

ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DU SECHAGE PAR L'AIR CHAUD DE LA POMME DE TERRE

L.Hassini, K. Smida, S. Azzouz, A. Belghith

Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques, Faculté des Sciences de Tunis,
Département de physique, Le Belvédère 1060, Tunis, Tunisie.

Email : soufien.azzouz@fst.rnu.tn

RESUME

Nous présentons une étude du séchage convectif par l'air chaud de la pomme de terre. L'étude est abordée sous l'angle des transferts couplés de chaleur et de masse à l'échelle du produit. Nous avons utilisé deux approches complémentaires, la première est d'ordre expérimental, basée sur le retrait du produit, l'évolution de sa teneur en eau et de sa température en fonction des grandeurs caractéristiques du séchage. L'unité utilisée est une boucle fermée dont l'écoulement d'air dans la veine d'essais est transversal et homogène par rapport à la surface de la couche du produit à sécher. La seconde est d'ordre numérique, elle consiste à proposer un modèle apte à simuler les profils de température et de teneur en eau au sein du produit au cours du procédé de séchage. Ce modèle est basé sur le principe de la thermodynamique des transformations irréversibles, il tient compte du retrait du produit ainsi que de la dépendance de ces grandeurs thermophysiques de la teneur en eau et de la température.

Mots-clés : Séchage, pomme de terre, modélisation, retrait, évolution de la température et de la teneur en eau.

NOMENCLATURE

D	coefficient de diffusion du produit, $m^2.s^{-1}$	d_m	dimensions de l'échantillon, mm
DH_v	chaleur latente de vaporisation de l'eau, $J.kg^{-1}$	<i>Indices</i>	
C_p	capacité calorifique du produit, $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	a	air
h_t	coefficient de transfert thermique	o	initial
	par convection, $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$	$éq$	équilibre
h_m	coefficient de transfert massique	f	final
	par convection, $m.s^{-1}$	cen	centre
v	vitesse, $m.s^{-1}$	$surf$	surf
T	température, $^{\circ}C$	s	sèche
t	temps, s	<i>Lettres grecques</i>	
M	teneur en eau, $kg.Kg^{-1}MS$	x	facteur de conversion de phase
L	épaisseur du produit, m	r	masse volumique, $kg.m^3$
a_w	activité de l'eau	l	conductivité thermique, $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
H_r	humidité relative	a	diffusivité thermique du produit, $m^2.s^{-1}$
l	longueur caractéristique du produit, m	d	coefficient de thermomigration, $^{\circ}C^{-1}$
z	variable d'espace, m		

1. INTRODUCTION

La majeure partie des produits agro-alimentaires industrialisés ou conservés pour une longue durée, passent nécessairement par une opération de séchage. Au cours du procédé, les transferts couplés de chaleur et de masse qui s'effectuent au sein du produit, provoquent des changements physiques, chimiques et biologiques. Ces changements sont fortement influencés par la teneur en eau et par la température interne durant le procédé. Pour cette raison, la connaissance de l'évolution de ces paramètres est nécessaire afin de contrôler la qualité du produit fini et de faciliter sa conservation.

Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement au séchage de la pomme de terre. Ce produit séché présente un intérêt commercial certain, sa transformation industrielle est développée essentiellement autour de la fabrication des produits frits, déshydratés et stérilisés.

Au cours des dernières années, le processus de séchage de la pomme de terre a été abordé par plusieurs chercheurs, parmi lesquels nous citons, Diamante (1991), Wang (1995), LiYe (1996), Rovado (1998),

Youssef-Ali (2001), Iyota (2001) et Yang (2001). La majorité des travaux utilisent un procédé de séchage convectif caractérisé par un écoulement d'air parallèle à la surface du produit à sécher.

Le procédé de séchage utilisé dans notre laboratoire est de type convectif par l'air chaud. Le dispositif expérimental est une boucle fermée dont l'écoulement d'air dans la veine d'essais est transversal et homogène par rapport à la surface du produit. L'avantage de ce type d'écoulement est d'offrir des conditions optimales de contact air-produit et un coefficient de transfert de chaleur important.

