

ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE D'UN PROCEDE DE SECHAGE CONVECTIF ET INTERMITTENT

Elaid BEN ALI¹⁻² Mohamed HARBAOUI¹⁻² Salah BEN MABROUK¹

1. Institut National de Recherche Scientifique et Technique. Laboratoire des Applications Solaires.
BP : 95 , Hammam – Life 2050. TUNISIE. Email : Salah.BenMabrouk@inrst.rnrt.tn

2. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir. Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques.
Rue Ibn Eljazzar – Monastir 5019. TUNISIE. Email : Elaid_ben_ali@yahoo.fr

RESUME

Le but de ce travail est de quantifier l'intérêt énergétique d'un processus de séchage convectif et intermittent d'une couche de produits agroalimentaires (échantillons minces de pomme). Pour l'étude expérimentale, le dispositif du laboratoire a permis de tracer la courbe caractéristique de séchage et de montrer l'influence des caractéristiques de l'air sur les cinétiques de séchage. Le modèle numérique permet, à partir des résultats expérimentaux obtenus et en tenant compte des contraintes propres au produit, de déterminer au sein du tunnel, les profils de température, d'humidité de l'air et de teneur en eau du produit, pour des conditions de fonctionnement données. La validation du modèle numérique avec les cinétiques expérimentales est satisfaisante. Les concordances issues des confrontations justifient les choix et les hypothèses faites pour l'élaboration du modèle de transfert couplé de chaleur et de masse.

Mots clés : Transfert de masse et de chaleur, séchage intermittent, cinétique de séchage, séchoir tunnel, simulation numérique.

NOMENCLATURE

C	chaleur spécifique, J/kg°C	ξ	Surface spécifique
d	diamètre du produit, m	ε	porosité moyenne
H	humidité relative de l'air, kg/kg	λ	conductivité thermique, W/m°C
L	longueur du tunnel, m	ρ	masse volumique d'un constituant, kg/m ³
T	température, K ou °C	α	coefficient d'échange thermique
t	temps, s ou h	<i>Indices</i>	
V	vitesse de l'air, m/s	a	air de séchage
X	teneur en eau du produit, kg eau/kg (matière sèche)	s	solide, produit
Y	humidité absolue de l'air ou Potentiel de séchage	l	liquide
ΔT	écart de température, K	v	vapeur
<i>Symboles grecs</i>		w	air sec

1. INTRODUCTION

Les transferts de chaleur et de masse en milieu poreux sont des phénomènes rencontrés dans de nombreuses situations physiques, chimiques et microbiologiques correspondant à de vastes domaines d'applications concernant l'utilisation rationnelle de l'énergie. Chua *et al.* [1] ont montré les avantages considérables du séchage intermittent d'un produit agricole ; les sauts de température de l'air ont favorisé la diffusivité massique vers la surface du produit. Ce procédé a minimisé les risques de dégradation mécanique du produit. Lors du séchage à température variable d'une tranche de banane, Chou *et al.* [2] ont confirmé la réduction du temps global du séchage et la préservation de ses qualités nutritives. D'autre part, d'après Tan *et al.* [3], une source radiative intermittente permet de réduire le temps de séchage au 2/3 pour la pomme de terre et au 3/5 pour l'Ananas. Comparée au séchage continu à des températures identiques, l'opération intermittente pourrait réduire de 35% à 60% le temps du séchage global (K. Toyoda, H. Kojima, je. Farkas) [4].

Nous présentons ainsi une étude des transferts de chaleur et de masse lors du séchage convectif et intermittent d'une couche mince d'un produit agroalimentaire afin d'évaluer le gain de temps et d'énergie pour ce procédé.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

2.1 Introduction

Le développement du modèle mathématique de séchage d'une couche de produits granulaires tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [5] :

- Le tassement du produit au cours du séchage est négligé.
- La masse volumique de l'air est constante.
- L'échange convectif entre les deux phases est exprimé à l'aide d'un coefficient de transfert de chaleur qui dépend de la vitesse de déplacement du fluide et de la texture du milieu poreux.

