

# L'effet de la hauteur du lit de stockage thermique poreux sur l'évolution de la température de séchage

Auteurs : Souheyla KHALDI, Abdel Illah Nabil KORTI  
*Laboratoire Energétique Et Thermique Appliquée (ETAP)*  
*Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen*  
*BP 230- Tlemcen-13000- Algérie*  
*kha.souhila@live.fr; korti72@yahoo.fr*

**Résumé :** La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires. Dans le présent travail, nous avons étudié l'influence de la hauteur du lit de stockage sur le comportement thermique d'un séchoir solaire. Le séchoir comporte un absorbeur inversé type réflecteur et un lit en roche prévu pour le stockage de la chaleur pour assurer le fonctionnement prolongé du séchoir. L'écoulement d'air forcé dans le séchoir est créé naturellement grâce à une cheminée solaire. La modélisation mathématique basée sur des bilans énergétiques du séchoir a été effectuée. Le modèle mathématique non linéaire obtenu a été résolu numériquement en utilisant la méthode itérative de Gauss Seidel à l'aide du langage Matlab. L'évolution des températures de l'air et des divers composants du séchoir sont déterminées pour une journée du mois d'Octobre sous les conditions climatiques de Tlemcen (Algérie).

**Mots clés :** Energie renouvelable, séchoir solaire, lit de stockage thermique, milieux poreux, cheminée solaire

## 1. Introduction

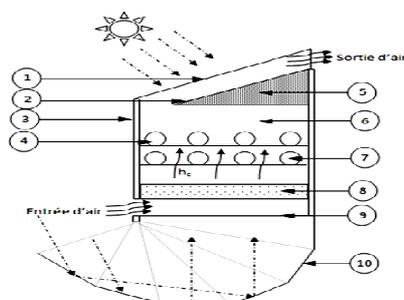
Les produits agricoles ont été séchés par le soleil et le vent à l'air libre pour des milliers d'années. Les inconvénients liés à ce mode de séchage sont: le sur-séchage, séchage insuffisant, la décoloration par les rayonnements UV et la contamination par la poussière, les corps étrangers, les insectes et micro-organismes [1].

Plusieurs types des séchoirs à cabinet ont été développés pour dépasser les problèmes de séchage solaire. Toutefois, le séchage au soleil est couramment utilisé dans de nombreux pays tropicaux et subtropicaux [2].

Le séchage industriel offre une bonne qualité de séchage tandis que son coût élevé limite son utilisation. Le séchage à l'air libre souffre des raisons de qualité bien qu'il dispose d'un avantage de coût. Considérant que, le séchage de nombreux produits agricoles (céréales, légumes et aliments) est effectué à une température constante, modérée et continue. Donc il est nécessaire d'utiliser des dispositifs de stockage thermique intégrés dans le séchoir pour assurer un séchage continu durant les heures non ensoleillées [3].

Une unité de stockage thermique intégrée avec le chauffage solaire de l'air peut être rechargée pendant la journée et ensuite utilisée (déchargé) pendant le soir pour fournir l'air chaud au séchoir. [4]

## 2. Description et principe de fonctionnement du système de séchage



- 1 : Vitrage (v) ;
- 2 : Absorbeur II (p2) ;
- 3 : Isolation ;
- 4 : Claie de séchage 2 (c2) ;
- 5 : Matériaux de stockage(s)
- 6 : Chambre (ch) ;
- 7 : Claie de séchage 1 (c1) ;
- 8 : Lit de stockage (b) ;
- 9 : Absorbeur I (p1) ;
- 10 : Réflecteur (miroirs)

Figure 1: Schéma descriptif du séchoir solaire à absorbeur inversé avec un lit de stockage poreux.

La figure 1 représente le schéma de principe d'un séchoir solaire avec absorbeur inversé muni d'un lit thermique et d'un matériau de stockage destiné aux séchages des produits agricoles. La simulation présentée dans ce travail, est réalisée avec un nouveau concept de chauffage solaire. L'utilisation d'un lit thermique pour le stockage est prévue dans la construction pour le fonctionnement continu du séchoir.