Des expériences de cinétique de séchage, effectuées sur un échantillon, sont utilisées pour valider un modèle mathématique simplifié de transferts couplés de chaleur et de masse. Le modèle est basé sur les équations de conservation de la matière et de l'énergie en tenant compte du retrait du produit ainsi que de la dépendance de ces grandeurs thermophysiques de la teneur en eau et de la température. Ce processus de modélisation est utilisé actuellement par plusieurs auteurs, parmi lesquels nous citons, (Suarez et Viollaz, 1991) dans le but d'examiner l'influence de la teneur en eau initiale et de l'épaisseur de l'échantillon de pomme de terre sur la cinétique de séchage, (Wang, 1995b et LiYe, 1996) afin de prédire les profils de température et de teneur en eau au sein d'un échantillon de pomme de terre au cours du séchage à écoulement d'air parallèle à la surface du produit et (Ratti et Mujumdar, 1997) pour étudier le séchage solaire d'une couche monoparticulaire de carotte.

La première partie de ce travail sera consacrée à la détermination du retrait du produit et à l'évaluation du gradient de température au sein d'un échantillon au cours du procédé. La seconde partie consiste, à simuler les profils de température et de teneur en eau au sein du produit et à comparer les évolutions de la teneur en eau moyenne et de la température au centre de l'échantillon pour différents conditions de l'écoulement avec celles obtenues par l'expérience.

2. ANALYSE EXPERIMENTALE

Les séries de mesure pour déterminer le retrait, l'évolution de la teneur en eau et la température du produit, ont été effectuées grâce à une boucle de séchage par convection d'air chaud (figure 1). Nous avons utilisé des échantillons de pomme de terre, rectangulaires (10mmx20mmx45mm), blanchis dans l'eau chaude et posés de façon régulière sur une grille perforée. Les conditions de l'air de séchage sont maintenues constantes tout au long de chaque essai.

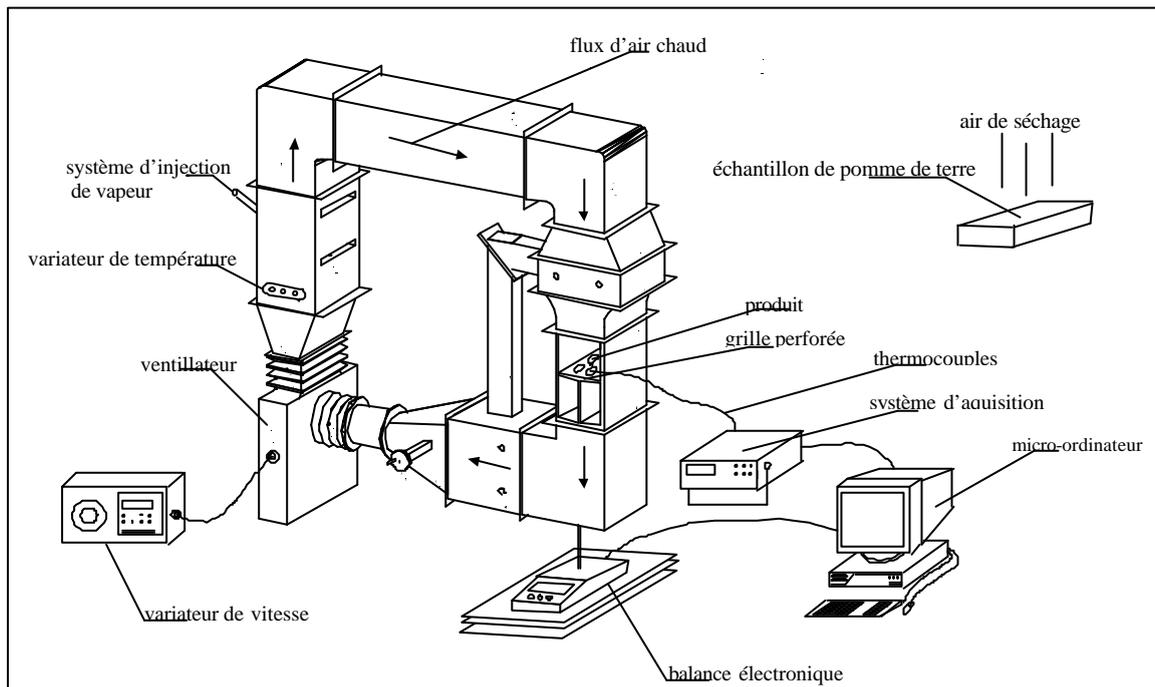


Figure 1 : Boucle de séchage LETTM

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps, est effectuée sur l'ensemble produit-plateau support de façon continue à l'aide d'une balance de haute précision connectée à un système d'acquisition et de traitement des données. Afin de déterminer sa masse sèche, nous avons placé le produit dans une étuve réglée à 95°C jusqu'à ce qu'il atteigne une déshydratation maximale.

