

Estimation de la diffusivité massique et cinétique de séchage sous vide de la pomme de terre (variété Spunta)

Djamel Fahloul¹, Fouzia Benmadi et Soussene Boudraa

Laboratoire de Génie des Procédés Alimentaires,
Département d'Agronomie, Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie

(reçu le 20 Novembre 2009 - accepté le 30 Décembre 2009)

Résumé - Le but de ce travail est l'étude de l'influence de la température (55, 65, 75 °C), de la pression (20, 40, 60 cm Hg) et de la découpe (rondelle, cubique, bâtonnet) sur la cinétique de séchage sous vide de la pomme de terre (variété Spunta), ainsi que l'estimation du coefficient de diffusivité massique et de l'énergie d'activation pendant le séchage sous vide. Les résultats ont montré que la température est la variable la plus importante lors du séchage des pommes de terre. La pression a un effet moins important. L'étude de la découpe a montré que la forme rondelle est la forme la plus appropriée pour le séchage avec une surface d'échange plus importante. Les valeurs de la diffusivité massique varient entre $9,48 \times 10^{-9}$ et $3,26 \times 10^{-8}$ (m²/s) et les valeurs de l'énergie d'activation sont respectivement 18,51; 25,71 et 26,92 (kJ/mole) pour les pressions (20, 40, 60 cm Hg). Les résultats du coefficient de diffusivité massique et de l'énergie d'activation sont en accord avec la littérature. L'utilisation d'un test organoleptique basé sur 4 critères (aspect, texture, couleur et saveur) a permis de déterminer le couple optimal de séchage température-pression (température 65 °C et pression 20 cm Hg).

Abstract - The aim of this work is to study the effect of temperature (55, 65, 75 °C), of pressure (20, 40, 60 cm Hg) and of shape (cylinder, cube, slab) on the vacuum drying kinetics of potatoes (variety Spunta), as well as the estimation of the moisture diffusivity coefficient and the activation energy of potatoes during vacuum drying. Results showed that temperature is the most important variable during vacuum drying. However, pressure has a less important effect. Results revealed that cylindrical sample is the most appropriate shape during drying with a great drying surface. Moisture diffusivity coefficient values varied between $9,48 \times 10^{-9}$ and $3,26 \times 10^{-8}$ (m²/s) and activation energy values were respectively 18,51; 25,71 et 26,92 (kJ/mole) for the following pressures (20, 40, 60 cm Hg). Results of the moisture diffusivity coefficient and the activation energy agreed with literature. A sensorial analysis test based on four criteria (aspect, texture, color, flavor) allowed to determine the best drying parameters of temperature and pressure (temperature 65 °C et pressure 20 cm Hg).

Mots clés: Séchage sous vide - Cinétique - Pression - Découpe - Coefficient de diffusivité massique - Energie d'activation - Pomme de terre.

1. INTRODUCTION

Les dernières publications de l'Office National des Statistiques (ONS) révèlent qu'en Algérie, la consommation de la pomme de terre occupe la deuxième place avec 32 kg/an/habitant, venant juste après les céréales et ses dérivés [1]. En 2003, la superficie consacrée à la pomme de terre a augmenté de 22 % par rapport à 2002 [2].

¹ dfahloul2@yahoo.com

Comme cette augmentation de production s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage n'ont pas suivi le même rythme. Le problème de l'entreposage et de la transformation des tubercules est alors posé.

Les techniques de séchage peuvent offrir une solution satisfaisante pour la conservation des pommes de terre. Le séchage des pommes de terre par différentes techniques a été étudié par plusieurs chercheurs [3, 4]. D'autres études ont abordé l'influence du séchage sur les propriétés des produits séchés [5-7].

Senadeera *et al.* [8] et Rouibi [9], ont étudié l'influence de la découpe de quelques végétaux sur la cinétique de séchage. La diffusivité massique est la propriété de base pour le calcul du transfert de masse pendant le séchage des produits agricoles [10].

