

Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect

A. Boulemtafes et D. Semmar

Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

Résumé - *L'objet de ce présent travail est 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 haute d'un mètre. Il est alimenté en air chaud par un capteur solaire plan à air, incliné d'un angle égal à la latitude du site (Bouzaréah). 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.*

Abstract - *The object of this present work is the design and the realisation of an indirect solar dryer with agricultural vocation, intended for the drying of the fruit and vegetables. The dryer consists of a one meter high parallelepiped box. It is fed in hot air by a plane solar energy captor with air, inclined of an angle equal to the latitude of the site (Bouzaréah). The experimental part will consist in studying the characteristics of the air of drying when it arrives in the box of drying i.e. its temperature, its percentage of moisture, its speed and its flow like their evolutions during one day characteristic. The knowledge of the evolution of all these parameters and their interdependence makes it possible to select the types of products likely to be dried by this drier. Finally the setting in equation of the phenomena of transfer of heat and mass taking place during drying makes it possible to compare between theory and practical.*

Mots clés: Séchage solaire – Transfert de chaleur et de masse – Energie solaire.

1. INTRODUCTION

Lorsque le séchage est effectué avec des moyens techniques, il nécessite de la chaleur et de l'énergie dans des proportions qui dépendent de la teneur en humidité, du système de séchage utilisé, de la température de séchage et des caractéristiques spécifiques du produit agricole concerné, en particulier la résistance à l'air opposée par le produit à sécher (épaisseur de la couche superficielle, dimensions du produit, vitesse de l'air). Les séchoirs à air chaud avec un très haut pouvoir de chauffage sont utiles, cependant leur consommation en énergie demeure trop élevée.

Le prix du pétrole brut et du mazout vont continuer à grimper au cours de ce siècle. Chaque pays a donc intérêt à tenir compte des sources d'énergies de remplacement. C'est pour cette raison que le séchage solaire présente un tel intérêt pour les pays en voie de développement.

En Algérie, le séchage solaire demeure à l'état expérimental, dans ce but, notre travail se veut une contribution à une meilleure connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité (migration interne) et les transferts de chaleur et de masse à l'interface produit – air, ainsi que des caractéristiques générales de l'air asséchant (humidité, débit, etc.).

En effet, cela constitue une base de travail nécessaire pour la conception et la modélisation des séchoirs solaires et leur utilisation à grande échelle notamment dans le secteur de l'industrie agricole.

2. CONCEPTION DU SECHOIR SOLAIRE INDIRECT

Il n'existe pas de mécanisme universel dans le choix technologique d'un séchoir solaire. Des diverses études de cas et présentations faites, il en ressort qu'il est difficile d'avoir des éléments indiscutables de validation et de comparaison entre les différents modèles de séchoirs, soit l'outil de séchage est encore en phase d'expérimentation et de validation dans les conditions réelles d'utilisation, soit il est difficile d'extrapoler les résultats en zone climatique différente pour des produits différents. Suite à cet état de fait et compte tenu du caractère expérimental de notre étude, nous avons opté pour un modèle de séchoir classique et assez simple. Il s'agit d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes.

Le dispositif utilisé est schématisé sur la figure 1. Il comprend :

- Un capteur solaire plan à air qui fait office d'insolateur et permet de chauffer l'air à la température désirée. L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur. Il est d'abord aspiré à l'aide de deux ventilateurs posés en aval. Le contact air-absorbeur, ainsi que l'effet convectif servent à augmenter la température de l'air.

- Une boîte de séchage de forme parallélépipédique réalisée entièrement en tôle galvanisée. Sur sa face avant, une porte à double battant permet le chargement et le déchargement des produits à sécher. Ceux-ci sont disposés sur des claies en grillage permettant le passage de l'air. La boîte de séchage a été réalisée au niveau de l'atelier du centre.

3. MISE EN EQUATION

La modélisation mathématique des transferts dont la boîte est le siège peut être établie à partir des bilans énergétiques et massiques traduisant la conservation de l'énergie et de la masse. En supposant que les transferts se font uniquement dans le sens de l'écoulement de l'air dans la boîte de séchage, le problème devient à évolution unidimensionnelle.

