



## Modélisation des transferts massique et thermique des tomates dans un séchoir tunnel

Auteurs : Sana Ben Mariem<sup>1</sup>, Slah Ben Mabrouk<sup>2</sup>

1 Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, Rue Hédi Karray - BP 17 Rue Hédi Karray, Ariana 2080, Tunisie.

2 Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie – C.R.T.En, Laboratoire des Procédés Thermiques -BP : 95 Hammam-Lif 2050, Tunisie

*benmeriem.sana@gmail.com*  
*salah.benmabrouk@crten.rnrt.tn*

**Mots clés:** Teneur en eau, Séchoir tunnel, Modèle mathématique, Simulation numérique

### Résumé

Dans cette étude, on s'intéresse au développement d'un modèle numérique des transferts couplés de masse et de chaleur dans un séchoir tunnel, permettant de simuler les processus internes de séchage sous différentes conditions. Un système d'équations est décrit par quatre équations à dérivées partielles. Ces équations ont été résolues par la méthode des différences finies utilisant une approche du type volume de contrôle. Un code de calcul en langage FORTRAN est présenté pour la solution numérique du problème.

L'exploitation numérique de ce modèle permet simuler les profils de température et de teneur en eau au sein des tranches de tomates étalées dans un séchoir tunnel de 10 m de longueur, au cours du processus de séchage. Elle permet aussi de suivre le déplacement du front de séchage pour différentes conditions de démarrage.

Les résultats obtenus ont été simulés pour plusieurs conditions de fonctionnement, la température et la vitesse de l'air de séchage varient de 30°C à 70°C et 1 m/s à 5 m/s, respectivement.

### 1. Introduction

Le séchage à basse température d'une couche de produits granulaires est très important dans le domaine des industries agro-alimentaires.

L'air de séchage est constamment contrôlé en vitesse, température et humidité de manière à assurer un séchage rapide et efficace qui n'altère pas les qualités du produit. Ces conduites de séchage sont souvent établies à partir de résultats empiriques. Elles pourront être affinées si on connaît mieux l'évolution simultanée des transferts de chaleur et d'humidité au sein du produit et à l'interface air-produit. Ainsi, l'étude du séchoir tunnel consiste à établir d'une part, une relation entre les caractéristiques de l'air à l'entrée et à la sortie du tunnel, et d'autre part, une équation entre le temps de séchage et les caractéristiques de la couche de produit.

Les problèmes posés par le séchage des milieux granulaires relèvent des transferts instationnaires de chaleur et de masse.

La compréhension de ces mécanismes de transfert sera très utile à l'interprétation des phénomènes propres à la convection naturelle ou forcée. La description des transferts de chaleur et de masse dans les milieux granulaires est la conséquence de l'interaction air-produit. Le comportement de l'air et du produit sera traduit par un modèle mathématique (Masmoudi, 1990).

### 2. Matériels et méthodes

Des tomates sont utilisées pour le séchage dans un séchoir solaire tunnel situé au Laboratoire des Procédés Thermiques du CRTEn à Borj Cedria.

La masse du produit à sécher est de 1200 g par claie. Le séchage a été effectué à 50°C, 60°C et 70°C.



Figure 1 : Photo du dispositif de séchage

## 2.1. Modèle Mathématique

Le système complexe peut être représenté par quatre équations à dérivées partielles (Ben Mabrouk 1999):

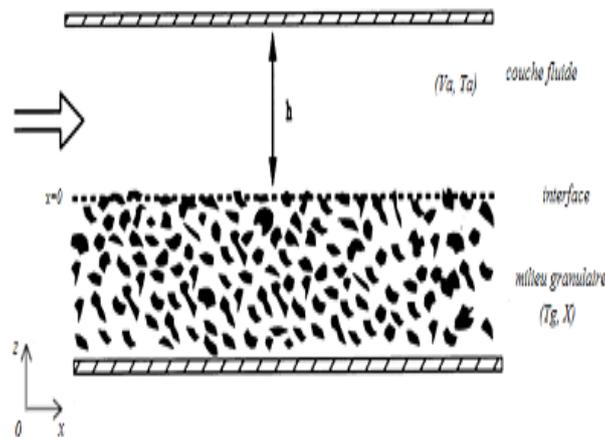


Figure 2 : Schéma d'un séchoir tunnel statique  
Interface fluide-milieu granulaire poreux

L'air de séchage, caractérisé par  $T_a$  et  $V_a$ , traverse la couche du produit qui est à une teneur en eau  $X$  et à une température  $T_g$  (inférieure à  $T_a$ ), pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ . Ainsi, un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit du fait de l'écart thermique et un transfert de matière s'effectue en sens inverse sous l'effet de l'écart de pression de vapeur d'eau entre l'air et la surface du produit. Par conséquent, un taux d'humidité  $\Delta X$  s'évapore vers l'air dont l'humidité relative augmente de  $\Delta Y$  et la température diminue de  $\Delta T_a$  (en fonction de l'augmentation de la température du grain  $\Delta T_g$ ) (Ben Mabrouk, 1999).