2.2 Modèle mathématique

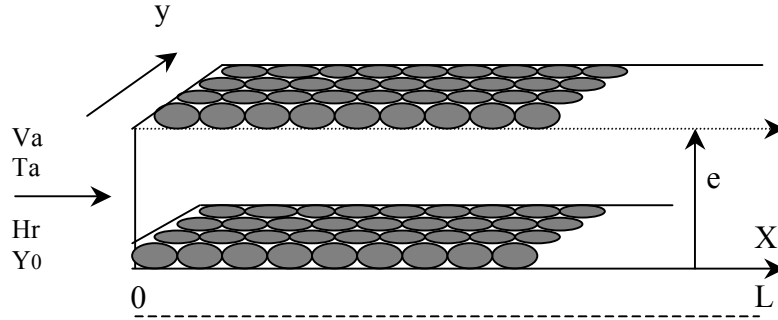


Figure 1 : Schéma des couches du produit le long du séchoir tunnel.

Le milieu poreux granulaire est décrit par deux fonctions macroscopiques (T_s, X) pour la phase solide et (T_a, Y) pour la phase fluide (figure 1). En établissant les bilans massiques et thermiques relatifs à un volume élémentaire représentatif (VER) au niveau d'une couche granulaire, on obtient les équations suivantes :

- L'accroissement de l'humidité absolue de l'air Y provient de la perte en eau ΔX du produit :

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

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

- En négligeant les termes de dissipation visqueuse, 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 :

$$\rho_s (1 - \varepsilon) (C_s + X C_w) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \xi \alpha (T_a - T_s) + (1 - \varepsilon) \rho_s \Delta H_{vap} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{avec } \Delta H_{vap} = \Delta H_{vap}^{\circ} + (C_v - C_l) T_s \quad (4)$$

- A ces équations, il convient d'ajouter l'équation de la cinétique de séchage :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \dot{X}_r F(X_r) \\ F(X_r) = a_0 + a_1 X_r + a_2 X_r^2 + a_3 X_r^3 \\ X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{in} - X_{eq}} \end{cases} \quad (5)$$

Les constantes a_0 , a_1 , a_2 et a_3 sont déterminées expérimentalement au laboratoire pour des caractéristiques d'air constantes (figure 2). On fait l'hypothèse que cette équation reste valable lorsque la température T_a et l'humidité relative Hr varient lentement [5].

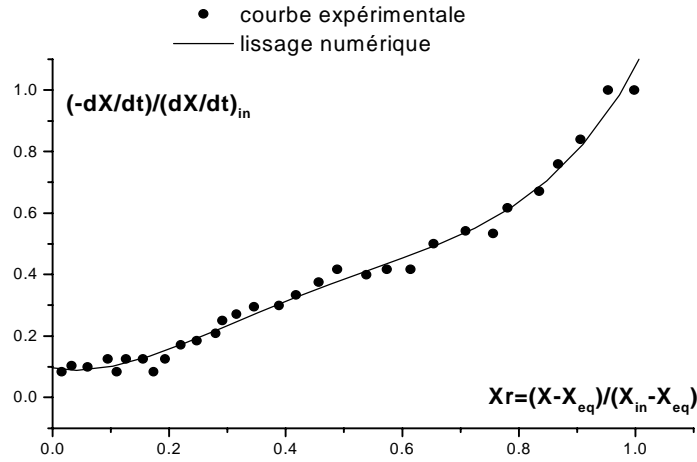


Figure 2 : courbe caractéristique de séchage

2.3 Résolution numérique

Nous avons développé un modèle basé sur une description physique qui prend en compte d'une part les transferts de chaleur entre les phases fluide et solide et d'autre part les différents phénomènes qui interviennent au sein du produit. La simulation complète d'un problème de séchage comporte des périodes pour lesquelles le couplage des équations est très fort et oblige à adopter un pas de temps très petit [6]. On met ainsi au point une méthode de résolution itérative qui permet de prendre à chaque instant un pas de temps optimal.