Dans plusieurs recherches récentes, a été calculé le coefficient de diffusivité massique pour différents produits agricoles [11-15]. Cependant, très peu d'études à notre connaissance ont abordé l'influence du séchage sous vide sur la diffusivité massique et l'énergie d'activation des pommes de terre.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la température, la pression et la découpe sur la cinétique de séchage sous vide de la pomme de terre afin de déterminer les meilleurs paramètres de séchage, ainsi que l'estimation du coefficient de diffusivité massique et l'énergie d'activation pendant le séchage sous vide.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel végétal

Les pommes de terre (*Solanum Tuberosum*) de variété Spunta ont été achetées au marché local à Batna. Elles ont été stockées au réfrigérateur à 4 °C, en sacs de 5 kg pendant toute la durée des essais.

2.2 Prétraitements

Les tubercules de pomme de terre ont été pelées et lavées à l'eau de robinet, ensuite découpées selon trois découpes: rondelles de 3,5 mm [3], cubique (1 cm) et bâtonnet (1 cm, 3 cm) [16], puis, blanchies à l'eau bouillante (100 °C) pendant 3 min [17]. Les échantillons sont ensuite refroidis immédiatement par de l'eau froide, puis égouttés dans une passoire [18].

La forme rondelle est utilisée pour l'étude de la cinétique de séchage. On procède à des pesées à intervalles réguliers (20 min) pour déterminer l'évolution de la masse du produit.

La matière sèche a été déterminée par la mise de l'échantillon dans une étuve à 105 °C pendant 24 h, jusqu'à l'obtention d'un poids constant [19].

2.3 Séchage sous vide

L'étuve sous vide (type Jouan Ev100) a été utilisée lors des expériences. La température de l'étuve est contrôlée par le biais d'un régulateur électronique et un manomètre indique la pression interne de la chambre.

Une pompe à vide externe est entièrement commandée par le biais du panneau de contrôle de l'étuve. La pression dans la chambre est contrôlée par un régulateur de débit permettant à tous instant de régler le vide et de créer un flux permettant d'accélérer l'évacuation des vapeurs hors de la chambre.

2.4 Estimation de la diffusivité massique et de l'énergie d'activation

Le transfert de l'humidité pendant le séchage est contrôlé par la diffusion interne. La deuxième loi de Fick de diffusion indiquée dans l'équation (1), a été largement utilisée pour décrire le processus de séchage pour la plupart des produits biologiques [7].

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D \frac{\delta^2 M}{\delta z^2} \quad (1)$$

liant la teneur en eau du produit (M), la diffusivité massique (D), le temps (t) et la direction (z).

En supposant l'uniformité de la distribution de l'humidité initiale, les résistances externes négligeables et un processus isotherme, la solution de l'équation (1) proposée par Crank [20] est:

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{L^2} \right] \quad (2)$$

La solution prend en compte la teneur en eau initiale (M_0), la teneur en eau à l'équilibre (M_e) et l'épaisseur de l'échantillon (L). Simplifiant l'équation (2) en prenant le premier terme de la solution de série et en supposant M_e égal à 0:

$$MR = \frac{\bar{M}}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{L^2} \right] \quad (3)$$

Comme le séchage arrive seulement sur une surface de l'échantillon, l'épaisseur L dans les équations (2) et (3) est remplacée par $L/2$. L'équation de la couche mince utilisée par Zogzas [11] est:

$$-\frac{dM}{dt} = K(M - M_e) \quad (4)$$

avec K , la constante de séchage. L'intégration de l'équation (4) à un instant t est:

$$MR = \exp(-Kt) \quad (5)$$

En comparant les équations (3) et (5) [10], la constante de séchage (K) peut être rapprochée à la diffusivité massique par la relation suivante:

$$K = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad (6)$$

où le terme $(8/\pi^2)$ est supposé égal à un. La relation entre la température et la diffusivité massique suit l'expression d'Arrhenius [7]:

$$D = D_0 \times e^{(-E_a / RT)} \quad (7)$$

Comprenant le facteur Arrhenius (D_0), l'énergie d'activation (E), la température (T) et la constante des gaz parfaits (R). L'énergie d'activation peut être calculée à partir de la pente de l'équation (8):

$$\ln D = \ln D_0 - (E_a / RT) \quad (8)$$

2.5 Etude organoleptique

Un jury, composé de 07 personnes d'âge distinct, ont goûté les produits séchés et ont rempli une fiche d'appréciation organoleptique où ils ont notée sur 5 points, chacune des caractéristiques suivantes: aspect, texture, couleur et saveur. Les échantillons sont au nombre de 9, résultant de la combinaison de 3 températures et 3 pressions. Ce test a été inspiré de la recherche effectuée par Louka *et al.* [21]. Les résultats sont obtenus à partir de la moyenne des notes du jury pour chaque échantillon.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats ont montré que la pomme de terre (variété *Spunta*) contient 82 % d'eau (0,82 kg d'eau /kg produit) et 18 % de matière sèche (0,18 kg /kg produit). Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la littérature. La différence est due à la variété primeure de la pomme de terre qui contient plus d'eau.

3.1 Influence de la température

Les figures 1 et 2 montrent que la température a une influence sur l'évolution de la teneur en eau au cours du séchage.

En premier temps, on observe une forte évaporation d'eau libre du produit pour les trois températures. L'eau qui s'évapore à la surface du produit constitue l'eau libre renouvelée par la montée capillaire de l'eau libre interne [22].

En deuxième temps, l'évaporation de l'eau commence à diminuer. Le ralentissement commence lorsqu'il n'y a plus d'eau libre en surface. On pense à un 'front de vaporisation' qui s'enfonce progressivement dans le produit [23].

L'influence de la température sur la cinétique de séchage est toujours importante. Dans tous les cas, une augmentation de la température se traduit par une diminution plus importante de la teneur en eau.

Ces échanges sont de moins en moins importants au fur et à mesure que le séchage se fait car la quantité d'eau que l'on peut retirer du produit est plus faible et la différence de teneur en eau entre le produit et l'air est de plus en plus faible. Donc les échanges se font plus difficilement [23].

Lorsque la température est relativement élevée, l'amidon de la pomme de terre se gélatinise, et absorbe fortement l'eau. Donc, il entraîne en surface une couche imperméable à la vapeur d'eau [22].

L'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps pour différentes températures et à pression ($P = 60$ cm Hg) est présentée dans la figure 3.

Les différentes courbes de vitesse pour les trois pressions (20, 40, 60 cm Hg) (seule la pression 60 cm Hg est présentée) ont montré une allure de séchage décroissante. On note l'absence de la phase à allure constante. Ce résultat est en accord avec les résultats obtenus pour différents produits végétaux [15].

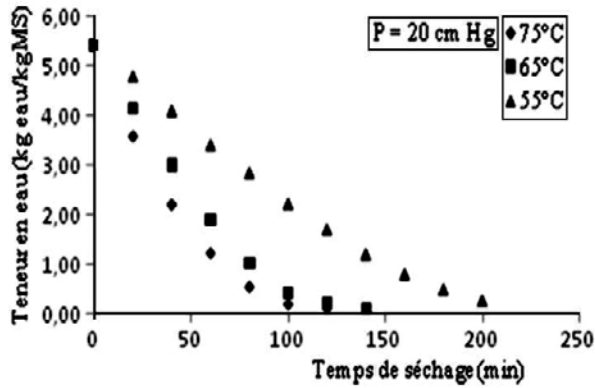


Fig. 1: Influence de la température sur la teneur en eau en fonction du temps à P = 20 cm Hg