Pour évaluer le gradient thermique au sein de l'échantillon, nous avons utilisé des thermocouples placés en différents points de l'échantillon.

Pour étudier le retrait du produit, nous avons déterminé le pourcentage de diminution en épaisseur, en largeur et en longueur de l'échantillon au cours du séchage, à des intervalles de temps bien définis.

2.1. Retrait du produit

A partir des mesures de retrait du produit au cours du séchage, nous avons trouvé que, pour chaque direction, le pourcentage de diminution varie linéairement avec la teneur en eau et que le retrait est plus marqué suivant l'épaisseur de l'échantillon. De plus, l'augmentation de la température sèche de l'air accentue le retrait.

D'après nos mesures, les trois dimensions de l'échantillon au cours du procédé peuvent être estimées, par une fonction linéaire de la teneur en eau:

$$d_m = A + BM \quad (1)$$

où A et B sont les constantes estimées pour une température donnée de l'air du séchage.

2.2. Profils de température

Afin de connaître, le sens privilégié du transfert de chaleur dans l'échantillon par rapport à l'écoulement d'air, nous avons placé 4 thermocouples dans un plan horizontal d'un échantillon comme l'indique la figure 2.

La figure 3 représente l'évolution de la température à 5mm au-dessous de la surface d'évaporation (les thermocouples sont localisés aux différents points 1, 2, 3 et 4, figure 2). On remarque que la température est relativement uniforme en tout point d'un même plan et que le transfert de chaleur s'effectue dans le sens de l'écoulement.

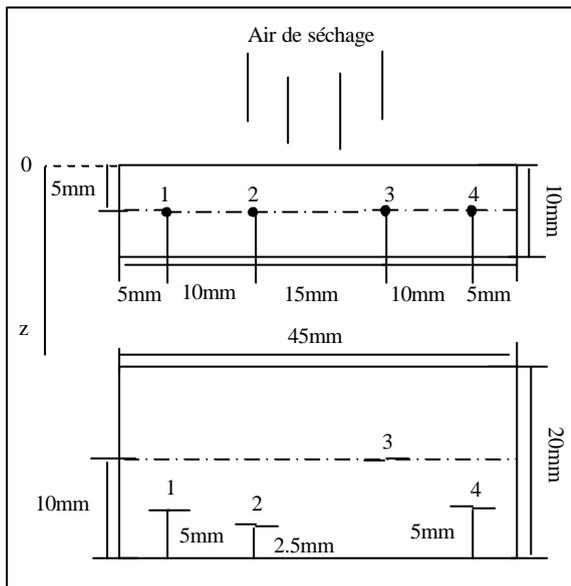
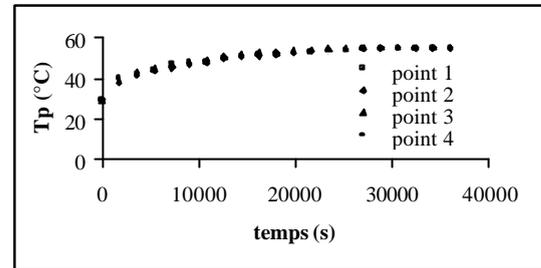
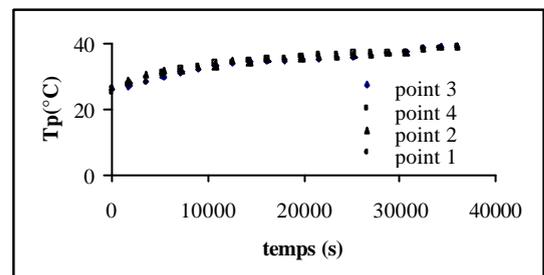


Figure 2: Emplacement des thermocouples dans l'échantillon dans un plan horizontal à 5mm au-dessous de la surface d'évaporation



(a)



(b)

Figure 3 : Profils de température dans un plan horizontal à 5mm au-dessous de la surface de l'échantillon
(a) : ($T_a = 55^\circ\text{C}$, $V_a = 1\text{m/s}$, $H_r = 15\%$)
(b) : ($T_a = 40^\circ\text{C}$, $V_a = 1\text{m/s}$, $H_r = 25\%$)

Sur les figures 4, 5, 6 et 7, nous représentons l'évolution de la température à la surface et au centre de l'échantillon au cours du séchage. On constate qu'il existe, au départ, une différence de température entre la surface et le centre de l'échantillon, cette différence diminue au cours du temps de séchage.

