



**HAL**  
open science

## Modélisation unidirectionnelle de séchage solaire convectif de certaines plantes aromatiques et médicinales

Nourhène Boudhrioua-Mihoubi, Daoued Mihoubi, Nabil Kechaou

### ► To cite this version:

Nourhène Boudhrioua-Mihoubi, Daoued Mihoubi, Nabil Kechaou. Modélisation unidirectionnelle de séchage solaire convectif de certaines plantes aromatiques et médicinales. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00164636

**HAL Id: hal-00164636**

**<https://hal.science/hal-00164636>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODELISATION UNIDIRECTIONNELLE DE SECHAGE SOLAIRE CONVECTIF DE CERTAINES PLANTES AROMATIQUES ET MÉDICINALES

Nourhène BOUDHRIOUA - MIHOUBI <sup>(1)</sup>, Daoued MIHOUBI <sup>(2)</sup>, Nabil KECHAOU <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Groupe Génie des Procédés Agroalimentaires de l'Unité de Recherche en Mécanique des Fluides Appliquée et Modélisation, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, BP 'W' 3038, Tunisie, <sup>(2)</sup> Centre Nationale des Recherches et des Technologies de l'Energie Laboratoire d'Energétique et Procédés Thermiques, B.P. 95 Hammam-Lif, 2050  
*E-mails: Nourhene.Boudhrioua@fss.rnu.tn, nabil.kechaou@enis.rnu.tn*

**Résumé :** Les plantes aromatiques et médicinales sont de plus en plus utilisés pour plusieurs applications en pharmacie, médecine et agroalimentaires. Ces plantes sont généralement des produits à hautes humidités ou à humidité intermédiaires d'où l'intérêt de leur stabilisation par séchage. Le séchage solaire convectif peut être utilisé comme moyen de conservation des ces produits en abaissant leurs activité et teneur en eau. La modélisation des transferts dans le produit pendant le séchage est nécessaire pour maîtriser la qualité du produit fini. Le présent travail constitue une étude préliminaire de modélisation du séchage des feuilles d'olivier. Le modèle décrit les transferts de matière et de chaleur dans les feuilles en tenant compte de la déformation du produit. Les distributions spatio-temporelles de la teneur en eau et de la température moyenne du produit sont obtenues.

**Mots clés :** séchage solaire convectif, plantes aromatiques et médicinales, modélisation

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Matière première

Le produit utilisé dans cette étude est les feuilles d'olivier. Les feuilles ont été cueillies du champ de l'Institut de l'Olivier de Sfax (sud Tunisie). La teneur en eau des feuilles fraîches et séchées a été déterminée par déshydratation pendant 24 heures à 105°C. Les pesées des échantillons sont effectuées par une balance analytique (METTLER - TOLEDO) de précision  $\pm 0,001$  g. Les teneurs en eau initiale ( $w_0$ ) et d'équilibre ( $w_{eq}$ ) sont exprimées en kg d'eau par kg de matière sèche (kg eau/kg MS). L'épaisseur initiale, la masse volumiques et le retrait et les teneurs en eau à l'équilibre des feuilles d'olivier ont été mesurées [1]. Les autres caractéristiques physiques du produit sont prises de la littérature pour des produits biologiques les plus proches possibles des feuilles d'olivier.

### 1.2. Modélisation des transferts

Le modèle mathématique proposé décrit les transferts de matière et de chaleur dans le produit au cours du séchage. Le produit est considéré comme un système binaire contenant deux constituants : l'eau et la matière sèche. Les distributions initiales de la teneur en eau du produit et de la température sont uniformes. L'évaporation de l'eau du produit s'effectue à travers la surface. L'épaisseur du produit est faible, les transferts d'eau et de chaleur sont considérés unidirectionnels.