De plus le séchage étant un phénomène relativement complexe à cause du nombre important des paramètres entrant en jeu et due à l'enchevêtrement des échanges thermiques et massiques et pour s'affranchir de la résolution des équations aux dérivées partielles, on procède à la discrétisation spatiale de la boîte de séchage.

Fiche technique de la boîte de séchage

Matériau	Entièrement en tôle galvanisée 5/10°
Dimensions extérieures	
Hauteur - Largeur - Profondeur	1 m * 0,7 m * 0,7 m
Isolation	Laine de verre
Volume utile	0.490 m ³
Nombre et dimensions de claies	5 - 0,65 m * 0.65 m
Surface de séchage	0,422 m ²
Rapport surface/volume :	0.862
Chargement	Porte à double battant située sur la face arrière de la boîte de séchage

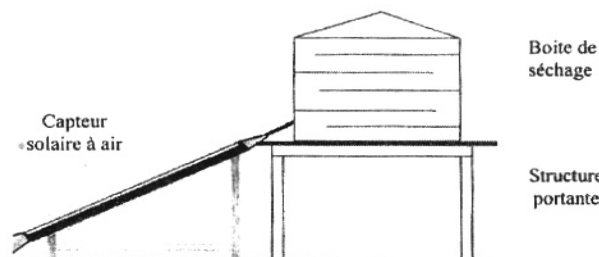


Fig. 1: Schéma descriptif du dispositif

Les hypothèses de travail sont les suivantes : [1]

- 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 sont négligeables.
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables.

Equations de base

3.1 Bilan d'énergie de la face extérieure de la boîte de séchage

$$\rho_e e_{pe} C_{ppe} \cdot \frac{dT_{pe}}{dt} = .h_d \cdot (T_{pi} - T_{pe}) - h_w \cdot (T_{pe} - T_{ab}) + .h_r \cdot (T_{pe} - T_c)$$

3.2 Bilan énergétique de la face interne de la boîte de séchage

$$\rho_i e_{pi} C_{ppi} \cdot \frac{dT_{pi}}{dt} = .h_c \cdot (T_a - T_{pi}) + .h_d \cdot (T_{pi} - T_{pe})$$

3.3 Bilan énergétique de l'air asséchant

$$\Delta x \dot{m}_a C_{pa} \frac{dT_a}{dx} = S_{a-f} h_{cf} (T_a - T_f) - S_{a-pi} h_c (T_a - T_{pi})$$

3.4 Bilan énergétique du produit

$$m_f C_{pf} \frac{dT_f}{dt} = S_{a-f} h_{cf} (T_a - T_f) - L_v \dot{m}_e$$

4. PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Fonctionnement

L'air frais est d'abord capté de l'extérieur à l'aide de deux ventilateurs centrifuges aspirants, vers l'intérieur du capteur. Le contact air-absorbeur ainsi que le transfert convectif permettent d'élever la Température à une valeur de consigne fixe. Ensuite il arrive dans la boîte de séchage où se charge de l'humidité contenue dans le produit.

4.2 Appareillage de mesure et protocole expérimental

- On se fixe la masse de produit à sécher par claie soit (150 g) par claie. On règle la température de consigne ainsi que le débit de l'air asséchant.
- On sélectionne trois claies de la boîte de séchage sur lesquelles on installe des prises de températures à l'aide de thermocouples de type K (chromel-alumel), de diamètre d = 1mm et de précision 0.5 °C. On mesure aussi les températures de l'air à l'entrée et la sortie du séchoir. L'ensemble des thermocouples est connecté à un enregistreur thermométrique à 30 voies de marque (phillips).
- L'humidité de l'air à l'entrée et la sortie de la boîte ainsi qu'aux niveaux des claies sont mesurés à l'aide d'une sonde hygrométrique à affichage numérique de marque (Humicolor) de sensibilité 0.1 °C .
- La perte de masse du produit est déterminée par la méthode de la pesée. En effectuant des pesées toutes les heures à l'aide d'une balance de précision 0.1 g.