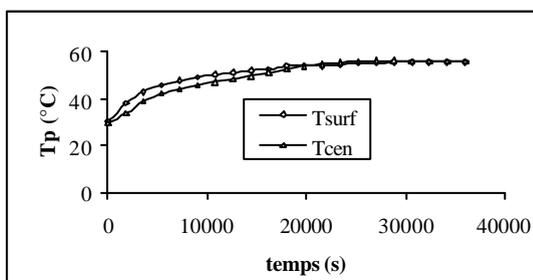


Figure 4 : Evolution de la température du produit
($T_a = 55^\circ\text{C}$, $V_a = 1\text{m/s}$, $H_r = 15\%$)

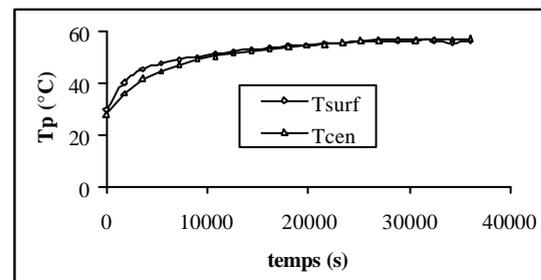


Figure 5 : Evolution de la température du produit
($T_a = 70^\circ\text{C}$, $V_a = 1,5\text{ m/s}$, $H_r = 5\%$)

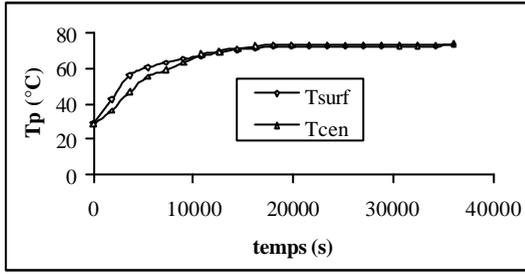


Figure 6 : Evolution de la température du produit
(Ta = 70 °C, Va = 1m/s, Hr = 5%)

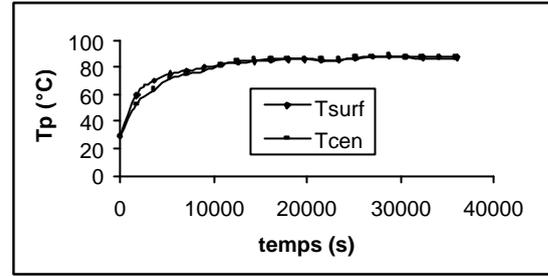


Figure 7 : Evolution de la température du produit
(Ta = 85 °C, Va = 1m/s)

3. MODELISATION NUMERIQUE

3.1. Présentation du modèle

L'étude de l'évolution de la teneur en eau et de la température au cours d'un procédé de séchage dépend des transferts de chaleur et de masse au sein du produit. Les mécanismes de ces transferts sont complexes en raison de leur couplage. Plusieurs modèles ont été élaborés pour décrire ces mécanismes. Parmi ceux-ci, nous retenons le modèle de Luikov [10] :

L'application des équations de conservations, de la matière et de l'énergie à un volume élémentaire conduit au système d'équations différentielles aux dérivées partielles suivant :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left(\mathbf{a} \text{ grad} T \right) + \mathbf{x} \frac{\mathbf{r}_s \mathbf{D}H_v}{\mathbf{r} C_p} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \left(D \text{ grad} M + \mathbf{d} D \text{ grad} T \right) \quad (3)$$

La formulation du présent modèle est basée sur les hypothèses suivantes :

- Les transferts de chaleur et de masse s'effectuent principalement sur la surface soumise au courant d'air.
- Le flux de vapeur à l'intérieur de l'échantillon n'est pas négligeable au cours du séchage.
- L'influence du gradient thermique sur la migration interne de l'eau est négligée.
- La température et la teneur en eau au sein du produit sont homogènes au début du séchage.
- Le plateau support de l'échantillon est parfaitement isolant.

