

Modélisation et expérimentation du fonctionnement d'un séchoir solaire convectif pour plantes aromatiques

Naji. ABDENOURI^a, Mohamed. KOUHILA^b

(^a) LP2M2E Faculté des Sciences et Techniques, B.P549, Marrakech, Maroc

(^b) Laboratoire d'Énergie Solaire, École Normale Supérieure, B.P 2400, Marrakech, Maroc

Résumé: Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de la cinétique de séchage convectif de la menthe verte dans un séchoir partiellement solaire. Un modèle mathématique simulant le fonctionnement du système de séchage est élaboré. Ensuite, le modèle numérique est validé en confrontant les résultats de la simulation avec ceux de l'expérience.

Mots clés :

menthe, séchage solaire, expérimentation, modélisation.

1. INTRODUCTION

La menthe verte, produite en grande quantité dans la région de Marrakech, peut être valorisée par le séchage solaire qui est un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments.

L'objectif visé est l'étude expérimentale et numérique de la cinétique de séchage de la menthe verte dont le Maroc est un grand producteur. Cette plante est séchée en couches minces dans des conditions aérothermiques réelles à l'aide d'un séchoir polyvalent partiellement solaire. Les essais expérimentaux consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, débit, fraction d'air recyclé) sur le temps de séchage de la menthe verte.

2. FONCTIONNEMENT DU SÉCHOIR

Le système de séchage présenté sur la figure 1 est un séchoir indirect modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire. Il s'agit d'un séchoir solaire avec un recyclage partiel d'air. L'air frais est préalablement chauffé dans l'insolateur solaire. Il est ensuite collecté à la sortie de ce dernier par une canalisation de 15 cm de diamètre. Le ventilateur centrifuge aspire l'air chaud de l'insolateur et le propulse à travers le conduit d'aspiration aéraulique pour atteindre enfin l'entrée de l'armoire de séchage. Avant de traverser le chariot comportant dix claies, l'air est chauffé par des résistances électriques qui fournissent en cas de besoin un appoint en énergie permettant d'assurer une température de consigne réglable à l'entrée de la chambre de séchage. A la sortie de l'enceinte de séchage, l'air usé est soit évacué vers l'extérieur, soit recyclé à travers le conduit aéraulique [1].

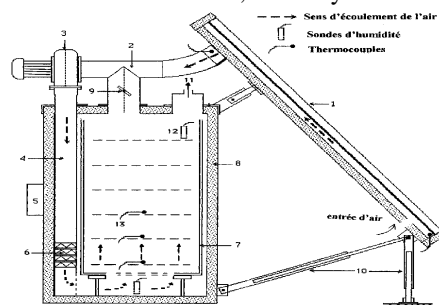


Figure 1 : Schéma de principe du séchoir

3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La masse du produit à sécher est fixée à 30 g par claie. La température de séchage est réglée à l'aide du thermostat. Le débit d'air asséchant est fixé à l'aide d'un vélocimètre muni d'un tube de Pitot. La fraction d'air recyclé est réglée à l'aide du volet de recyclage. Le produit de chaque claie est pesé toutes les 10 min jusqu'à

l'atteinte de la teneur en eau finale. Au début, l'intervalle de temps entre deux pesées successives est de quelques minutes ; cet intervalle est augmenté au fur et à mesure que la variation de masse diminue.

3.1. Préparation du produit

Les feuilles de menthe sont soigneusement préparées et étalées sur les claies 1, 3 et 6 du séchoir. La masse du produit à sécher est de 30 g par claie pour tous les scénarios expérimentaux envisagés.

Pour la menthe verte, on a déterminé dans un travail antérieur [1] le seuil de température maximale admissible ($T_{max}=51^{\circ}C$), la teneur en eau finale (14 %) et les isothermes de sorption afin d'éviter sa dégradation et permettre son stockage après séchage.

Le rayonnement diffus et global reçus sur le plan de l'insolateur sont mesurés en kW/m^2 , durant la journée de l'expérience [2].

3.2. Mesures de températures et d'humidité de l'air

On sélectionne trois sections de l'armoire de séchage (claies 1,3 et 6) au niveau desquelles on installe trois prises de température (thermocouples en miniature) pour suivre l'évolution de la température du produit sur chaque claie. A l'aide de thermocouples de type K de diamètre 1mm et de précision $\pm 0,5^{\circ}C$, les températures à l'entrée et à la sortie de l'insolateur, à l'entrée et à la sortie du séchoir sont mesurées.

Les plantes médicinales sont très fragiles et ne tolèrent pas les températures de séchage élevées. Ceci, impose à sécher la menthe à température de consigne contrôlable à l'entrée du séchoir en évitant les moments de la journée où la température de sortie de l'insolateur est supérieure à la température de consigne.