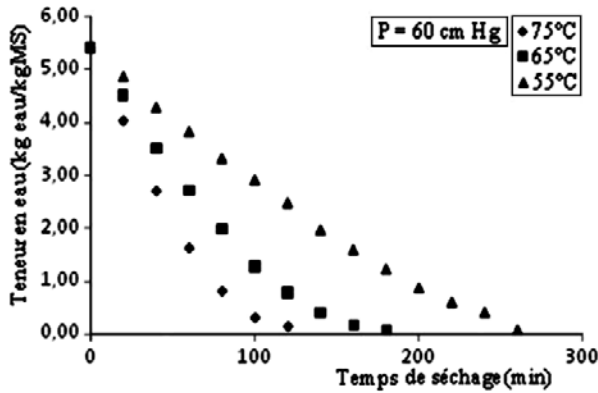


Fig. 2: Influence de la température sur la teneur en eau en fonction du temps à P = 60 cm Hg

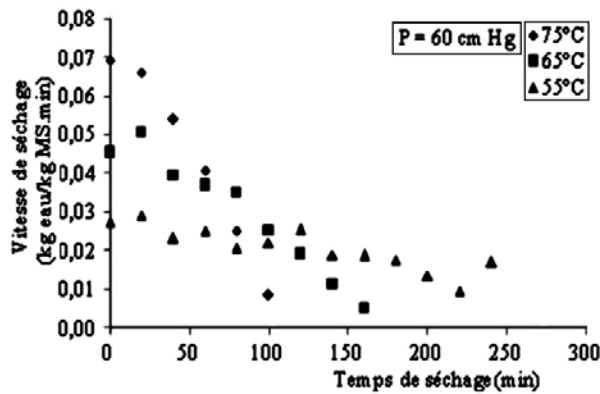


Fig. 3: Evolution de la vitesse de séchage de la pomme de terre en fonction du temps pour différentes températures à P = 60 cm Hg

3.2 Influence de la pression

L'influence de la pression sur les cinétiques de séchage est montrée sur les figures 4 et 5. Les teneurs en eau pour les pressions 40 et 60 cm Hg sont presque juxtaposées. On n'observe pas une différence sur la cinétique de séchage entre les deux pressions (40 cm Hg et 60 cm Hg) pour toutes les trois températures (55, 65, 75 °C) (seules 55 et 75 °C sont présentées).

Cependant, l'influence de la pression à 20 cm Hg est plus évidente. Cela montre que la pression a une influence lorsque le vide est poussé. En la comparant avec la température, la pression a un effet moins important que la température, lors du séchage.

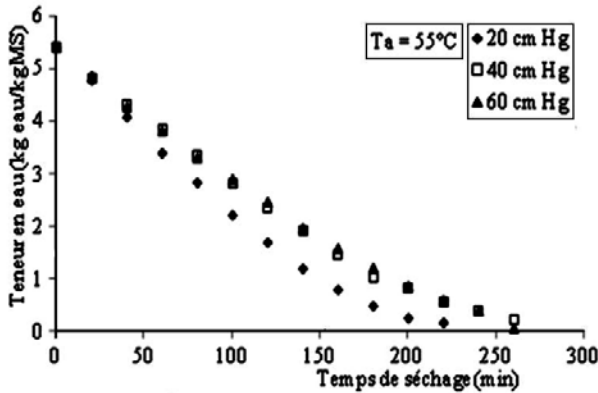


Fig. 4: Influence de la pression sur la teneur en eau à T = 55 °C

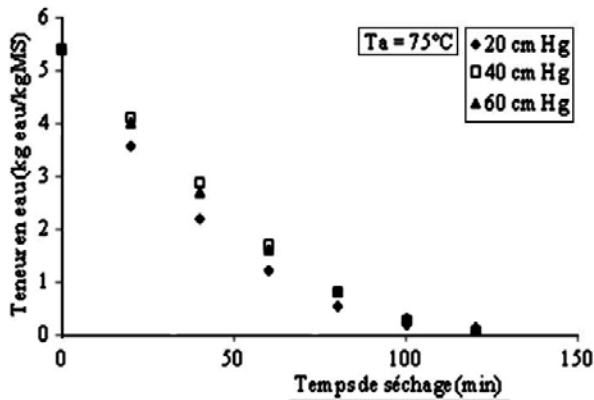


Fig. 5: Influence de la pression sur la teneur en eau à T = 75 °C

La figure 6 montre l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps pour différentes pressions et à une température (T_a = 75 °C).