2.3.1 Conditions initiales et aux limites

$$\left\{ \begin{array}{l} X(x,0) = X_{in} \quad \text{et} \quad T_a(x,0) = T_0 \\ Y(x,0) = Y_{in} \quad \text{et} \quad T_s(x,0) = T_{am} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} X(0,t) = X_0 \quad \text{et} \quad T_a(0,t) = T_0 \\ Y(0,t) = Y_0 \quad \text{et} \quad T_s(0,t) = T_{s0} \end{array} \right. \quad (6)$$

2.3.2 Méthode de résolution

Le temps caractéristique d'établissement de la température et de l'humidité absolue de l'air Y_a est beaucoup plus petit que celui relatif au séchage. Les termes transitoires relatifs à l'air peuvent ainsi être négligés lors de la résolution numérique.

Le système d'équations présenté ci-dessus est résolu par une méthode implicite de différences finies utilisant une approche du type volume de contrôle. Pour résoudre une équation différentielle du système, on construit un maillage constitué d'un réseau de points. Autour de chaque point, on définit un domaine de contrôle, puis on intègre l'équation sur ce domaine suivant des pas variables de temps et d'espace.

La discrétisation des équations est faite en admettant entre autre les considérations suivantes [5]:

- Les dérivées premières d'une grandeur physique ϕ (T_a , T_s , X et Y) sont approximées par un développement en série de Taylor d'ordre 2 autour des points $(i-1)$ et $(i+1)$:

$$\frac{\phi_{i+1}^n - \phi_{i-1}^n}{\Delta x} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_i^n + \delta \left(\Delta x^2 \right) \quad (7)$$

- Les valeurs relatives aux instants (n) et (n + 1) sont discrétisées par la formule suivante :

$$\frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_i^n + \delta \left(\Delta t^2 \right) \quad (8)$$

Le caractère non linéaire et couplé des équations est traité par une technique de différences finies itératives basée une procédure de calcul de ϕ_{i+1}^{n+1} à partir de ϕ_i^{n+1} connu et ϕ_{i+1}^n estimé. Sur les faces du domaine de contrôle, les paramètres de transport (α , β_m , λ , ...) sont évalués en supposant leurs variations linéaires entre deux nœuds voisins. Sur les faces du domaine physique, la discrétisation des équations est obtenue en intégrant sur une moitié du volume de contrôle et en tenant compte des conditions aux limites. Le test de convergence impose pour chaque variable la condition suivante :

$$\text{Max} \left| \Delta \phi^k \right| < \delta, \quad \delta \text{ est 'infinitement petit' et } \Delta \phi^k \text{ étant l'évolution de } \phi \text{ entre deux itérations successives.}$$

Les calculs sont organisés par étape. Dans un premier temps, les pas de temps et d'espace sont gardés constants tant qu'aucun de problème de convergence ne surgit. Pour chaque pas de temps, les itérations partent d'un état estimé et s'arrêtent lorsque les critères de convergence sont satisfaits.

Pour le cas du séchage continu, nous avons opté pour le choix d'un maillage spatial régulier. Par contre, le maillage temporel est variable ; le pas de temps Δt , choisi initialement très petit, augmente progressivement de façon à suivre l'évolution des caractéristiques du produit. L'affichage des valeurs numériques se fait après chaque pas de temps pour des nœuds spécifiques du domaine spatial.

Pour le séchage intermittent, on introduit les nouvelles conditions de l'air pour chaque arrêt et pour chaque palier sans modifier les autres paramètres. La teneur en eau initiale pour le premier arrêt est identique à celle de l'état précédent. La continuité des conditions de séchage est respectée aussi bien à l'arrêt qu'à la reprise du processus. Ces consignes sont identiques pour l'humidité absolue de l'air.

3. RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1 Analyse des résultats

Le modèle numérique décrit ci-dessus est appliqué au séchage convectif et intermittent d'une couche d'échantillons de pomme de 10 mm d'épaisseur et de 6 m de longueur [7].

Au début de l'opération de séchage et à l'entrée du tunnel, la température du produit est inférieure à celle du fluide. Cette différence diminue au cours du temps et les températures du produit (solide) et du fluide évoluent d'une façon similaire. Notons également l'existence d'un front de séchage qui se déplace principalement de l'entrée vers la sortie du tunnel. Ce front divise le milieu en deux régions. La région sèche s'élargit au cours du temps pour occuper tout le milieu. Au fur et à mesure que l'opération de séchage avance, la teneur en eau du milieu et le taux d'évaporation diminuent (*figure 4*). Nous avons remarqué que pendant les trente premières minutes, l'humidité relative de l'air décroît progressivement après une avancée de 1,5 mètres dans le tunnel. Parallèlement, la teneur en eau des grains augmente et leur température moyenne diminue après une première phase de croissance. Cette inversion des processus de séchage est probablement due à la lenteur du soufflage qui s'avère incapable d'entraîner l'humidité vers l'extérieur.

La température du produit augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur proche de celle de l'air de soufflage (*figure 3*). Suivant la position de l'échantillon dans le tunnel, on doit noter deux comportements différents : la température d'un échantillon se trouvant à l'aval du tunnel présente une période à température constante ce qu'on ne voit pas à l'amont du tunnel. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'humidité de l'air à ce niveau est plus élevée ; ceci étant confirmé par l'évolution de la température de l'air le long du tunnel. L'énergie apportée ne peut donc qu'évaporer l'eau de surface. De même, le profil de teneur en eau (*figure 4*) présente une seule phase décroissante, mais la vitesse diminue plus rapidement à l'entrée qu'à la sortie du tunnel [8].

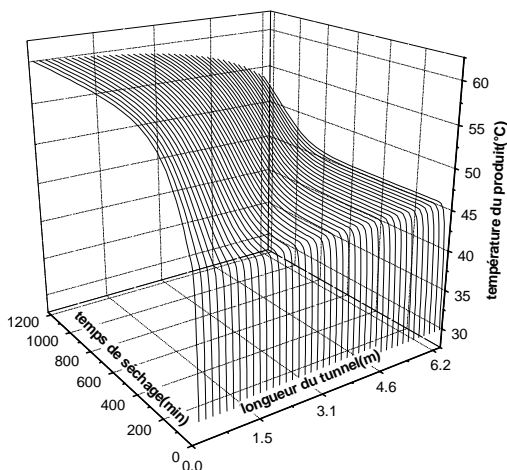


Figure 3 : Evolution de la température du produit
($T_a = 60^\circ\text{C}$ et $V_a = 3 \text{ m/s}$).

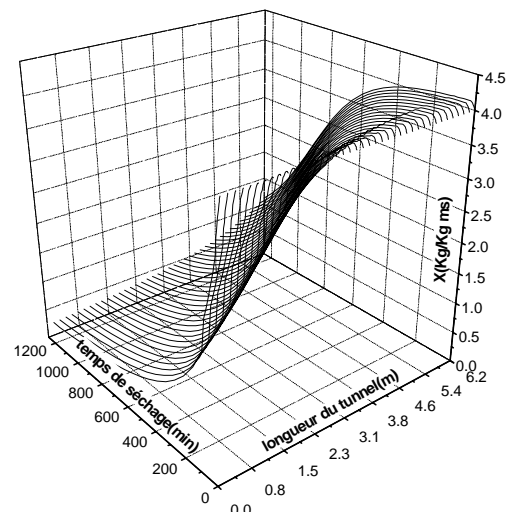


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau du produit
($T_a = 60^\circ\text{C}$ et $V_a = 3 \text{ m/s}$).