L'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie de l'insolateur, à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage, et de l'air asséchant au niveau de chaque claie, sont mesurées par des sondes à affichage numérique de marque Humicolor et de précision $\pm 2\%$.

3.3. Détermination de la masse sèche du produit

Afin de déterminer la masse sèche du produit M_s , la menthe séchée dans le séchoir solaire est ensuite placée dans une étuve réglée à $110^{\circ}C$ durant sept heures. A l'aide d'une balance de précision $\pm 0,001$ g, le produit est pesé toutes les heures jusqu'à atteindre sa déshydratation totale.

4. MODÉLISATION DU SÉCHOIR

4.1. Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleur et de masse couplés dont le séchoir est le siège, on suppose que :

- les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés ;
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés ;
- la température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit ;
- les parois du séchoir ont des températures uniformes.

4.2. Equations de fonctionnement

On suppose que l'armoire de séchage est découpée en dix tranches fictives, dans la direction z de l'écoulement, définies par le volume délimité par deux claies et les parois de l'armoire de séchage (figure 2). Les équations exprimant les bilans thermiques au niveau de chaque tranche sont :

- bilan au niveau de la paroi isolante extérieure :

$$\frac{m_{pe} C_{pe} \partial T_{pe}}{2 \Delta S_p \partial t} = h_d(T_{pi} - T_{pe}) - h_{ce}(T_{pe} - T_{ab}) - h_r(T_{pe} - T_c) \quad (1)$$

- bilan au niveau de la paroi isolante intérieure :

$$\frac{m_{pi} C_{pi} \partial T_{pi}}{2 \Delta S_p \partial t} = h_{ci}(T_a - T_{pi}) - h_d(T_{pi} - T_{pe}) \quad (2)$$

- bilan au niveau de l'air caloporteur :

$$D_a C_{pa} \Delta z \frac{\partial T_a}{\partial z} = h_{cp} S_{pr}(T_a - T_{pr}) + h_{ci} \Delta S_p (T_a - T_{pi}) \quad (3)$$

- bilan au niveau du produit à sécher :

$$m_{pr} C_{pr} \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} S_{pr} (T_a - T_{pr}) - L_v (T_{pr}) m^* \quad (4)$$

où $L_v = 4186,8 (597 - 0,56 T_{pr})$ est la chaleur latente de vaporisation (J.kg⁻¹) et $m^* = -M_{sd} X / dt$ est la masse d'eau évaporée par unité de temps, $(-dX/dt)$ étant la vitesse de séchage exprimée en (kg eau. (kg MS)-1s). Celle-ci a été déterminée expérimentalement à l'aide d'une soufflerie de laboratoire [3,4]. Son expression est donnée par :

$$\left(\frac{(-dX/dt)}{(-dX/dt)_{in}} \right) = -0,026 + 0,464 X^* - 0,323 X^{*2} + 3,022 X^{*3} - 4,242 X^{*4} + 2,020 X^{*5} \quad (5)$$

Avec $X^* = (X - X_{eq}) / (X_{in} - X_{eq})$ la teneur en eau réduite et $(-dX/dt)_{in}$ est la vitesse initiale de séchage. Elle a été calculée à l'aide de la corrélation de Fornell et Bimbenet [5] :

$$\left(-\frac{dX}{dt} \right)_{in} = \alpha V^\beta (T_\infty - T_h) \quad (6)$$

Avec $\alpha = 7,03 \cdot 10^{-4}$ et $\beta = 2,47$

4.3. Détermination des coefficients d'échange par conduction

- à travers les parois de l'armoire de séchage :

$$h_d = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (7)$$

avec:

λ_{pi} : conductivité de la paroi interne

λ_{pp} : conductivité de l'isolant entre les parois

λ_{pe} : conductivité de la paroi externe

e_{pi} : épaisseur de la paroi interne du séchoir

e_{pp} : épaisseur de l'isolant entre les parois

e_{pe} : épaisseur de la paroi externe du séchoir

4.4. Détermination des coefficients d'échange par rayonnement

- entre la paroi externe de l'armoire de séchage et la voûte céleste :

$$h_r = \sigma \epsilon_p (T_{pe} + T_c)(T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (8)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ_p est l'émissivité de la paroi du séchoir et T_c est la température de la voûte céleste donnée par :

$$T_c = 0,0552 T_{ab}^{1,5} \quad (9)$$

4.5. Détermination des coefficients d'échange par convection

- entre l'air ambiant et la paroi externe du séchoir [1]:

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86 V_v \quad (10)$$

- entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant :

$$h_{ci} = \frac{Nu \lambda_a}{\Delta z} \quad (11)$$

- entre le produit et l'air asséchant :

$$h_{cp} = \frac{Nu \lambda_a}{D_{pr}} \quad (12)$$

Avec D_{pr} le diamètre moyen du produit, Nu le nombre de Nusselt égal à $0,37 Re^{0,6}$, Re le nombre de Reynolds égal à $\rho_a V_a D_{pr} / \mu_a$ et V_a la vitesse de l'air au niveau du produit [6].