Les différentes courbes de vitesse pour les trois températures (55, 65, 75 °C) (seule la température est présentée) ont montré une allure de séchage décroissante, avec l'absence de la phase à allure constante. Ce résultat est en accord avec la littérature pour le séchage des produits biologiques [15].

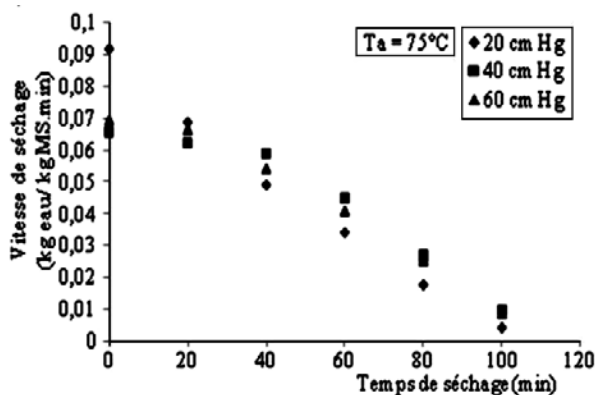


Fig. 6: Evolution de la vitesse de séchage de la pomme de terre en fonction du temps pour différentes pressions

3.3 Détermination de la diffusivité massique et de l'énergie d'activation

3.3.1 Détermination de la diffusivité massique

La loi de Fick a été utilisée pour évaluer le coefficient de diffusivité massique. L'évolution de $-\ln(X/X_0)$ en fonction du temps est présentée sur la figure 7.

D'après l'équation 6, on obtient les valeurs de la diffusivité massique présentées dans le **tableau 1**. Les résultats montrent que la diffusivité massique augmente avec l'augmentation de la température.

La diffusivité massique augmente aussi avec l'augmentation du vide, mais cette augmentation est moins importante, si on la compare avec la température. En effet, la majorité des produits agricoles (92 %) ont une diffusivité massique dans la gamme 10^{-12} à 10^{-8} (m^2/s) [11].

Les valeurs obtenues pour la diffusivité massique varient entre $9,48 \times 10^{-9}$ et $3,26 \times 10^{-8}$ (m^2/s). Srikiatden *et al.* [7] ont trouvé des valeurs entre $4,55 \times 10^{-10}$ et $12,7 \times 10^{-10}$ (m^2/s) pour la pomme de terre (variété Russet).

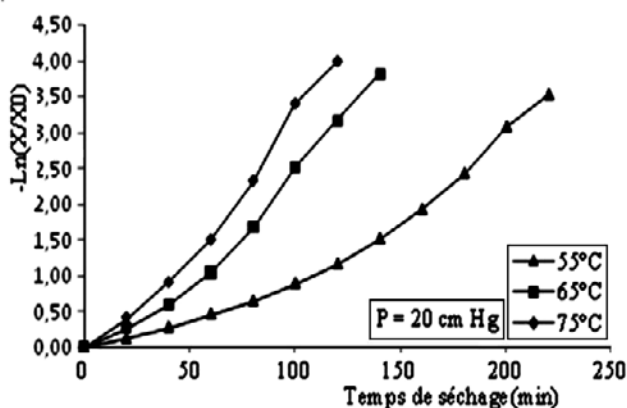


Fig. 7: Evaluation de $-\ln(X/X_0)$ en fonction du temps pour différentes températures à $P = 20$ cm Hg

Tableau 1: Estimation de la diffusivité massique et l'énergie d'activation de la pomme de terre