Compte tenu de ces hypothèses, on aboutit au système différentiel suivant :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{a} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\mathbf{r}_s \mathbf{D}H_v}{\mathbf{r} C_p} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

A $t = 0$ et pour $0 \leq z \leq L_o$ ($L_o = L(t=0)$)

$$M = M_o \text{ et } T = T_o \quad (6)$$

Pour $z = 0$

$$h_t (T_a - T) = \mathbf{D}H_v \mathbf{r}_s D \frac{\partial M}{\partial z} - I \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

$$h_m (M - M_{\acute{e}q}) = D \frac{\partial M}{\partial z} \text{ où } M_{\acute{e}q} = f(a_w, T_a) \quad (8)$$

Pour $z = L(t)$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ et } \frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

3.2. Propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques et de transports du modèle sont issus de la littérature et ils sont données par les relations suivantes :

Teneur en eau d'équilibre : La teneur en eau d'équilibre de la pomme de terre est proposée par (Mc Laughlin et Magee, 1998). Elle dépend de la teneur en eau à base sèche du produit et aussi la température de l'air de séchage, la relation est de la forme:

$$M_{\text{éq}} = \frac{\left(10.169 e^{0.0108T_a} 0.724 e^{0.0025T_a} 0.18054 e^{-0.022T_a} aw \right)}{\left(1 - 0.724 e^{0.0025T_a} aw \right) \left(1 - 0.724 e^{0.0025T_a} aw + 10.169 e^{0.0108T_a} aw 0.724 e^{0.0025T_a} aw \right)} \quad (10)$$

Coefficient de diffusion : Lors de la modélisation du séchage de la pomme de terre, certains auteurs ne tiennent pas compte de la dépendance du coefficient de diffusion de la teneur en eau du produit. Ils utilisent, un coefficient de diffusion de type Arrhenius qui dépend seulement de la température où l'énergie d'activation est un paramètre à ajuster : Wang (1995b), LiYe (1996), Rovado (1998). Pour tenir compte de la dépendance de ce coefficient de la teneur en eau et de la température du produit, nous avons adopté la forme suivante due à Kiranoudis (1995).

$$D(M,T) = a_0 \exp\left(-\frac{a_1}{M}\right) \exp\left(-\frac{a_2}{T}\right) \quad (11)$$

où a_0 , a_1 et a_2 sont des constantes qui dépendent de la variété du produit, des conditions climatiques et des techniques de culture.

Diffusivité thermique : La diffusivité thermique choisie est une fonction à la fois de la teneur en eau et de la température du produit, l'équation proposée est donnée par (Martens, 1980).

$$a = [5.7363M + 0.0288(T+273)] \times 10^{-8} \quad (12)$$

Chaleur latente de vaporisation : La chaleur latente de vaporisation du produit est une fonction de la température interne et de l'air de séchage (Treybal, 1980).

$$DH_v(T) = 2495.46 + 1881(T_a - 273) - 4180(T - 273) \quad (13)$$

Chaleur spécifique : En (1993), Wang et Brennan ont déterminé expérimentalement la chaleur spécifique de la pomme de terre, la corrélation proposée dépend de la teneur en eau et de la température de l'air de séchage.

$$C_p = 4.18410^3 (0.406 + 0.00146 T_a + 0.203M - 0.0249M^2) \quad (14)$$

Masse volumique du produit : Une corrélation expérimentale (Wang, 1995a), représente la masse volumique de la pomme de terre par l'équation suivante :

$$r = [A + B \exp(CM^2)] \times 10^3 \quad (15)$$

où A et B sont les constantes estimées pour une température donnée de l'air de séchage.

Masse volumique du produit sèche :

$$r_s = \frac{r}{1+M} \quad (16)$$

Retrait du produit : La loi de variation, de l'épaisseur, de la largeur et de la longueur de l'échantillon, en fonction de la teneur en eau, a été obtenue expérimentalement [Equation (1)].

Les coefficients de transferts : Les coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection utilisés dans le modèle sont déterminés à l'aide des paramètres consignés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection.

Paramètre	Formule	Référence
Nombre de Nusselt	$Nu = 0.37 Re^{0.6}$	McAdams (1961)
Nombre de Reynolds	$Re = \frac{r_a v_a l}{g_a}$	Nombre de Reynolds relatif à l'échantillon
Conductivité thermique de l'air	$I_a = 410^{-5} (T_a + 273.18) + 0.0246$	Perry (1984), cité dans [18]
Nombre de Sherwood	$Sh = 2 + 1.8 Re^{0.5} Sc^{0.33}$	Charreau et Cavallé (1991)
Viscosité dynamique de l'air	$g_a = 1.6610^{-5} \left(\frac{T_a + 273.18}{273.18} \right)^{0.756}$	Perry (1984), cité dans [18]
Coefficient de diffusion de l'humidité dans l'air	$Dv = 2.22610^{-5} \frac{1}{P_{tot}} \left(\frac{T_a + 273}{273} \right)^{1.81}$	Shirmer, cité dans [5]