Une plaque plane absorbante inclinée assure l'écoulement naturel de l'air dans le système. Un autre stockage thermique est collé sur cette plaque pour assurer la continuité de l'écoulement du flux d'air pendant la nuit (les heures où il y'aura plus de soleil). La plaque absorbante horizontale I est orientée vers le bas. Le réflecteur, sous forme d'un polygone de cinq segments plats de tailles identiques, reflète le rayonnement solaire vers l'absorbeur I. L'installation de séchage est placée au-dessus de la plaque absorbante I à une distance de 0,04 m. Cet espace est nécessaire pour l'aspiration de l'air ambiant. Un lit thermique composé de graviers est placé avant les deux claies de séchage pour le stockage de l'énergie thermique. Une cheminée solaire inclinée de 34.47° est placée au sommet du séchoir pour assurer l'extraction forcée de l'air. Ce cheminé est sous forme d'un capteur solaire composée d'un vitrage et d'une plaque absorbante II. Un matériau de stockage thermique en granite est collé sous l'absorbeur II.

L'absorbeur II absorbe le rayonnement solaire transmis par le vitrage. Une partie de cette chaleur est cédée par convection vers le flux d'air II, créant ainsi une différence de température entre l'entrée et la sortie du cheminé donc une circulation forcée de l'air. L'énergie thermique stockée dans le matériau de stockage est utilisée pendant les heures non ensoleillées pour maintenir un débit d'air plus ou moins constant durant le processus de séchage. L'absorbeur I absorbe le rayonnement solaire réfléchi par les miroirs du réflecteur. Une partie de cette chaleur est transférée par convection au flux d'air I et par rayonnement au lit thermique. L'air chaud s'écoule dans le lit thermique et réchauffe les cailloux du lit thermique provoquant la baisse de sa température. L'air s'écoule vers le produit à sécher placé dans des claies de séchage. Pendant les heures ensoleillées, le lit thermique assure un débit d'air à température modérée pour le séchage des récoltes. Durant les périodes non ensoleillées, le lit thermique contribue au réchauffement de l'air circulant dans le séchoir.

### 3. Modélisation mathématique

#### 3.1. Bilan énergétique sur le flux d'air-I

$$A_{p1} h_{c,p1-fl} (T_{p1} - T_{fl}) = A_b h_{c,fl-b} (T_{fl} - T_b) \quad (1)$$

#### 3.2. Bilan énergétique sur le lit thermique

##### 3.2.1. Phase solide (cailloux) :

$$A_b \rho_b C_{pb} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} = h_v (T_f - T_b) A_b + h_{r,p1b} (T_{p1} - T_b) A_{p1} + \sum U_{c2,i} A_{s,c2,i} (T_{c2} - T_a) \quad (2)$$

##### 3.2.2. Phase fluide (air)

$$\dot{m}_a C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} = h_v (T_b - T_f) A_b \quad (3)$$

#### 3.3. Bilan énergétique sur les claies de séchage

##### 3.3.1. Pour la 1ere claie de séchage

$$\dot{m}_a C_{pf} (T_{f2} - T_f) M_{c1} C_{pc1} + h_{c,c1c2} (T_{c1} - T_{c2}) A_c + h_{c,fc1} (T_f - T_{c1}) + \sum U_{c1,i} A_{s,c1,i} (T_{c1} - T_a) \quad (4)$$

##### 3.3.2. Pour la 2eme claie de séchage

$$h_{c,c1c2} = M_{c2} C_{pc} \frac{\partial T_{c2}}{\partial t} + h_{c,c2ch} (T_{c2} - T_{ch}) A_c \quad (5)$$

## 4. Résultats et discussions

### 4.1. Evolution horaire de la température des différents composants du séchoir

La résolution du système d'équations a été effectuée numériquement par la méthode itérative de Gauss Seidel avec le langage Matlab sur les différents composants du séchoir solaire.