### 1.2.1. Bilans massiques

Les équations de bilans de matière dans le solide et le liquide en mouvement s'écrivent :

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \bar{u}_s) = 0 \quad (1)$$

et

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \bar{u}_l) = 0 \quad (2)$$

On a par ailleurs :

$$\rho \bar{u} = \rho_s \bar{u}_s + \rho_l \bar{u}_l \quad (3)$$

et

$$\rho = \rho_s + \rho_l \quad (4)$$

Le flux de transport de matière est habituellement décomposé en un terme de diffusion et un terme de convection,

$$\rho_k \bar{u}_k = \bar{J}_{D,k} + \rho_k \bar{u} \quad \text{avec } k=l \quad (5)$$

En introduisant la teneur en eau,  $w$ , définie comme étant le rapport de deux masses volumiques apparentes:

$$w = \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (6)$$

et en faisant l'hypothèse que l'écoulement liquide peut être décrit comme un phénomène diffusif (pas d'effet de gravité) de la phase liquide par rapport à la phase solide, on peut exprimer le flux liquide en utilisant des équations (Eq. 3), (Eq. 5) et (Eq. 6) par:

$$\rho_l (\bar{u}_l - \bar{u}_s) = -\frac{\rho}{1+w} \overrightarrow{D \text{grad}(w)} \quad (7)$$

En combinant cette dernière relation avec les deux équations de bilan de matière (Eq. 1) et (Eq. 2), le transport liquide peut s'écrire sous la forme :

$$\rho_s \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \bar{u}_s \overrightarrow{\text{grad}(w)} \right) = \text{div} \left( \frac{\rho}{1+w} \overrightarrow{D \text{grad}(w)} \right) \quad (8)$$

Cette équation montre que le terme convectif est directement lié au mouvement du solide et illustre ainsi l'effet du rétrécissement de matériau lié au transport de matière.

### 1.2.2. Bilan d'énergie

En utilisant l'hypothèse que l'évaporation se produit seulement au niveau de la surface, le transfert interne de chaleur obéit à la loi de Fourier avec une conductivité apparente variable en fonction de la teneur en eau.

$$\rho C_{Ph} \frac{dT}{dt} = \text{div}(\bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}(T)}) \quad (9)$$

### 1.2.3. Expressions des conditions initiales et aux limites

Initialement, les champs de température et d'humidité sont uniformes :

$$\begin{aligned} w &= \bar{w}_0 \\ T &= T_0 \end{aligned} \quad (10)$$

- pour les surfaces adiabatiques ou imperméables et les plans de symétrie les gradients de température et de matière sont nuls

$$\overrightarrow{\text{grad}}(w) = 0 \quad (11)$$

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = 0 \quad (12)$$

- à la surface de l'échantillon exposée au flux de chaleur, le flux de matière s'exprime :

$$\dot{m} = -\rho_s D(\overrightarrow{\text{grad}}(w)) \quad (13)$$

Sachant que le produit peut échanger de la chaleur avec l'extérieur par convection et/ou par radiation, l'équation de conservation de l'énergie peut s'écrire :

$$\left( h(T_a - T_{\text{surf}}) + Q_{\text{parois}} \right) \cdot \vec{n} = \left( \dot{m} L_v(T_{\text{surf}}) \right) \cdot \vec{n} + \lambda_h \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (14)$$

La vitesse d'évaporation à la surface,  $\dot{m}$ , est donnée par la relation :

$$\dot{m} = \beta_m (P_{v,\text{surf}} - P_{v,a}) \quad (15)$$

#### 1. 2. 4. Déplacement du solide

La masse volumique de la phase solide peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\rho_s = \rho_s^0 \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_l^0} \right), \quad (16)$$

où  $\rho_s^0$  et  $\rho_l^0$  représentent les masses volumiques intrinsèques des phases solide et liquide et sont supposées constantes. Les particules solides et l'eau sont supposées incompressibles. Il vient alors :

$$\frac{d\rho_s}{d\rho_l} = -\frac{\rho_s^0}{\rho_l^0} = \chi = c^{te} \quad (17)$$