Etablissement des courbes de séchage

Lors de l'opération de séchage, il se produit un double transfert : thermique et de masse. Ce qui fait que l'air à sa sortie a une humidité plus grande tandis que sa température sèche a diminué. De son côté le produit voit diminuer son humidité relative et croître sa température sèche. Pour illustrer ces mouvements de transfert, il existe plusieurs courbes caractéristiques dites "courbes des séchage". On entend par courbes de séchage les courbes représentant les variations de :

- la teneur en eau en fonction du temps : $X = f(t)$.
- la vitesse de séchage en fonction du temps : $dX/dt = f(t)$.
- la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau : $dX/dt = f(X)$

La première courbe obtenue expérimentalement est $X = f(t)$. C'est elle qui contient le plus d'informations, les deux autres se déduisent par dérivation. Le transfert d'humidité entre l'air et le produit peut également être représenté par une courbe qui décrit l'évolution de la teneur en eau réduite du produit rapporté à la matière sèche, en fonction du temps : $X_r = f(t)$. Les expériences étant en cours, nous produisons ici, à titre d'exemple les courbes caractéristiques de séchage de certains produits agro-alimentaires tels que : abricots, pommes, tomates, et peaux d'orange.

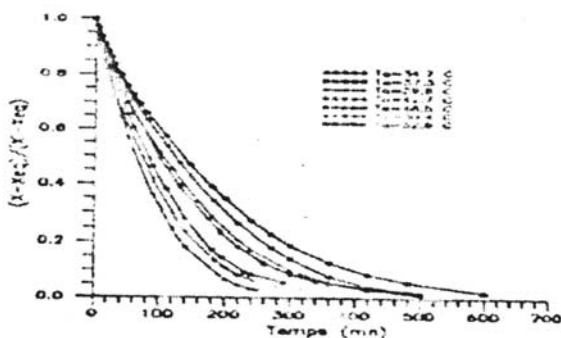


Fig. 2: Evolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour diverses températures de l'air. 'peaux d'oranges' (Va=1,8m/s) [5]

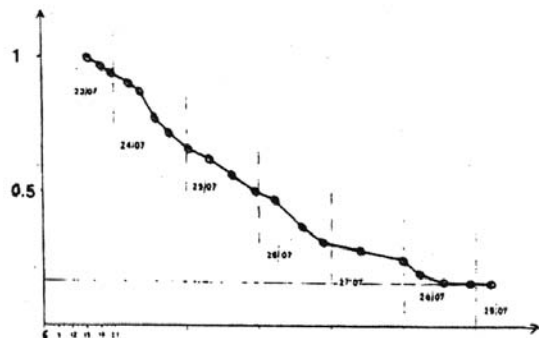


Fig. 3: Courbe de séchage des pêches: poids relatif en fonction des jours et des heures [6]

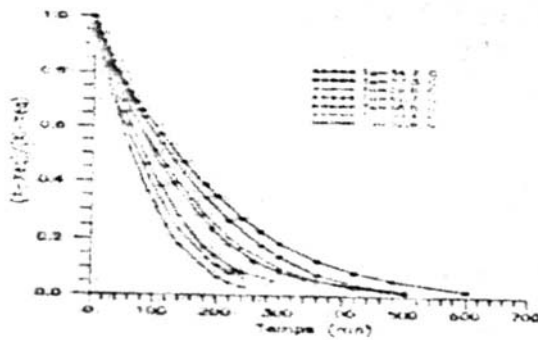


Fig. 4: Courbes de séchage des tomates: poids relatif en fonction des jours et des heures [6]

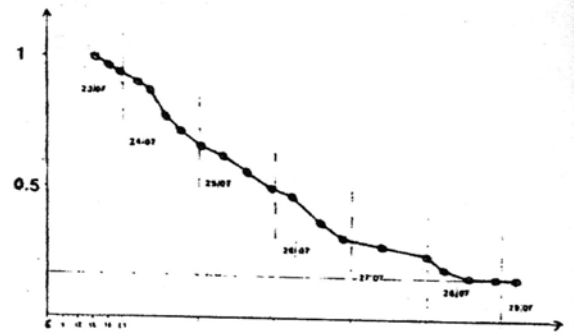


Fig. 5: Courbes de séchage des pommes: poids relatif en fonction des jours et des heures [6]