Nous commençons par présenter le comportement thermique du séchoir pour le mois d'Octobre dans les conditions climatiques de Tlemcen.

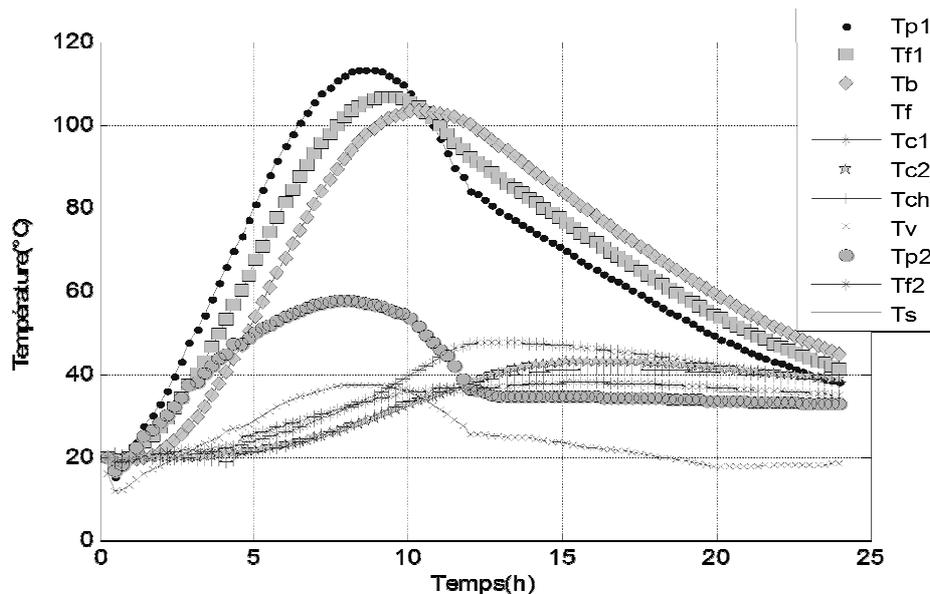


Figure 2 : Evolution horaire de la température des différents composants du séchoir.

- Remarque: le '0' représentent l'heure entre 6 et 7 heure matin.

La figure 2 montre l'évolution des températures horaires des différents composants du séchoir : du flux d'air I et II, des plaques absorbantes I et II, du lit de stockage, du matériau de stockage et du produit à sécher dans les deux claies. Nous remarquons l'augmentation de la température des différents composants pendant la matinée avec une baisse durant l'après-midi. Ceci est dû à l'augmentation du flux solaire incident et de la température ambiante durant la matinée et de leur diminution pendant l'après-midi. Pendant les heures d'ensoleillement, les plaques absorbantes I et II se réchauffent par l'absorption du rayonnement solaire.

La température de la plaque-I ( $T_{p1}$ ) est plus importante que la température de la plaque-II ( $T_{p2}$ ). La chaleur reçue par l'absorbeur I est totalement transmise vers le flux d'air I, sans oublier les pertes vers l'arrière. Par contre, l'absorbeur II est collé au matériau de stockage qui absorbe et stocke une partie de la chaleur reçue. Cela conduit à une diminution de la température  $T_{p2}$  par rapport à la température  $T_{p1}$ . Après les heures d'ensoleillement, nous observons que la température  $T_{p1}$  diminue nettement plus rapidement que  $T_{p2}$  qui se stabilise au voisinage de 33°C. Cela est expliqué par la présence du matériau de stockage qui sert à libérer la chaleur emmagasinée pendant les heures non ensoleillées.