P (cmHg)	T (°C)	D (m ² s ⁻¹)	r	E _a (kJ/mole)	r
20	75	3,15 × 10 ⁻⁸	0,9782	18,51	0,9381
20	65	2,58 × 10 ⁻⁸	0,9733		
20	55	1,44 × 10 ⁻⁸	0,9421		
40	75	3,26 × 10 ⁻⁸	0,9262	26,92	0,9874
40	65	2,11 × 10 ⁻⁸	0,9244		
40	55	1,04 × 10 ⁻⁸	0,9532		
60	75	2,81 × 10 ⁻⁸	0,9639	25,71	0,9267
60	65	2,18 × 10 ⁻⁸	0,9298		
60	55	9,48 × 10 ⁻⁸	0,95		

3.3.2 Détermination de l'énergie d'activation

A partir des valeurs obtenues de la diffusivité massique pour différentes températures, la fonction $\ln D$ a été tracé en fonction de $1/T$ pour évaluer l'énergie d'activation (Fig. 8).

D'après le **tableau 1**, les valeurs de l'énergie d'activation sont respectivement 18,51; 25,71 et 26,92 (kJ/mole) pour les pressions (20, 40, 60 cm Hg). Ces résultats sont en accord avec la valeur 23,61 kJ/mole obtenue par Srikiatden *et al.* pour la pomme de terre (variété Russet) [7]. La diminution de la pression diminue l'énergie d'activation. En effet, en diminuant la pression, les molécules d'eau ont besoin de moins d'énergie pour se déplacer d'une molécule vers une autre, de l'intérieur vers l'extérieur de produit.

3.4 Influence de la découpe

Selon les courbes représentées dans la figure 9, nous remarquons que la teneur en eau des différentes découpes de pommes de terre diminue avec le temps de séchage, mais d'une manière variable d'une découpe à une autre.

Le temps de séchage le plus court correspond à la forme rondelle, puis la forme cubique et finalement la forme bâtonnet. L'augmentation de la surface spécifique de pomme de terre en forme rondelle entraîne une augmentation de la surface d'échange et par conséquent plus de transfert de chaleur et de matière.

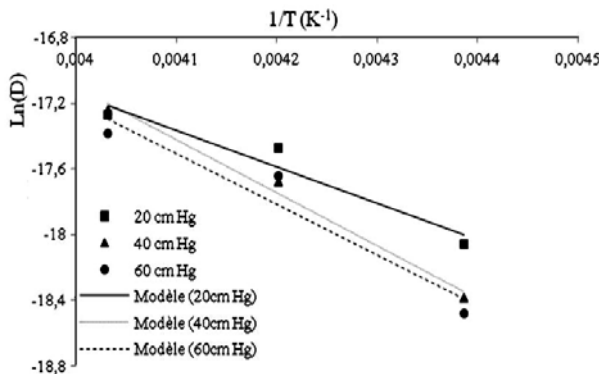


Fig. 8: Evolution de $\ln D$ en fonction de $1/T$

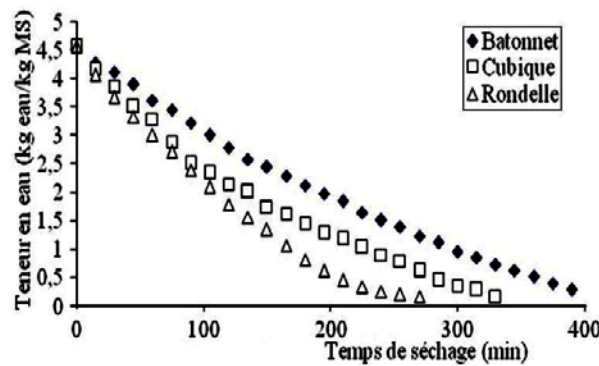


Fig. 9: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps pour les trois découpes à T = 55 °C et P = 40 cm Hg

3.5 Détermination du couple optimal (T, P)

Le résultat du test organoleptique a permis de déterminer le meilleur couple température-pression pour l'échantillon ayant les meilleurs critères (aspect, texture, couleur et saveur). Les résultats du test sont présentés dans le **tableau 2**.

