par un activimètre. L'échantillon (3×0,5 g) est placé dans l'hygromètre étanche à l'intérieur duquel la solution d'acide sulfurique maintient une humidité relative constante.

La température est maintenue constante en plaçant les dessiccateurs dans une étuve à 60°C (Fig. 4). L'échantillon est pesé à intervalle de temps régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus. C'est en déterminant la teneur en eau à l'équilibre (X_e), le couple (HR %, X_e) donne un point de l'isotherme de désorption.

Aux activités de l'eau élevées ($a_w > 0.7$), des cristaux de thymol sont déposés dans les hygrostats pour éviter le développement des moisissures. La teneur en eau des échantillons à l'équilibre est déterminée par l'humidimètre à infrarouge.

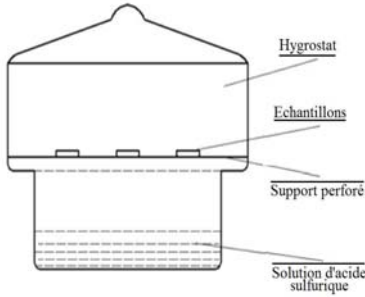


Fig. 3: Hygrostat pour la détermination de la teneur en eau à l'équilibre



Fig. 4: Etuve contenant les dessiccateurs

Tableau 1: Solutions d'acide sulfurique et leurs activités d'eau

H_2SO_4	25	30	35	40	45	50	55	60	65
a_w (60°C)	0.830	0.776	0.682	0.584	0.488	0.388	0.287	0.196	0.124

2.8 Modèle mathématique GAB

Le modèle le plus utilisé pour les isothermes de sorption est le modèle de G.A.B (Guggenheim, Anderson et de Boer) (Labuza *et al.*). Il est applicable pour des activités de l'eau comprises entre 0,05 et 0,95.

Ce modèle permet non seulement de calculer la teneur en eau de la couche monomoléculaire, mais permet aussi de déterminer la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche à partir des points expérimentaux.

Le modèle est également utilisé pour tracer la courbe de désorption des figes à 60 °C est celui de Guggenheim-Anderson- de Boer (GAB).

$$X_e = \frac{X_m \times C \times K \times a_w}{\left[(1 - K \times a_w) \times (1 - K \times a_w + C \times K \times a_w) \right]} \quad (5)$$

Où X_e est la teneur en eau à l'équilibre, X_m est la teneur en eau de la couche monomoléculaire, a_w est l'activité de l'eau, C est la constante de chaleur de sorption de la monocouche et K est le facteur de la chaleur de sorption de la multicouche.

$$C = C_0 \times \exp\left(\frac{\Delta H_1}{R \times T}\right) ; k = k_0 \times \exp\left(\frac{\Delta H_2}{R \times T}\right) \quad (6)$$

Où T est la température absolue, R est la constante universelle des gaz parfaits.

ΔH_1 et ΔH_2 sont les fonctions des chaleurs de sorption utilisées pour le calcul de H_m et H_n dans le cas de la désorption:

$$\Delta H_1 = H_L - H_m, \quad \Delta H_2 = H_L - H_n \quad (7)$$

Où H_m est la chaleur de désorption de la monocouche, H_n la chaleur de désorption de la multicouche et H_L la chaleur de condensation de l'eau (43 kJ/mole à 25°C).

L'ajustement des valeurs expérimentales au modèle de G.A.B est effectué par le logiciel 'Statistica' version 10 en utilisant le programme de la régression non linéaire et la technique Quasi-newton.

La qualité de l'ajustement du modèle de GAB est appréciée par le pourcentage de l'écart moyen relatif $P(\%)$ calculé par l'équation (8).

Un modèle est considéré acceptable lorsque la valeur $P(\%)$ est inférieure à 10 % (Lomauro *et al.*).

$$P(\%) = \frac{100}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|X_{\text{exp}} - X_p|}{X_{\text{exp}}} \quad (8)$$

Avec, X_{exp} , la valeur expérimentale de la teneur en eau à l'équilibre, X_p , la valeur prévue de la teneur en eau à l'équilibre et N , le nombre de mesure.

2.9 Détermination de l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau au cours du séchage

L'énergie nécessaire Q pour évaporer l'eau est calculée par l'expression suivante:

$$Q = H_n \times m_e \quad (9)$$

Avec, H_n (kJ), est la chaleur latente de désorption de la multicouche. m_e (kg), la quantité d'eau à évaporer et qui se calcule par la relation suivante:

$$m_e = \frac{m_i \times (m_{ci} - m_{cf})}{(100 - m_{cf})} \quad (10)$$

Où, m_i est la masse de l'échantillon (kg), m_{ci} la teneur en eau initiale (g/100 g en M.S.) et m_{cf} la teneur en eau finale (g/100 g en M.S.).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Performances du séchoir solaire de type coquillage

Les données nécessaires pour le calcul du débit d'air, de l'énergie de chauffage de l'air de séchage et de la puissance du séchoir sont présentées sur le **Tableau 2**.