### 4.2. L'évolution de la température horaire de la claie I et la claie II de séchage ( $T_{c1}$ et $T_{c2}$ )

La figure 3 montre l'évolution de la température horaire de  $T_{c1}$  et  $T_{c2}$ . Pendant les heures ensoleillées, la température du produit dans les deux claies I et II connaît une augmentation. Cependant, la température dans la claie-I ( $T_{c1}$ ) est presque toujours supérieure à la température dans la claie-II ( $T_{c2}$ ). Cette différence est due au fait que le flux d'air venant du lit thermique et qui est responsable en premier lieu à l'augmentation de la température du produit à sécher, passe tout d'abord dans la claie I puis dans la claie II. Pendant les heures non ensoleillées,  $T_{c1}$  est toujours supérieure à  $T_{c2}$  mais sa vitesse de diminution est plus importante.

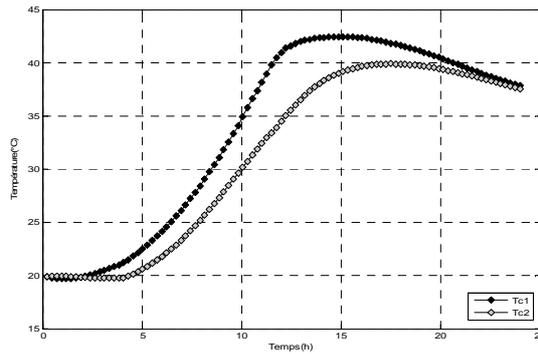


Figure 3 : L'évolution de la température horaire de  $T_{c1}$  et  $T_{c2}$ .

D'autre part, nous savons que la claie I est proche de l'absorbant I et la claie II est proche de l'absorbant II, alors il y a une influence indirecte des plaques absorbantes sur la température des claies. Cela explique la différence dans la température maximale des deux claies (car  $T_{p1}$  est plus importante que  $T_{p2}$  pendant les heures ensoleillées) et explique aussi la convergence des deux températures vers une même valeur à la fin du processus de séchage (car  $T_{p1}$  diminue rapidement par rapport à  $T_{p2}$  durant les heures non ensoleillées).

#### 4.3. L'effet de la hauteur de lit de stockage thermique sur la température du produit à sécher

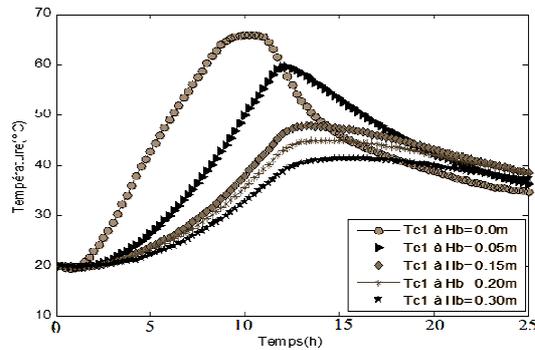


Figure 4 : L'effet de la hauteur de lit thermique sur la température du produit dans la claie I.

Le lit thermique joue un rôle très important dans le séchoir solaire. L'idée consistait au début à baisser la température de l'air de séchage avant d'arriver au produit pour éviter sa détérioration. Le lit absorbe la chaleur durant la journée pour la transmettre pendant la nuit. Sa dimension influe directement sur le comportement de la température de l'air de séchage. La figure 4 représente l'effet de la hauteur du lit de stockage thermique sur la température du produit agricole. Nous remarquons sur la figure 4 que  $T_{c1}$  est maximale ( $66^{\circ}\text{C}$ ) pour une hauteur nulle pendant les heures ensoleillées. En dehors de ces heures, la température diminue rapidement vers une température de  $35^{\circ}\text{C}$ . Pour un lit thermique d'une hauteur de  $0,05\text{ m}$  (couche mince), la température maximale de  $T_{c1}$  se réduit à  $60^{\circ}\text{C}$  pendant les heures d'ensoleillement. Une faible hauteur du lit thermique fournit un faible effet de stockage thermique et  $T_{c1}$  diminue moins rapidement en dehors des heures ensoleillées jusqu'à une valeur de  $36^{\circ}\text{C}$  environ. Une valeur plus importante de  $H_b$  (entre  $0,15\text{ m}$  et  $0,20\text{ m}$ ) favorise un meilleur stockage thermique et un faible pic de la variation de  $T_{c1}$  et donc un meilleur séchage. Un lit thermique avec une hauteur de  $0,15\text{ m}$  donne des conditions optimales pour le séchage des oignons (durant le mois d'Octobre). Plus la hauteur augmente, plus la température  $T_{c1}$  devient stable dans les heures non ensoleillées. Dépassant une certaine hauteur, il y a risque de produire un effet contraire et le lit n'assure plus les températures désirées. Donc, ce séchoir peut être utilisé pour le séchage de plusieurs types de récoltes. Pour chaque type de récolte, nous fixons la hauteur de lit convenable.