L'échantillon n°2 séché à température 65 °C et pression 20 cm Hg, a eu le score le plus élevé. Sa couleur a été préservée car la température de séchage est relativement basse, la texture et l'aspect ont gardé une certaine homogénéité.

Tableau 2: Résultats du test organoleptique

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Température	55	65	75	55	65	75	55	65	75
Pression	20	20	20	40	40	40	60	60	60
Aspect (/5)	4	5	3	5	4	4	4	4	3
Texture (/5)	3	5	3	4	3	3	5	4	2
Couleur (/5)	2	4	2	3	4	4	3	2	4
Saveur (/5)	3	5	2	1	5	4	4	3	2
Total (/20)	12	19	10	13	16	15	16	13	11

4. CONCLUSION

Ce travail s'intéresse au séchage sous vide de la pomme de terre. Le produit séché présente un intérêt commercial certain. Sa transformation industrielle est développée essentiellement autour de la fabrication des produits frites et déshydratés.

Les résultats de ce travail ont montré que la température est la variable la plus importante lors du séchage sous vide des pommes de terre.

La pression a un effet moins important. Les valeurs obtenues pour la diffusivité massique varient entre $9,48 \times 10^{-9}$ et $3,26 \times 10^{-8}$ (m²/s) en fonction de la température et la pression.

Les valeurs de l'énergie d'activation sont 18,51; 25,71; 26,92 (kJ/mole) correspondant respectivement aux pressions (20, 40 et 60 cm Hg).

L'étude de la découpe a montré que la forme rondelle est la forme la plus appropriée pour le séchage avec une surface d'échange plus importante.

L'utilisation d'un test organoleptique basé sur 4 critères (aspect, texture, couleur et saveur) a permis de déterminer le couple optimal de séchage température-pression (température 65 °C et pression 20 cm Hg).

NOMENCLATURE

D : Diffusivité massique (m^2/s)	K : Constante de séchage (s^{-1})
D_0 : Facteur d'Arrhénius (m^2/s)	L : Epaisseur du produit (m)
E_a : Energie d'activation (kJ/mole MS)	M_0 : Teneur initiale (kg/kg MS)
M : Teneur en eau du produit (kg/kg MS)	T : Température de l'air (K)
M_e : Teneur à l'équilibre (kg/kg MS)	t : Temps (s)
R : Constante gaz parfaits (kJ/mole.K)	Z : Direction (m)