3.3. Résolution numérique

En vue de rendre la résolution numérique des équations précédentes (4) et (5) plus simple, nous avons introduit les variables adimensionnelles suivants :

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{z}{L_o} & q &= \frac{t}{t_f} & U &= \frac{T-T_o}{T_a-T_o} & Y &= \frac{M-M_{\acute{e}q}}{M_o-M_{\acute{e}q}} & D' &= \frac{D}{a_o} \\
 F_o &= \frac{t_f a_o}{L_o^2} & F'_o &= \frac{a t_f}{L_o^2} & Bit_t &= \frac{L_o h_t}{I} & Bit_m &= \frac{h_m L_o}{a_o} \\
 C_1 &= \frac{r_s DHv}{r Cp} \frac{M_o-M_{\acute{e}q}}{T_a-T_o} & C_2 &= \frac{DHv r_s a_o}{I} \frac{M_o-M_{\acute{e}q}}{T_a-T_o}
 \end{aligned}$$

En variables adimensionnelles les équations (4) et (5) s'écrivent sous la forme suivante :

$$\frac{\partial U}{\partial q} = F'_o \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right) + C_1 \frac{\partial Y}{\partial q} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial q} = F_o \frac{\partial}{\partial Z} \left(D' \frac{\partial Y}{\partial Z} \right) \quad (18)$$

Les conditions initiales et aux limites (6), (7), (8) et (9) deviennent :

Pour $q=0$ et $0 \leq Z \leq Z_o$ ($Z_o = \frac{L(t=0)}{L_o} = 1$)

$$Y=1 \text{ et } U=0 \quad (19)$$

Pour $Z=0$

$$Bit_m Y = D' \frac{\partial Y}{\partial Z} \quad (20)$$

$$Bit_t (1-U) = C_2 D' \frac{\partial Y}{\partial Z} - \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (21)$$

Pour $Z = \frac{L(t)}{L_o}$

$$\frac{\partial Y}{\partial Z} = 0 \text{ et } \frac{\partial U}{\partial Z} = 0 \quad (22)$$

Les équations adimensionnelles (17) et (18) obtenues sont discrétisées en utilisant un schéma aux différences finies. Le système obtenu est résolu par l'algorithme de Thomas, le maillage choisi est uniforme et le pas d'espace est ajusté pour chaque itération de temps.

3.4. Résultats et confrontation

Les figures 8, 9, 10 et 11, présentent les évolutions des températures et des teneurs en eau moyennes expérimentales et simulées. D'après ces courbes, on peut constater qu'il y a une concordance qualitativement satisfaisante entre l'expérience et la simulation. Un léger écart est cependant observé au milieu de l'opération. Cet écart peut être attribué notamment à l'incertitude de mesures lors de l'expérimentation et au choix des paramètres de transport du modèle qui sont pris à partir des travaux antérieurs et en particulier le coefficient de diffusion et l'isotherme de sorption qui jouent un rôle majeur lors de la modélisation.

La figure 12, montre les profils de température à l'intérieur d'un échantillon pour différents temps du séchage. L'analyse de ces profils montre l'existence d'un gradient thermique entre la surface d'évaporation et la surface en contact avec la grille. Ce gradient thermique devient de plus en plus faible quand le temps du séchage augmente. D'après l'expérience, nous avons relevé l'existence d'un gradient de température entre la surface et le centre de l'échantillon.

La figure 13, présente l'évolution des profils de la teneur en eau dans l'échantillon. On remarque que la teneur en eau locale diminue de la surface d'évaporation vers la surface en contact avec la grille, ce qui favorise la migration de l'eau vers la surface exposée à l'air de séchage. En augmentant le temps de séchage, le gradient de la teneur en eau au sein du produit diminue et la migration de l'eau vers la surface devient de plus en plus lente, ceci est dû d'une part au rétrécissement du produit et d'autre part à la formation des couches sèches dans l'édifice solide au cours de l'opération.