3. 2 Effet des changements des conditions du séchage

Le front de séchage se déplace plus rapidement et le milieu sèche plus vite quand on commence par une température d'entrée plus importante. En effet, une élévation de T_a accélère la cinétique. Néanmoins, si la vitesse est assez faible, l'effet de la température n'est pas immédiat [8]. En effet, plus le débit de l'air est élevé, plus vite le front de séchage se forme et se déplace.

Pour le cas intermittent, le changement brusque des conditions opératoires est réalisé en conservant l'échantillon dans l'enceinte. Après différentes durées d'arrêt, la reprise est faite soit à la même température soit à une valeur plus grande. Au redémarrage, la diffusion de l'humidité est plus grande que celle avant l'arrêt (figure 5) d'où un gain substantiel d'énergie et de temps global de séchage. En effet, au cours d'un arrêt il y a relaxation des gradients internes de température et de teneur en eau. Au sein du produit, les gradients thermiques et massiques diminuent progressivement. Par ailleurs, la teneur en eau surfacique tend à augmenter à cause d'un flux massique important du centre vers les périphériques. Ceci entraîne une augmentation de l'activité de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit ainsi qu'une diminution de sa température.

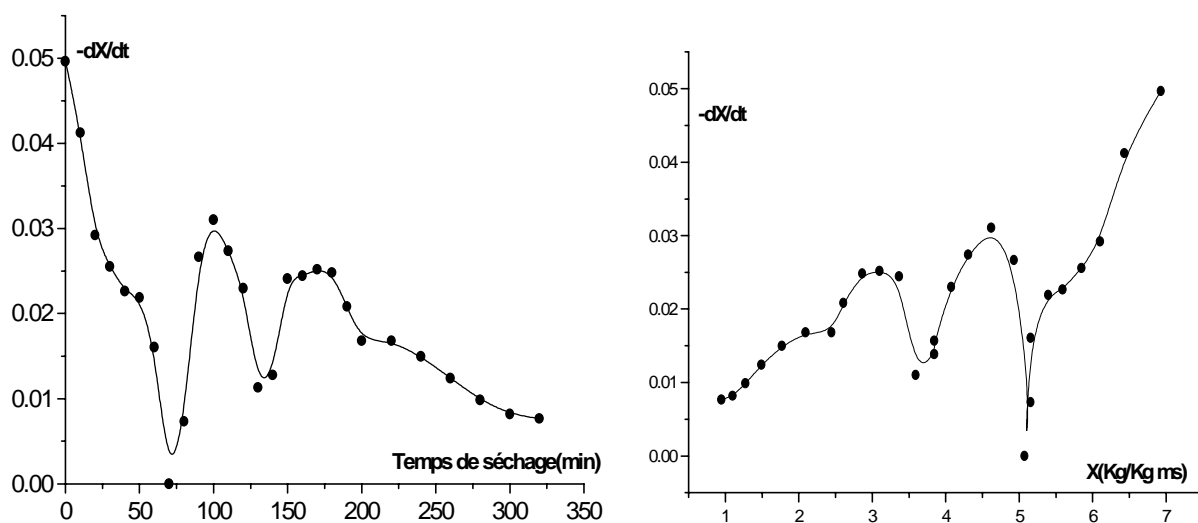


Figure 5: Evolution expérimentale des cinétiques de séchage obtenues pour 2 arrêts de 20 min (1^{er} arrêt après 60 min et $T_{r1} = 60,7^\circ\text{C}$; 2^{ème} arrêt après 120 min et $T_{r2} = 72,3^\circ\text{C}$ avec $V_a = 1 \text{ m/s}$, $T_a = 41,8^\circ\text{C}$, $m_s = 13,7 \text{ g}$).