En utilisant les deux équations de bilan de matière, et introduisant cette dernière relation, on peut écrire après quelques manipulations mathématiques :

$$\frac{d\rho_s}{d\rho_l} \left( \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \vec{u}_s \overrightarrow{\text{grad}} \rho_l \right) + \rho_s \text{div}(\vec{u}_s) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \text{div}(\vec{j}) + \rho_l \text{div}(\vec{u}_s) + \vec{u}_s \overrightarrow{\text{grad}}(\rho_l) = 0 \quad (19)$$

Donc :

$$\frac{d\rho_s}{d\rho_1} \operatorname{div}(\vec{J}) + \left( \frac{d\rho_s}{d\rho_1} \rho_1 + \rho_s \right) \operatorname{div}(\vec{u}_s) = 0 \quad (20)$$

Et finalement :

$$\frac{d\rho_s}{d\rho_1} \operatorname{div} \left( -\frac{\rho_s^0 D}{1 + \chi w} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(w) \right) = -\rho_s^0 \operatorname{div}(\vec{u}_s) \quad (21)$$

$$\frac{d\rho_s}{d\rho_1} \operatorname{div} \left( \frac{D}{1 + \chi w} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(w) \right) = \operatorname{div}(\vec{u}_s)$$

Les équations précédentes sont ensuite écrites dans le cas du transfert unidirectionnel (x) en écrivant la conservation de la masse solide comme suit :  $dm_s = \rho_s^0 d\xi = \rho_s dx$  [2] et [3].

### 1. 2. 5. Résolution numérique

La méthode utilisée est celle des différences finies implicite. L'espace et le temps sont discrétisés successivement en  $\Delta\xi$  et  $\Delta t$  intervalles, ce qui donne une grille de rectangles de côtés  $\Delta\xi$  et  $\Delta t$ . La résolution numérique du système d'équations algébriques est effectuée sur Matlab® à l'aide de la méthode itérative de balayage ligne par ligne.

## 2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 2.1. Teneur en eau

Les feuilles d'olivier fraîches sont des produits à teneurs en eau intermédiaires ( $1,04 < w_0 < 1,27$  kg/kg MS soit  $51 < w_0 < 56$  % base humide). La variabilité des mesures des teneurs en eau moyennes des feuilles d'olivier évaluées sur trois mesures est inférieure à 3%.

### 2.2. Séchage et modélisation des transferts

Les courbes expérimentales de séchage montrent la présence de la phase 2 de séchage uniquement (absence des phases 0 et 1) et l'effet remarquable de la température sur la déshydratation des feuilles. Ces évolutions sont caractéristiques des courbes de séchage des produits biologiques et indiquent que la diffusion est *a priori* le mécanisme prépondérant gouvernant le transfert d'eau dans le produit. Ces cinétiques montrent aussi l'effet remarquable de la température. Plus la température est élevée plus la vitesse de déshydratation est élevée [4].

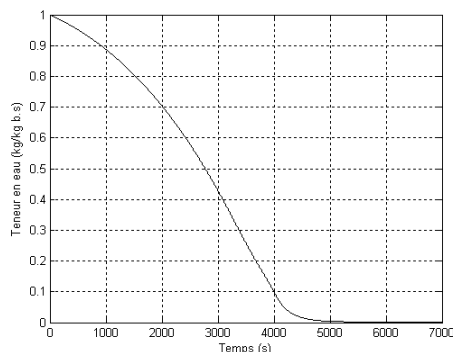


Figure 1. Evolution de la teneur en eau des feuilles d'olivier simulée pour un séchage à 60°C, humidité relative = 29 % et débit d'air = 0,0556 m<sup>3</sup>/s.

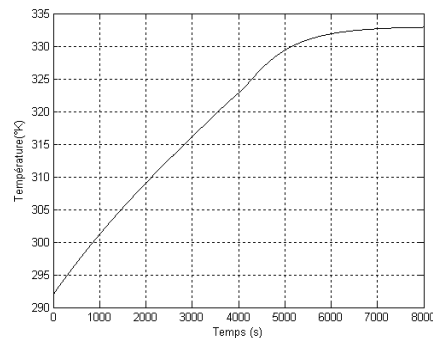


Figure 2. Evolution de la température des feuilles simulée pour un séchage à 60°C, humidité relative = 29 % et débit d'air = 0,0556 m<sup>3</sup>/s.