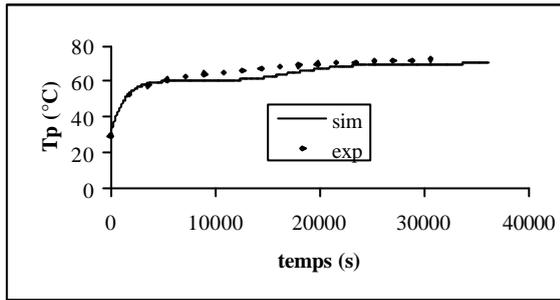


Figure 8 : Evolution de la température au centre du produit ($T_a = 70^\circ\text{C}$, $V_a = 1,5\text{m/s}$ et $H_r = 5\%$)

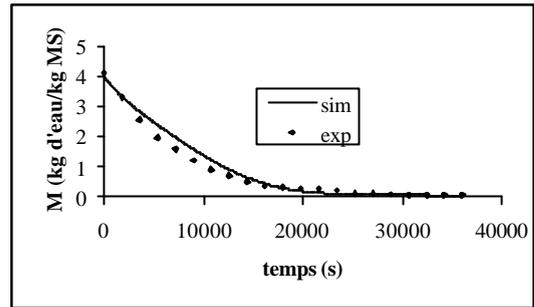


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau du produit ($T_a = 70^\circ\text{C}$, $V_a = 1,5\text{m/s}$ et $H_r = 5\%$)

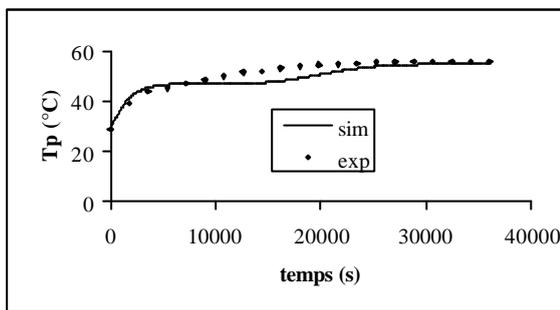


Figure 10 : Evolution de la température au centre du produit ($T_a = 55^\circ\text{C}$, $V_a = 1,5\text{m/s}$ et $H_r = 15\%$)

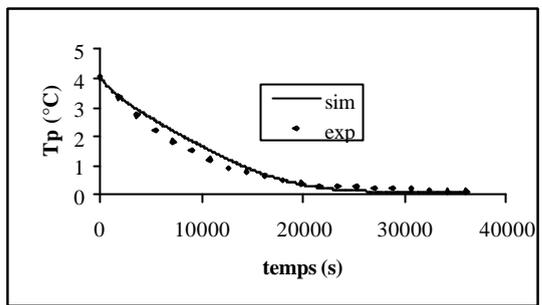


Figure 11 : Evolution de la teneur en eau du produit ($T_a = 55^\circ\text{C}$, $V_a = 1,5\text{ m/s}$ et $H_r = 5\%$)

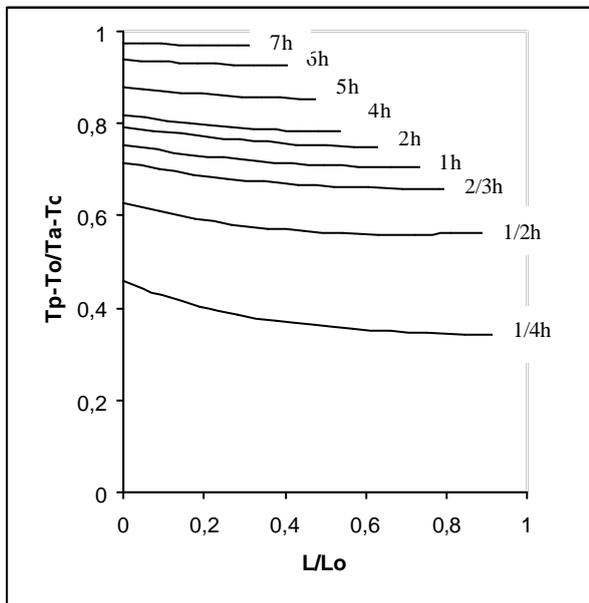


Figure 12 : Profils de la température dans le produit à différents temps du séchage ($T_a = 70^\circ\text{C}$, $V_a = 1\text{m/s}$ et $H_r = 5\%$)