Afin de mettre en évidence l'effet des changements du débit d'air au cours du séchage, on a effectué des essais en diminuant la vitesse de l'air de soufflage. Les résultats montrent que le procédé le plus adéquat est d'utiliser une température croissante et une vitesse décroissante (Figure 7). En effet, au début de la phase de séchage, le produit est saturé en humidité. Une température faible peut évaporer l'eau à la surface tout en utilisant une vitesse assez importante pour évacuer l'humidité vers l'extérieur. Après une heure de séchage, la majorité de l'eau faiblement liée du produit s'est évaporée (figure 6). Seule l'augmentation de la température de l'air peut accélérer la diffusion de l'humidité vers la surface. L'humidité absolue de l'air est en train de diminuer au cours du temps, on a donc intérêt à diminuer la vitesse de soufflage. De même après le deuxième arrêt, il est judicieux d'augmenter la température et de diminuer la vitesse de l'air de soufflage.

L'augmentation de la vitesse du séchage et la réduction de temps total d'exposition du produit au flux de chaleur ne peut être accomplie que par élévation de la température de l'air de soufflage [4]. La vitesse de l'air de soufflage n'est qu'un moyen de transport de l'humidité vers l'extérieur. Pour une économie d'énergie et de temps les couples optimum (T_a , V_a) sont les suivants : (50°C, 5m/s), (60°C, 3m/s) et (70°C, 1m/s) (figure 8).

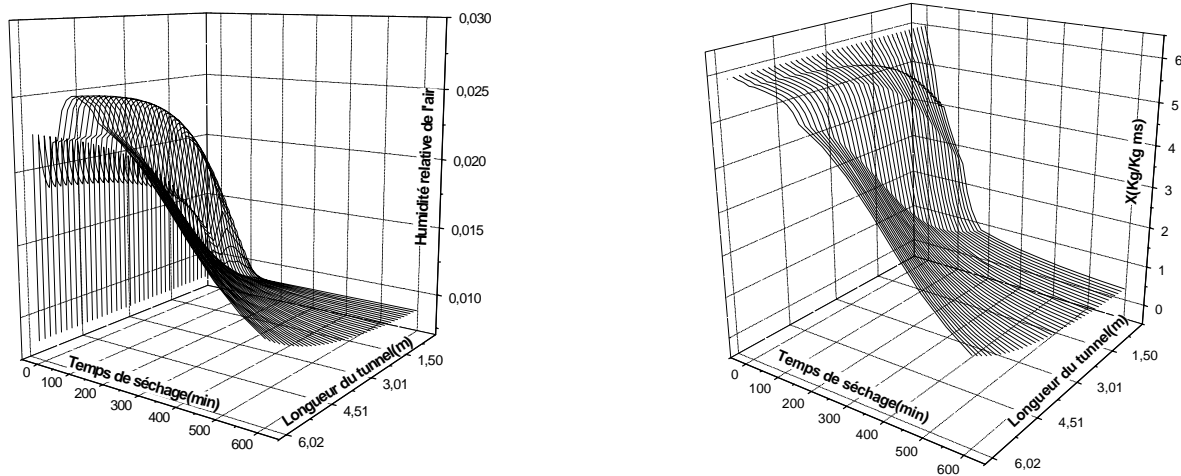


Figure 6 : Evolution de l'humidité de l'air et de la teneur en eau du produit dans le cas d'une diminution de la vitesse (5 m/s → 3 m/s → 1 m/s) avec $T_a = 50^\circ\text{C}$.