### - Conservation de la masse pour l'air

L'accroissement de l'humidité absolue de l'air  $Y$  provient de la perte en eau  $\Delta X$  du produit :

$$\rho_a \left[ \varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + V_a \frac{\partial Y}{\partial x} \right] + (1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial X}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

### - Conservation de l'énergie pour l'air

La variation de l'enthalpie de l'air pendant la traversée de la couche du produit est égale à la somme des puissances échangées par convection et par évaporation au niveau du produit :

$$\rho_a (C_a + Y C_v) \left[ \varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \right] = \xi \alpha (T_g - T_a) - (1 - \varepsilon) \rho_g C_v (T_g - T_a) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2)$$

### - Conservation de l'énergie pour le produit

La variation de l'enthalpie du produit est égale à la somme des puissances échangées par convection avec l'air et de l'énergie utilisée pour vaporiser l'eau du produit :

$$\rho_a(1-\varepsilon)(C_g + XC_w) \frac{\partial T_g}{\partial t} = \xi\alpha(T_a - T_g) + L_v\rho_g(1-\varepsilon) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3)$$

$$L_v = L^0 + (C_v - C_w)T_g \quad (4)$$

### - Équation de cinétique de séchage

A ces équations, il convient d'ajouter l'équation de la cinétique qui représente le bilan de masse pour le produit.

$$\left( -\frac{dX}{dt} \right) = X_{in}F(X_r) \quad (5)$$

$$F(X_r) = A_0 + A_1X_r + A_2X_r^2 + A_3X_r^3 \quad (6)$$

## 2.2. Conditions initiales et aux limites

Ce système, bien que traduisant les lois qui régissent l'écoulement de la chaleur et celui de l'eau dans le corps, ne peut être résolu qu'à la condition de connaître à la fois l'état initial du produit et les conditions aux limites :

- Conditions initiales :

Initialement, le milieu poreux est supposé isotherme et en équilibre hydrostatique. L'état du système est alors décrit par :

$$\left\{ \begin{array}{l} X(x;0) = X_{in} \text{ et } T_a(x;0) = T_a \\ Y(x;0) = Y_{in} \text{ et } T_g(x;0) = T_{am} \end{array} \right\} \quad (7)$$

- Conditions aux limites :

La configuration de la section d'entrée du tunnel nous amène à poser les conditions aux limites suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} X(0;t) = X_0 \text{ et } T_a(0;t) = T_{a0} \\ Y(0;t) = Y_0 \text{ et } T_g(0;t) = T_{g0} \end{array} \right\} \quad (7)$$

## 2.3. Méthode de résolution

Le système d'équations décrit par des équations à dérivées partielles fortement couplées et non linéaires est résolu par la méthode de différences finies utilisant une approche du type volume de contrôle (Patankar 1981). L'avantage de cette méthode est la grande simplicité d'écriture et le faible coût de calcul.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Validation du modèle numérique

Le modèle présenté a été validé au Laboratoire des Procédés Thermiques du CRTEn par des travaux numériques et expérimentaux antérieurs réalisés sur différents produits agricoles (Ben Mabrouk, 1994). Les résultats numériques et expérimentaux des teneurs en eau réduite présentent un accord étroit, ce qui valide le modèle présenté (figure 3).