REFERENCES

- [1] Document, D.S.A.S.I., '*Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Informations*', Ministère de l'agriculture et du développement rural, Alger, 2003.
- [2] Document, '*Documentation de Travail Destinée aux Agents de Suivi de la Filière Pomme de Terre*', I.T.C.M.I., Institut Technique Des Cultures Maraîchères et Industrielles, Alger, 2006.
- [3] N. Leeratanarak, S. Devahastin and N. Chiewchan, '*Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques*', Journal of Food Engineering, Vol. 77, N°3, pp. 512 - 517, 2005.
- [4] M.A.M. Khraisheh, W.A.M. McMinn and T.R.A. Magee, '*Quality and Structural Changes in Starchy Foods during Microwave and Convective Drying*', Food Research International, Vol. 37, N°5, pp. 497 - 503, 2004.
- [5] M.K. Krokida, V.T. Karathanos and Z.B. Maroulis, '*Effect of Freeze-Drying Conditions on Shrinkage and Porosity of Dehydrated Agricultural Products*', Journal of Food Engineering, Vol. 35, N°4, pp. 369 - 380, 1998.
- [6] M.K. Krokida, V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis and D. Marinou-Kouris, '*Drying Kinetics of Some Vegetables*', Journal of Food Engineering, Vol. 59, N°4, pp. 391 - 403, 2002.
- [7] J. Srikiatden and J.S. Roberts, '*Measuring Moisture Diffusivity of Potato and Carrot (Core and Cortex) during Convective Hot Air and Isothermal Drying*', Journal of Food Engineering, Vol. 74, N°1, pp. 143 - 152, 2006.
- [8] W. Senadeera, B.R. Bhandari, G. Young and B. Wijesinghe, '*Influence of Shapes of Selected Vegetable Materials on Drying Kinetics During Fluidized Bed Drying*', Journal of Food Engineering, Vol. 58, N°3, pp. 277 - 283, 2003.
- [9] K.A. Rouibi, '*Influence de la Température, Pression, Découpe et Blanchiment sur les Cinétiques de Séchage de la Carotte*', Projet Fin d'Etude Ingénieur, Département d'Agronomie, Université de Batna, 2005.
- [10] I. Hassini, S. Azzouz and A. Belghith, '*Estimation of the Moisture Diffusion Coefficient of Potato During Hot Air Drying*', Drying 2004, Proceedings of the 14th International Drying Symposium, (IDS2007), Sao Paulo, Brazil, Vol. B, pp. 1488 - 1495, 22-25 August 2004.
- [11] N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis and D. Marinou-Kouris, '*Moisture Diffusivity Data Compilation In foodstuffs*', Drying Technology, Vol. 14, N°10, pp. 2225 - 2253, 1996.
- [12] T.M. Afzal and T. Abe, '*Diffusion in Potato During far Infrared Radiation Drying*', Journal of Food Engineering, Vol. 37, N°4, pp. 353 - 365, 1998.

- [13] S. Azzouz, A. Guizani, W. Jomaa and A. Belghith, 'Moisture Diffusivity and Drying Kinetic Equation of Convective Drying of Grapes', *Journal of Food Engineering*, Vol. 55, N°4, pp. 323 - 330, 2002.
- [14] O.D. Baik and M. Marcotte, 'Modeling the Moisture Diffusivity in a Baking Cake', *Journal of Food Engineering*, Vol. 56, N°1, pp. 27 - 36, 2003.
- [15] A. Benhamou, A. Idlimam, A. Lamharrar, B. Benyoucef and M. Kouhila, 'Diffusivité Hydrique et Cinétique de Séchage Solaire en Convection Forcée des Feuilles de Marjolaine', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°1, pp. 75 - 85, 2008.
- [16] C. Severini, A. Baiano, T. De Pilli, B.F. Carbone and A. Derossi, 'Combined Treatments of Blanching and Dehydration: Study on Potato Cubes', *Journal of Food Engineering*, Vol. 68, N°3, pp. 289 - 296, 2005.
- [17] M.E. Dauthy, 'Fruit and Vegetable Processing', F.A.O. Rome, 1995.
- [18] P.J. Do Amaral Sobral, A. Lebert and J.J. Bimbenet, 'Effet du Séchage sur le Rétrécissement de Cubes de Pomme de Terre', *Sciences des Aliments*, Vol. 21, N°3, pp. 231 - 242, 2001.
- [19] Document Afnor, 'Recueil des Normes Françaises', 2^{ème} édition, 1974.
- [20] J. Crank, 'Mathematics of Diffusion', 2nd ed., Oxford University Press, London, 1975.
- [21] N. Louka and K. Allaf, 'Expansion Ratio and Color Improvement of Dried Texturized by New Process 'Controlled Vegetables Sudden Decompression To The Vacuum'', 1/Application To Potatoes, Carrots And Onions', *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, N°2, pp. 233 - 238, 2005.
- [22] J.C. Cheftel, H. Cheftel and P. Besancon, 'Introduction à la biochimie et la technologie des aliments', Technologie et Documentation, Paris, 1980.
- [23] J.J. Bimbenet, A. Duquenoy and G. Trystram, 'Génie des Procédés Alimentaires', Dunod, Paris, 2002.