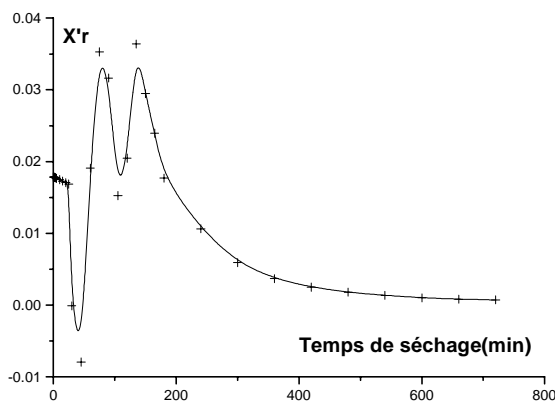


Figure 7 : Variation de la vitesse de séchage cas d'une élévation de la température et réduction de la vitesse (50°C, 5m/s) → (60°C, 3m/s) → (70°C, 1m/s)

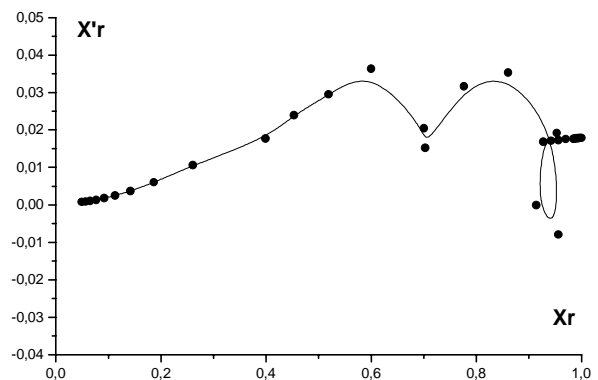


Figure 8 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite : (50°C, 5m/s) → (60°C, 3m/s) → (70°C, 1m/s).

4. VALIDATION ET CONFRONTATION AVEC L'EXPERIENCE

La validation du modèle pour le cas continue a été faite par S. Ben Mabrouk et A. Belghith en 1994 [6]. Les températures expérimentales et simulées à l'intérieur du produit sont très proches à la fin du processus, avec une nette différence au début du séchage (figure 9). Cette différence peut s'expliquer par le fait que la température du produit a été confondue initialement avec la température humide, ce qui n'est pas vrai dans les conditions de nos expériences. De plus, la courbe de température simulée présente au début du processus de séchage une période à vitesse constante, que l'expérience ne met pas en évidence, notamment lorsqu'il s'agit de produits agroalimentaires. Pour le séchage à conditions variables on peut dire que les cinétiques de séchage expérimentale et simulée ont la même allure mais la déformation dans le cas de l'expérience n'est pas immédiate à cause de l'inertie du milieu (figure 10). En effet, nous n'avons pas tenu compte dans le modèle du rétrécissement du produit et la migration des solutés à la surface qui gênent la migration de l'eau à la surface. Les concordances issues des confrontations justifient les choix et les hypothèses faites pour l'élaboration du modèle de transfert couplé de chaleur et de masse lors du séchage convectif et intermittent des échantillons minces de pomme [7].

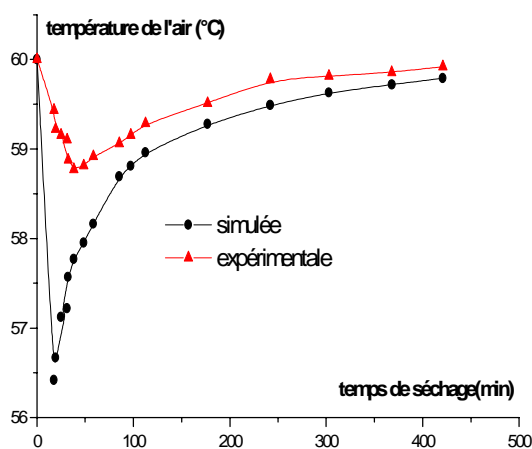


Figure 9 : Evolution de la température de l'air ($T_a = 60^\circ\text{C}$, $V_a = 3 \text{ m/s}$).