La température à l'intérieur du séchoir, sans énergie d'appoint, atteint 55 °C entre 11 h et 14 h. Afin de maintenir une température de séchage constante de 60 °C un réchaud à gaz est utilisé comme énergie d'appoint en réglant manuellement le débit du gaz.

Le capteur solaire reste la principale source de chaleur. Le débit de l'air, l'énergie de chauffage de l'air et la puissance en kW sont déterminées respectivement par les relations (2), (3) et (4).

Le débit d'air nécessaire pour abaisser la teneur en eau de 9,5 kg de figes de 50,77 % à 20,87 % après 12 h de séchage est de 27,59 m³/h. Pour atteindre ce débit, il est recommandé d'équiper le séchoir coquillage d'une cheminée (Fig. 2).

La puissance nécessaire (P_n) en kW est évaluée à 0.461 kW et par conséquent l'énergie (E_n) utile pour le chauffage de l'air est de 5.532 kWh.

Tableau 2: Données nécessaires pour le calcul du débit d'air, de l'énergie de chauffage de l'air de séchage et de la puissance du séchoir

Paramètres	Valeur
Poids des figes (kg)	9.5
Durée de séchage (h)	12
Teneur en eau initiale (%)	50.77
Teneur en eau finale (%)	20.81
Température de séchage (°C)	60
Température sèche de l'air ambiant (°C)	34
Température humide de l'air ambiant (°C)	29
Humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir (kg _{eau} /kg _{air sec})	0.0241
Humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir (kg _{eau} /kg _{air sec})	0.033
Humidité relative de l'air (%)	70
Enthalpie de l'air ambiant (kJ/kg)	95.83
Enthalpie de l'air chaud (kJ/kg)	146.03

3.2 Données de l'isotherme de sorption

Les valeurs des teneurs en eau à l'équilibre, expérimentales et prévues, de l'isotherme de désorption des figes à 60 °C sont présentées sur le **Tableau 3**.

La figure 5 présente l'isotherme de désorption à 60 °C qui a une forme sigmoïdale de type II spécifique aux fruits secs riches en sucres (Fig. 5).

Les résultats de l'analyse de la régression non linéaire de l'ajustement de l'équation de GAB aux valeurs expérimentales sont présentés sur le **Tableau 3**.

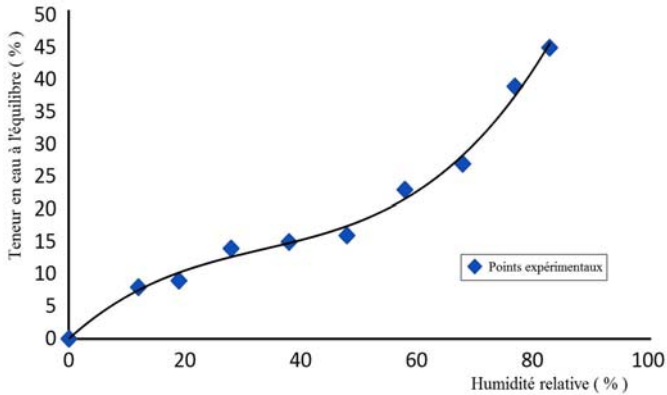


Fig. 5: Isotherme de désorption des figues à 60 °C

Tableau 3: Comparaison des valeurs expérimentales des teneurs en eau ' X_{exp} ' à l'équilibre (X_{exp}) déterminées à 60°C aux valeurs prévues (X_p)

A_w Activité de l'eau	X_{exp}	X_p	Erreur relative
0.83	45.5	46.34	1.84
0.776	39.6	37.83	4.46
0.682	27.65	28.51	3.1
0.584	23.5	22.51	4.2
0.488	16.41	18.29	11.45
0.388	15	15.31	2.06
0.287	14.45	12.69	12.17
0.196	9.33	10.46	12.11
0.124	8.84	8.42	4.75

3.3 Modèle de l'isotherme de sorption

La valeur du pourcentage $P(\%)$, qui est d'environ 6.22 %, permet de conclure que l'équation de GAB peut être utilisée pour prédire la valeur de la teneur en eau à l'équilibre, et d'autres paramètres, tels que la teneur en eau de la couche mono moléculaire et les enthalpies de liaison de la monocouche et la multicouche.

La stabilité des fruits secs est inversement proportionnelle à la teneur en eau. Au cours du stockage la teneur en eau optimale pour une stabilité maximale correspond à la teneur en eau de la couche mono moléculaire calculée par le modèle BET (Brunauer *et al.*, 1938) et GAB.

La teneur en eau de la monocouche est définie comme étant la quantité d'eau pour laquelle tous les sites hydrophiles disponibles sont couverts par une monocouche d'eau.