REFERENCES

- [1] Jongjit Hirunlabh, 'Recherche d'une Méthode Simple de Dimensionnement des Séchoirs à Chauffage Partiellement Solaire pour Fruits et Légumes', Thèse de Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université de Nice, 1988.
- [2] M. Daguene, 'Les Séchoirs Solaires : Théorie et Pratique', Ed. UNESCO
- [3] S. Benmabrouk et A. Belghith, 'Comportement Dynamique et Thermique d'un Séchoir Solaire', JITH97
- [4] B. Zeghami et M. Daguene, 'Modélisation Informatique d'un Séchoir Solaire à Effet de Serre pour Fruits et Légumes', Revue Internationale d'Héliotechnique, 1^{er} Semestre 1982.
- [5] E. Belhamidi, A. Belghith, Amrani, A. Mir et M. Kaou, 'Approche Expérimentale de la Cinétique de Séchage des Produits Agro-alimentaires', Revue Générale de Thermique, Août-Septembre 1993.
- [6] J.R. Puiggali, B. Varichon et M. Combarous, 'Définitions et Premières Expérimentations d'un Séchoir Solaire de Compagne', Uni. de Bordeaux, Lab. de Mécanique Physique, Groupe M5, Phénomènes de transfert, Bordeaux, Janvier 1981.

NOMENCLATURE

- C_{pa} : Capacité calorifique massique à pression constante de l'air ($J.kg^{-1}.K$)
- C_{pf} : Capacité calorifique massique du produit à sécher ($J.kg^{-1}.K$)
- C_{ppe} : Capacité calorifique massique de la paroi isolante de l'armoire de séchage ($J.kg^{-1}.K$)
- C_{ppi} : Capacité calorifique massique de la paroi interne de l'armoire de séchage ($J.kg^{-1}.K$)
- e_{pe} : Epaisseur de la paroi isolante de l'armoire de séchage (m)
- e_{pi} : Epaisseur de la paroi interne de l'armoire de séchage (m)
- $h_{c,f}$: Coefficient d'échange convectif entre l'air et le produit ($W.m^{-2}/K$)
- h_c : Coefficient d'échange convectif entre l'air et la face interne de l'armoire de séchage ($W.m^{-2}/K$)
- h_d : Coefficient d'échange conductif à travers la paroi isolante de la boîte de séchage ($W.m^{-2}/K$)
- h_r : Coefficient d'échange radiatif entre la voûte céleste et la paroi isolante de l'armoire de séchage ($W.m^{-2}/K$)
- h_w : Coefficient d'échange de chaleur par effet de vent entre l'air extérieur et la paroi isolante de l'armoire de séchage ($W.m^{-2}/K$)
- S_{a-f} : Surface d'échange par convection entre l'air et le produit (m^2)
- L_v : Chaleur massique de vaporisation de l'eau du produit ($J.kg^{-1}$)
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.67.10^{-8}$ ($W/m^2.K^4$)
- m_a : Débit massique de l'air asséchant (kg/s)
- m_e : Masse évaporée par unité de temps ou vitesse de séchage (kg/s)
- m_f : Masse du produit à sécher (kg)
- T_a : Température de l'air traversant le séchoir (K)
- T_{ab} : Température de l'air ambiant (K)
- T_c : Température équivalente de la voûte céleste (K)
- T_f : Température du produit (K)
- T_{pe} : Température de la paroi externe (K)
- T_{pi} : Température de la paroi interne (K)
- T_f : Température du produit (K)
- ρ_e : Masse volumique de la paroi externe isolante de l'armoire de séchage (kg/m^3)
- ρ_i : Masse volumique de la paroi interne métallique de l'armoire de séchage (kg/m^3)
- ρ_a : Masse volumique de l'air de séchage (kg/m^3)
- ϵ_{pe} : Emissivité de la paroi isolante