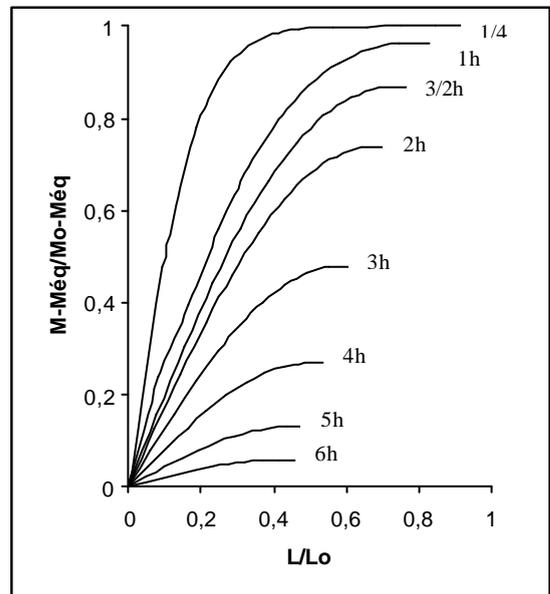


Figure 13: Profils de la teneur en eau dans le produit à différents temps du séchage ($T_a = 70^\circ\text{C}$, $V_a = 1\text{m/s}$ et $H_r = 5\%$)

4. CONCLUSION

Les résultats expérimentaux obtenus peuvent contribuer à l'optimisation du fonctionnement d'une unité de séchage et réduire son coût énergétique.

Le modèle mathématique proposé, a permis de simuler l'évolution des profils de température et de teneur en eau à l'intérieur de la pomme de terre en échantillons rectangulaires, à été validé expérimentalement.

Nous pouvons améliorer ce modèle en tenant compte de l'effet du gradient thermique sur la migration interne de l'eau. De plus la meilleure estimation du coefficient de diffusion et la réalisation des isothermes de sorption relatif à notre produit contribueraient à affiner ce modèle.

REFERENCES

- [1] L. M. Diamante, and P. A. Munro, *Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices*, International J. of Food Science and Technology, 26 (1991), pp. 99-109.
- [2] N. Wang and J.G. Brennan, *A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato*, J. of Food Engineering, 24 (1995b), pp. 47-60.
- [3] B. Li Ye, Y. Liu Deng, R. Bai Yun and C. Qin Yu, *Heat and mass transfer in potato during drying*, IDS'96, vol. B, pp. 929-936 Krakow, Poland (1996).
- [4] C. O. Rovedo, C. Suarez and P. Viollaz, *Analysis of moisture profiles, mass Biot number and driving forces during drying of potato slabs*, J. of Food Engineering, 36 (1998), pp. 211-231.
- [5] S. Youcef-Ali, N. Moumami, J.Y. Desmons, A. Abene, H. Messaoudi and M. Le Ray, *Numerical and experimental study of dryer in forced convection*, International Journal of energy research, 25 (2001), pp.537-553.
- [6] H. Iyota, N. Nishimura, T. Onuma and T. Nomura, *Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air*, Drying technology, 19 (7) (2000), pp. 411-1424.
- [7] H. Yang, N. Sakai and M. Watanabe, *Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer*, Drying Technology, 19(7) (2001), pp.1441-1460.
- [8] C. Suarez and P.E. Viollaz, *Shrinkage effet on drying behaviour of potato slabs*, J. of Food Engineering, 13 (2) (1991), pp.103-114.
- [9] C. Ratti and A.S. Mujumdar, *Solar drying of foods: modelling and numerical simulation*, Solar Energy, 60 (3/4) (1997), pp.151-157.
- [10] A. V. Luikov, *Heat and mass transfer*, Mir Publishers, Moskow (1980).
- [11] C.P. Mc Laughlin and TRA Magee, *The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes*, J. of Food Engineering, 35(3) (1998), pp. 267-280.
- [12] Z.B. Maroulis, C.T. Kiranodis and G. Marinos-Kouris, *Heat and mass transfer modelling in air drying of food*, J. of Food Engineering, 26 (1995), pp. 113-130.
- [13] T. Martens, *Mathematical model of heat processing in flat containers*, Thèse Ph. D. Université Catholique de Louvain, Belgique (1980).
- [14] R.E. Trebal (1980) *Operaciones de Transferencia de Mara*. 2nd Ed., New York: McGraw-Hill Book Co., pp. 90 and 268.
- [15] N.Wang and J.G. Brennan, *The influence of the moisture content and temperature on the specific heat of potato*, J. of Food Engineering, 24 (1) (1993), pp.303-310.
- [16] N. Wang and J.G. Brennan, *Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration*, J. of Food Engineering, 24 (1995a), pp. 61-76.
- [17] McAdams W. H., *Transmission de la chaleur*, (2nd edn), Dunod : Paris (1961).
- [18] N. Kechaou, *Etude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro- alimentaires*, Thèse d'état ès Science physique, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie (2000).
- [19] A. Charreau et R. Cavallé, *Séchage(théorie et calculs)*, Engineer's Techniques (J2480 pp.1-23), France (1991).