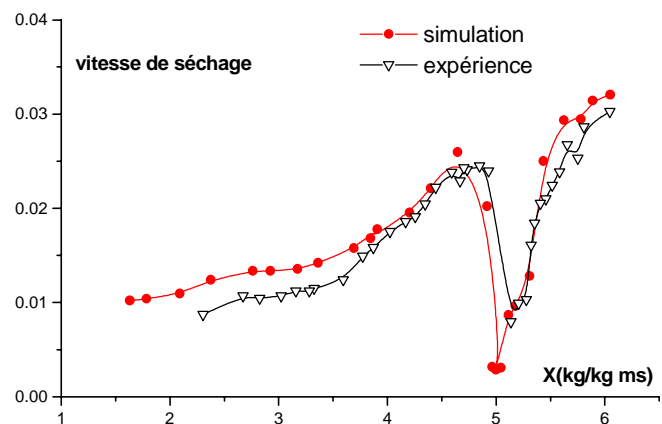


Figure 10 : Evolution de la vitesse de séchage ($T_a = 40^\circ\text{C}$, $V_a = 3 \text{ m/s}$).

5. CONCLUSION

Le présent travail constitue une contribution à la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et de masse lors du séchage convectif et intermittent (à pression atmosphérique) d'une couche mince d'un produit naturel. Nous nous sommes intéressés à des séquences de séchage intermittent étudiées aussi bien à l'échelle du produit qu'à l'échelle d'un tunnel industriel. En effet, la vitesse de séchage après un temps d'arrêt est remarquablement plus grande que celle avant l'arrêt d'où l'intérêt énergétique du séchage intermittent. De plus, une augmentation de la température et une diminution de la vitesse de l'air de soufflage après chaque arrêt nous permettent de réduire le temps global de séchage et de minimiser l'énergie utilisée.

Par ailleurs, nous avons utilisé un modèle pour simuler le séchage convectif et intermittent d'un produit biologique (rondelles minces de pomme). La confrontation des résultats numériques et expérimentaux a montré que nous décrivons de façon satisfaisante le séchage de ce produit. Notre modèle peut être adapté à d'autres produits et à d'autres configurations de séchoirs.

REFERENCES

- [1] K. J. Chua, A. S. Mujumdar, M. N. A. Hawlader, S. K. Chou, and J. C. Ho, "Convective drying of agricultural products. Effects of continuous and stepwise change in drying air temperature". In Drying Technology, Vol. 19 N.8, 2001, pp. 1949-1960.

- [2] S. K. Chou; K. J. Chua; A. S. Mujumdar; M. N. A. Hawlader; J. C. Ho, "*On the intermittent drying of an agricultural product*". In Food and Bioproducts Processing. Vol. 78 N. 4, 2000, pp. 193-203.
- [3] M. Tan, K. J. Chua, A. S. Mujumdar, and S. K. Chou, "*Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple*". In Drying Technology, 2001, pp. 2193-2207.
- [4] K. Toyoda, H. Kojima, I. Farkas, "*Modelling intermittent drying of rough rice and control of the drying and tempering stages ISHS*". Acta Horticulturae 406: II IFAC/ISHS Workshop :Mathematical & Control Applications in Agriculture & Horticulture.
- [5] S. Ben Mabrouk, "*Etude des transferts simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux : Modélisation des phénomènes de séchage*". Thèse de Doctorat Es-Sciences. (FST) (1999).
- [6] S. Ben Mabrouk, A. Belghith, "*Simulation and design of a tunnel dryer*". Renewable Energy, Vol.5. No.1, 1994, pp. 469-473.
- [7] E. Ben Ali, "*Analyse expérimentale et numérique d'un procédé de séchage convectif et intermittent*". Mémoire de fin d'études, ENIM- INRST, (2002).
- [8] E. Ben Ali, M. Harbaoui, S. Ben Mabrouk, "*Modélisation des phénomènes de transferts de chaleur et de matière : cas du séchage convectif et intermittent*". Accepté au Congrès français de Thermique, SFT 2003, Grenoble, 3 - 6 juin 2003. N°39.