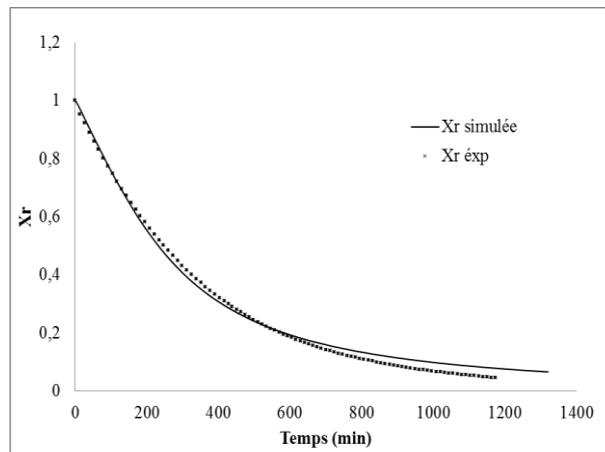


Figure 3 : Évolution des teneurs en eau expérimentale et simulée des échantillons de tomate d'une épaisseur de 1 cm ( $T = 50^\circ\text{C}$ ,  $V = 2\text{m/s}$ )

### 3.2. Résultats de la simulation numérique

L'exploitation numérique de ce modèle permet d'établir les profils des températures, de l'humidité absolue et de la teneur en eau au cours du séchage. Elle permet aussi de suivre le déplacement du front de séchage pour différentes conditions de démarrage.

Les différentes courbes représentent à différents instants une photographie de l'évolution spatiale des températures, de l'humidité absolue et de la teneur en eau au cours du séchage. Toutes les courbes sont toutes sujettes à de fortes perturbations.

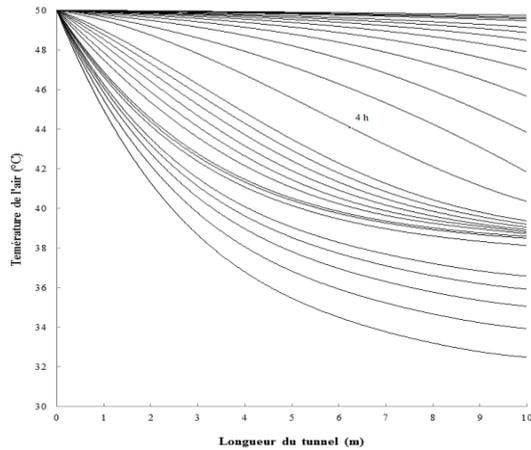


Figure 1 : Evolution de la température de l'air en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage

Conditions de séchage :  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 28^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{eq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

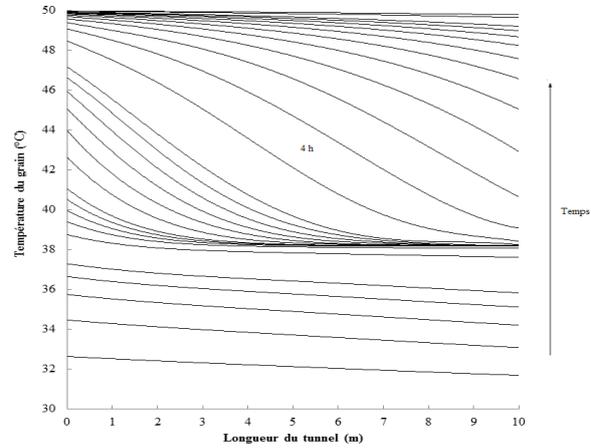


Figure 2 : Evolution de la température du produit en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage

Conditions de séchage :  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 28^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{eq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

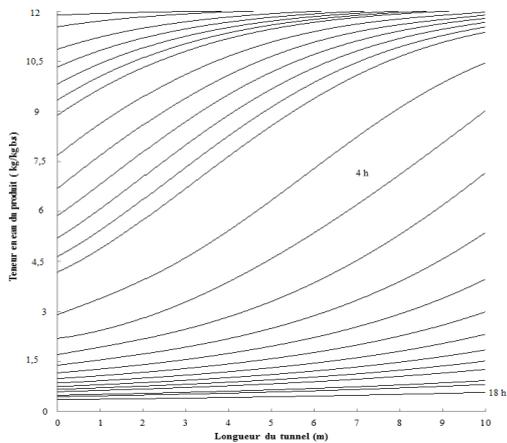


Figure 6 : Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage à  $50^\circ\text{C}$

Conditions de séchage :  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 28^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{eq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

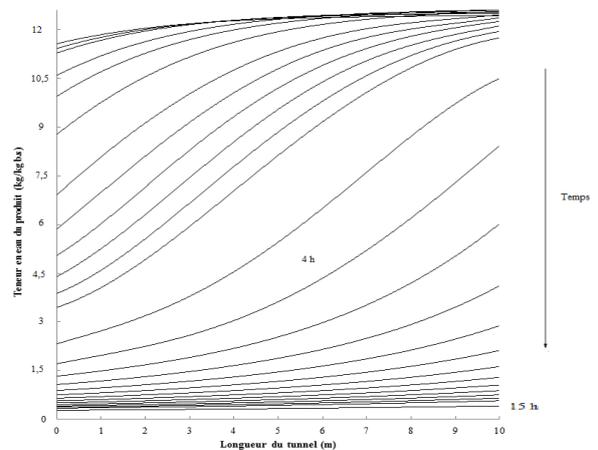


Figure 7 : Evolution de la teneur en eau du produit en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage à  $70^\circ\text{C}$