## Conclusion

Le séchoir est étudié dans les conditions climatiques de Tlemcen. Le mois d'octobre est choisi pour ses innombrables caractéristiques : ciel clair, températures ambiantes élevées et des puissances de rayonnement solaire importantes.

Une augmentation du flux solaire implique une augmentation de la température des différents composants du séchoir durant les heures ensoleillées. Sa diminution provoque une diminution des températures. Cela est visible dans l'évolution horaire de la température des composants du séchoir.

La présence d'un matériau de stockage permet d'assurer des températures de fonctionnement plus au moins stable, surtout, durant les heures non ensoleillées. L'utilisation de ce dernier provoque une diminution de la température de l'air de séchage durant les heures ensoleillées et protège la récolte de la détérioration.

Le séchage du produit dans les claies est assuré durant les heures non ensoleillées grâce au lit thermique qui fournit de l'air chaud. La variation de la hauteur de lit influe directement sur la température des récoltes. Plus la hauteur augmente, plus la température de la claie I de séchage devient stable dans les heures non ensoleillées. Dépassant une certaine hauteur, il y a risque d'avoir un effet contraire et le lit n'assure plus les températures désirées.

## Nomenclature

A Section,  $m^2$   
 $C_p$  Chaleur spécifique, à pression constante,  $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$   
 $H$  Hauteur, m  
 $h_c$  Coefficient de transfert par convection,  $W\ m^{-2}\ K^{-1}$   
 $h_r$  Coefficient de transfert par rayonnement,  $W\ m^{-2}\ K^{-1}$   
 $h_v$  Coefficient de transfert volumétrique,  $J\ m^{-3}\ s^{-1}\ K^{-1}$   
 $m_a$  Débit massique,  $kg\ s^{-1}$   
 $M$  Masse de récolte, kg  
 $T$  Température, K  
 $\Delta T$  Différence en température, K  
 $t$  Temps, s  
 $U$  Coefficient de perte de chaleur globale des côtés du séchoir,  $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ .  
 $U_{p1}$  Coefficient de perte de chaleur globale de bas de l'absorbeur-I,  $W\ m^{-2}\ K^{-1}$   
 $x$  longueurs de coordonner dans le sens d'écoulement, m

$\varepsilon$  émissivité  
 $\rho$  densité,  $kg\ m^{-3}$

## Subscripts

a air ambiant  
b lit thermique  
c produit à séché  
 $c_1, c_2$  produit dans les claies-I and II  
 $c_1c_2$  produit dans la claie-I vers claie-II  
 $c_2ch$  claie-II vers chambre  
ch chambre  
f air dans lit thermique  
 $f_1$  flux-I  
 $f_2$  flux-II  
v vitre  
i nombre de murs du séchoir  
 $p_1$  absorbeur-I  
 $p_1b$  absorbeur-I vers lit thermique  
s matériau de stockage

## Références

- [1] Esper, A. and W. Mühlbauer, Solar drying-an effective means of food preservation, *Renewable Energy*, 15(1-4): p. 95-100.  
[2] Jain, D. and G.N. Tiwari, Thermal aspects of open sun drying of various crops. *Energy*, 28(1): p. 37-54. 2003  
[3] Close DJ. , Solar air heaters for low and moderate temperature application, *Solar Energy*,7(3):114–7. 1963  
[4] Ekechukwu, O.V. and B. Norton, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6): p. 615-655, 1999.