Un des paramètres de l'équation de GAB (X_m) ou teneur en eau de la monocouche est équivalent à celui de BET. Pour la variété de figue Taranimt, cette teneur en eau (X_m) est de 10.76 % (**Tableau 4**). Cette valeur est considérée favorable pour une bonne stabilité des figues sèches au cours du stockage. En effet, Maroulis *et al.*, ont suggéré pour une bonne conservation des fruits secs, une teneur en eau de la couche mono moléculaire limite de 10 %. Ce résultat est similaire à celui des abricots (10.10 %) et des figues (11 %) rapportés par Ayranci *et al.*, A. Ferradji *et al.*

Tableau 4: Valeurs des cinq paramètres (X_m , C, K', ΔH_1 et ΔH_2) de l'équation de GAB

Paramètres	X_m (%)	C	K'	ΔH_1 (kJ/mole)	ΔH_2 (kJ/mole)	R^2
Valeur	10.76	18.49	0.93	1.44	-17.12	99.42

3.4 Aspects thermodynamiques de l'isotherme de sorption

L'élimination de l'eau des figues par évaporation nécessite un apport d'énergie. Cette énergie doit surmonter la chaleur latente d'évaporation de l'eau pure, aussi l'énergie nécessaire pour la rupture des liaisons d'hydrogène qui fixent l'eau sur les sites hydrophiles du composé.

L'enthalpie nécessaire pour effectuer cette évaporation diminue pour les teneurs en eau élevées et augmente pour les faibles teneurs en eau. L'application de l'équation (5) fournit les valeurs de ΔH_1 et ΔH_2 présentées sur le **Tableau 4**.

Le paramètre ΔH_1 est la différence entre l'enthalpie de la monocouche et celle de la multicouche. Pour cette étude, la valeur de ΔH_1 est évaluée à 1,44 kJ/mole et celle de ΔH_2 est de -17,10 kJ/mole. Ces valeurs indiquent l'existence d'une forte liaison entre la monocouche et le solide du composé, qui est nettement supérieure à celle qui existe entre les molécules d'eau de la monocouche et celle de la multicouche.

La chaleur de désorption de la multicouche H_n déduite de l'équation (7) est évaluée à 3344 kJ/kg d'eau. Ainsi, l'énergie nécessaire (calculée par les équations (9) et (10)), pour diminuer la teneur en eau des figues de 50.77 % à 20.81 %, est de 11695 kJ ou 3.248 kWh.

Par conséquent, l'enthalpie de l'air, fluide caloporteur, qui est évaluée à 5,532 kWh est largement suffisante pour réaliser le séchage d'une quantité de figues supérieure à 9.5 kg.

Ainsi, la détermination de la chaleur de désorption de la multicouche (H_n) est primordiale pour le dimensionnement des séchoirs solaires.

4. CONCLUSION

La température maximale du séchoir solaire de type coquillage, atteinte sans énergie d'appoint, est de 55 °C. L'isotherme de désorption est décrite convenablement par le

modèle de GAB, qui a permis le calcul de la chaleur de désorption de la multicouche (H_n) importante pour le dimensionnement des séchoirs solaires.

La teneur en eau de la couche mono moléculaire qui est de 10.81 % est favorable pour une bonne conservation des figues séchées.

REFERENCES

- [1] E. Ayranci, G. Ayranci and Z. Dogantan, '*Moisture Sorption Isotherms of Dried Apricot, Fig and Raisin at 20 and 36 °C*', Journal of Food Science, Vol. 5, N°6, pp. 1591-1593, 1990.
- [2] E. Beltran et R. Leroy, '*Au Sujet des Contraintes Hydriques*', Annales de l'INA, Alger, Tome II, Fascicule I, 1945.
- [3] S. Brunauer, P.H. Emmett and E. Teller, '*Absorption of Gases in Molecular Layers*', Journal of the American Chemical Society, Vol. 60, N°2, pp. 309 - 319, 1938.
- [3] A. Guinebault, E. Varagnate et D. Chabrol, '*Le point sur le Séchage Solaire des Produits Alimentaires*', Gres gret, Dossier N°8, 215 p., 1986.
- [4] T.P. Labuza, A. Kaanane and J.Y. Chen, '*Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods*', Journal of Food Science, Vol. 50, N°2, pp. 385 - 391, 1985.
- [5] J. Le Bars, '*Contribution to a Principal Strategy for Preventing Aflatoxin Contamination of Dried Figs*', Microbiologie, Aliments, Nutrition, Vol. 8, N+3, pp. 265 - 270, 1990.
- [6] C.J. Lomauro, A.S. Bakshi and T.P. Labuza, '*Moisture Transfer Properties of Dry and Semimoist Foods*', Journal of Food Science, Vol. 50, N°2, pp. 397 - 400, 1985.
- [7] Z.B. Maroulis, E. Tsami and D. Marinos-Kouris, '*Application of the GAB Model to the Moisture Sorption Isotherms for Dried Fruits*', Journal of food Science, Vol. 7, N°1, pp. 63 - 78, 1988.
- [8] W.E.L. Spiess and W. Wolf, '*The Results of the Cost 90 - Project of Water Activity*', In: Physica Properties of Foods, Applied Science Publishers, London, p. 65 - 83, 1983.
- [9] A. Ferradji et A. Malek, '*Isothermes des Abricots à 25 °C et à 45 °C*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°1, pp. 39 - 48, 2005.