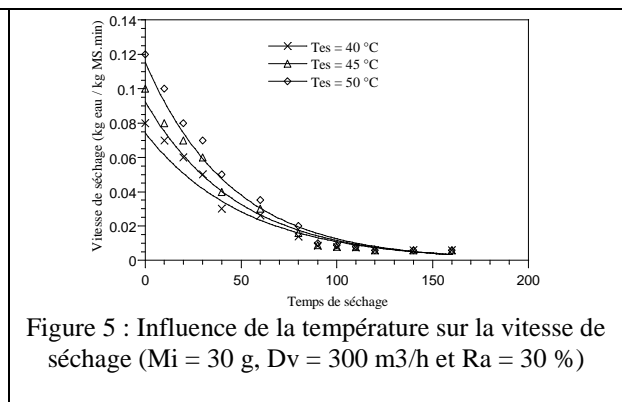
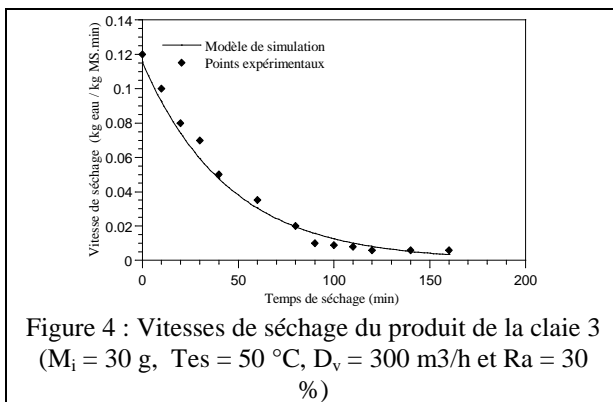
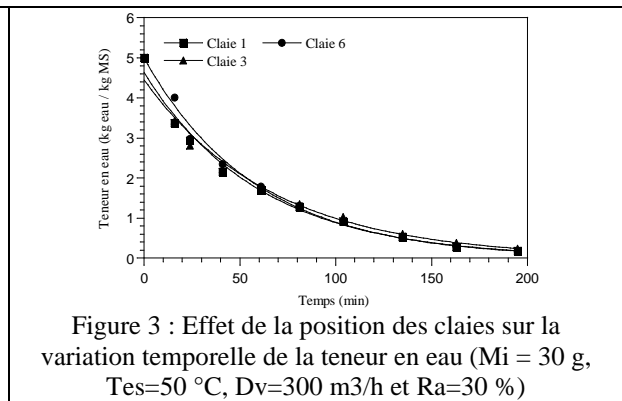
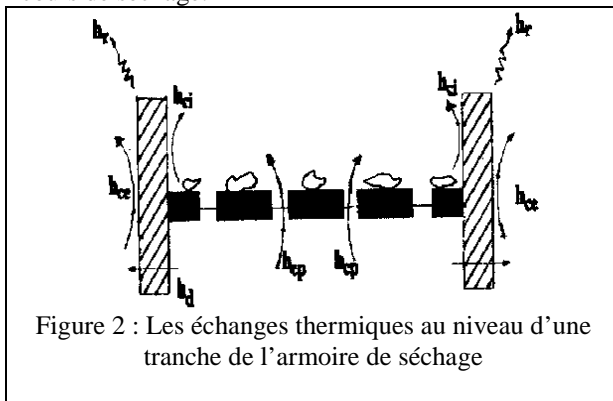
4.6. Méthode de résolution

On a choisi la méthode de résolution numérique aux différences finies implicite, qui n'impose ni restriction sur les pas de temps Δt ni sur le pas d'espace Δz . Dans cette méthode, toutes les inconnues sont exprimées au temps $t + \Delta t$. Il en résulte un système de quatre équations à quatre inconnues qui est résolu par la méthode de Diabolo-Sablir [1].

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1. Détermination des courbes de séchage

On entend par courbe de séchage soit les courbes représentant les variations de la teneur en eau X en fonction du temps (figure 3), soit celles donnant la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps (figure 4). La courbe $X = f(t)$ est celle qui contient le plus d'information. Pour l'obtenir, l'évolution de M_h a été suivie en cours de séchage.