Les figures 1 et 2 montrent respectivement les variations de la teneur en eau du produit et de la température du produit. La variation de la teneur en eau montre également l'absence des

phases 0 et 1 de séchage. La figure 2 montre que la température moyenne du produit augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur constante qui correspond à celle de l'air asséchant. Les figures 3 et 4 montrent les champs spatio-temporels correspondants à l'évolution de la teneur en eau et de la température moyennes du produit. On observe que la surface supérieure sèche plus vite que l'intérieur du produit. Les teneurs en eau diminuent pour atteindre au bout de 4500 secondes l'équilibre.

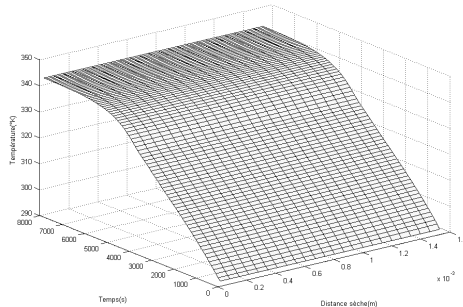


Figure 3. Evolution de la distribution spatio-temporelle de la teneur en eau des feuilles d'olivier simulée pour un séchage à 60°C, humidité relative = 29 % et débit d'air = 0,0556 m<sup>3</sup>/s

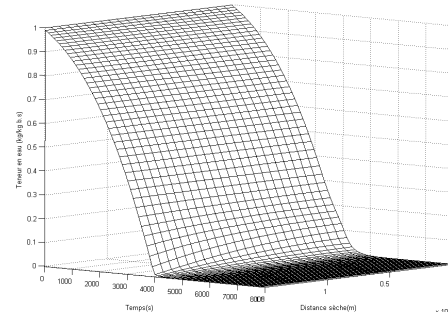


Figure 4. Evolution de la distribution spatio-temporelle de la température des feuilles simulée pour un séchage à 60°C, humidité relative = 29 % et débit d'air = 0,0556 m<sup>3</sup>/s.

## CONCLUSION

Le modèle proposé décrit les transferts d'eau et de chaleur dans les feuilles d'olivier au cours du séchage solaire convectif et confirme l'évolution expérimentale des cinétiques de séchage et l'effet de la température de l'air. Les distributions spatio-temporelles de la teneur en eau et de la température du produit ont été obtenues. Ce modèle doit être validé pour d'autres conditions de séchage et d'autres plantes. Certaines caractéristiques physiques du produit doivent être mesurées pour améliorer la prédiction du modèle.

## Nomenclature

$w$	Teneur en eau à base sèche (kg/kg)
$R$	Constante des gaz (Pa.m <sup>3</sup> /K)
$T$	Température (°C, K)
$\rho$	Masse volumique humide (kg/m <sup>3</sup> )
$\varepsilon$	Facteur de retrait (-)
$k_m$	Coefficient de transfert de masse idéal normalisé (-)

## Références

- [1] N. Boudhrioua, M. Kouhila, N. Kechaou, Sorption isotherms of Tunisian olive leaves: experimental and mathematical investigations. *2<sup>nd</sup> CIGR Section VI International Symposium on FUTURE OF FOOD ENGINEERING, Warsaw, Poland, 26-28 April 2006.*
- [2] N. Kechaou, Séchage de gels fortement déformables : Etude de la diffusion interne de l'eau et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, France – 1989.
- [3] D. Mihoubi, F. Zagrouba, J. Vaxelaire, A. Bellagi & M. Roques, Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: modelling and simulations, *Drying Technology*, 22(1-2), pp 91-109, 2004.
- [4] N. Boudhrioua, N. Bahloul, M. Kouhila, N. Kechaou, Solar drying of four varieties of Tunisian olive leaves: experimental and mathematical investigations. *2<sup>nd</sup> CIGR Section VI International Symposium on FUTURE OF FOOD ENGINEERING, Warsaw, Poland, 26-28 April 2006.*