Conditions de séchage :  $T_a = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 27^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{eq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

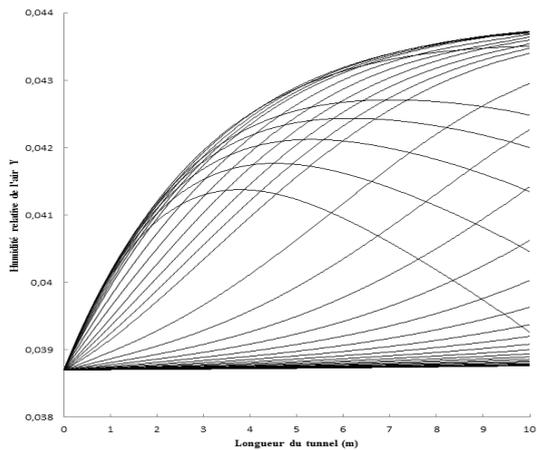


Figure 8 : Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage à 50°C

Conditions de séchage :  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 28^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{éq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

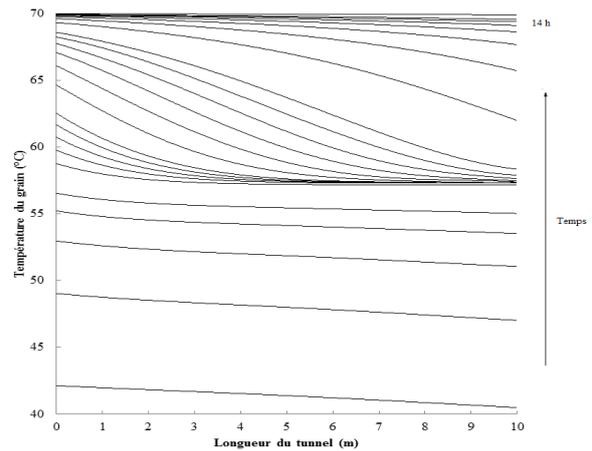


Figure 9 : Evolution de la température du produit en fonction de la longueur du tunnel au cours du séchage à 70°C

Conditions de séchage :  $T_a = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_{am} = 27^\circ\text{C}$ ,  
 $V_a = 2 \text{ m/s}$ ,  $H_r = 5\%$ ,  $X_{in} = 12 \text{ kg/kg. bs}$ ,  
 $X_{\text{éq}} = 0,05 \text{ kg/kg. Bs}$

Le profil montre une évolution de la température vers une limite asymptotique qui est la température de l'air asséchant.

Le séchage se manifeste par le déplacement du front de séchage de l'amont vers l'aval de l'écoulement (figures 4 à 9). Ce front de séchage apparaît nettement après un certain temps de soufflage de = 4 heures. Il est suivi par un accroissement brusque de la température du produit, ce qui montre que la température de séchage est un paramètre important à prendre en considération.

## Conclusion

L'étude théorique et numérique menée dans ce travail a permis d'apprécier la capacité du modèle à décrire les différentes phases de séchage d'un matériau biologique. Au regard de résultats obtenus, on peut affirmer que ce modèle permet de simuler avec succès, l'apparition puis l'évolution des phases de séchage. L'accord entre les résultats de la simulation numérique et ceux obtenus expérimentalement reste parfois peu satisfaisant dans le domaine étudié. Il existe parfois un écart entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

## Références

- S. Ben Mabrouk, A. Belghith, Simulation and design of a tunnel drier, *Renew. Energy* 5 (1) Pages 469–473, 1994.
- S. Ben Mabrouk, Etude des transferts simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux : Modélisation des phénomènes de séchage, Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 240 Pages, 1999.
- W. Masmoudi, Contribution à l'étude fondamentale du séchage des matériaux capillario-poreux : Cinétique de la modélisation macroscopique et du protocole expérimental de validation. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1990.
- S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publication Corporation, New York, 193 Pages, 198.
- O. Plumb, M. Prat, Microscopic model for the study of drying of capillary porous media. *Drying '92*, Pages 397-406, 1992.