La figure 5 représente la variation de la vitesse de séchage la menthe en fonction du temps pour différentes températures de consigne. Cette figure montre que la vitesse de séchage augmente d'autant plus que la température de séchage augmente. On constate que les conditions de l'air asséchant ont une influence déterminante sur l'allure de celle-ci. On en tire deux constatations principales :

- la non-existence des phases 0 et I, c'est-à-dire l'absence de la phase de mise en température du produit et de la phase de séchage à allure constante. Ce résultat est conforme à la littérature. En effet Bimbenet et al. [7] ont signalé que la période de mise en température disparaît pratiquement lorsque le produit est en feuilles et que la période à allure constante n'est pas observée dans de nombreux cas lorsqu'il s'agit de produits végétaux.
- la présence unique de la phase II qui est la phase de séchage à allure décroissante (phase de ralentissement).

5.2. Influence de la disposition du produit

Sur la figure 3, on constate que la teneur X suit une allure décroissante en fonction du temps de séchage et la durée de séchage varie peu d'une claie à l'autre, ce qui signifie que le séchage se fait d'une façon presque uniforme.

5.3. Influence de l'humidité initiale du produit

Il est évident que, plus la teneur en eau initiale du produit est élevée, plus la durée de séchage est longue. Toutefois, elle n'est pas proportionnelle à la quantité d'eau évaporée.

6. CONCLUSION

On a étudié dans ce travail la cinétique de séchage de la menthe verte d'un point de vue expérimentale et numérique. Le modèle élaboré permet de simuler le séchage de la menthe dans des conditions aérothermiques diverses. Quant aux facteurs qui influencent la cinétique de séchage, on peut affirmer que la durée de séchage du produit dépend de plusieurs facteurs : la masse initiale du produit, sa teneur en eau initiale, la température de séchage, le débit d'air asséchant et la fraction d'air recyclé. Pour une masse initiale du produit à sécher, les différents scénarios expérimentaux envisagés, en jouant sur les paramètres aérothermiques, ont permis de mettre en évidence leur l'influence sur la durée de séchage.

Les résultats expérimentaux restent en concordance avec les calculs théoriques et permettent d'aborder dans des conditions réelles et optimales le séchage solaire convectif de la menthe verte produite en grande quantité dans la région de Marrakech.

Nomenclature :

C_{pi}	capacité calorifique massique de la paroi interne ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	R_a	fraction d'air recyclé %
C_{pe}	capacité calorifique massique de la paroi externe ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	S_{pr}	surface d'échange air-produit (m^2)
C_{pa}	capacité calorifique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	T_a	température de l'air (K)
C_{pr}	capacité calorifique du produit ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	T_{ab}	température de l'air ambiant (K)
D_v	débit volumique de l'air ($m^3.s^{-1}$)	T_{es}	température de séchage (K)
D_a	débit massique de l'air ($kg.s^{-1}$)	T_h	température humide (K)
M_i	masse initiale du produit (kg)	T_{pe}	température de la paroi externe (K)
M_h	masse humide du produit (kg)	T_{pi}	température de la paroi interne de l'armoire de séchage (K)
M_S	masse sèche du produit (kg)	T_{pr}	température du produit (K)
MS	matière sèche	T_{∞}	température sèche (K)
m_{pe}	masse d'une section i de la paroi externe (kg)	V	vitesse de l'air dans la soufflerie ($m.s^{-1}$)
m_{pi}	masse d'une section i de la paroi interne (kg)	V_v	vitesse du vent ($m.s^{-1}$)
m_{pr}	masse du produit par tranche (kg)	X_{eq}	teneur en eau d'équilibre $kg\ eau.(kg\ MS)^{-1}$
X_{in}	teneur en eau initiale $kg\ eau.(kg\ MS)^{-1}$		

RÉFÉRENCES

- [1] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene. (2001) Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte, *Entropie*, n° 233, pp. 20-31..
- [2] M. Kouhila, A. Belghit, M. Kaoua, M. Daguene, Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire, *Revue des Energies Renouvelables*, numéro spécial, pp. 1-6, 1998.
- [3] M. Kouhila, Etude expérimentale et théorique de la cinétique de séchage par convection forcée des plantes aromatiques, Thèse de Doctorat d'État, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech, mars 2001.
- [4] A. Belghit, M. Kouhila, B.-C. Boutaleb, Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, *Energy Conversion and Management*, vol. 41, n° 12, pp. 1303-1321, 2000.
- [5] A. Fornell, J.-J. Bimbenet., A. Almin Experimental study and modelization for air drying vegetable products, *Lebensml- Wissenschaft und- Technologie* vol. 14, pp. 96-100, 1980.
- [6] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B.-C. Boutaleb, S. Benet, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, *Revue Générale de Thermique*, vol. 36, pp. 837-850, 1997.
- [7] J.-J. Bimbenet, J.-D. Daudin, E. Wolff, Air drying kinetics of biological particles, *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium*, Kyoto, 1984.
- [8] M. Daguene, *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*, Publication de l'UNESCO, Paris, 1985.