

Evaluation du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation du gingembre (*Zingiber officinale* Rosc.) lors du séchage artificiel en régime continu

[Evaluation of the diffusion coefficient and the activation energy of ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) during artificial drying in a continuous regime]

Karidioula Daouda¹, Kouakou Lébé Prisca Marie-Sandrine², Pohan Lemeyonouin Aliou Guillaume³, Assidjo Nogbou Emmanuel⁴, and Trokourey Albert⁵

¹UFR Sciences et Technologies, Laboratoire de chimie, Université de Man, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Constitution et de Réaction de la Matière, UFR SSMT, Université Félix Houphouët Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Département de Mathématiques, Physique et Chimie, UFR des Sciences Biologiques, Université Peleforo Gon Coulibaly, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

⁴UMRI Sciences des Procédés Alimentaires Chimiques et Environnementaux, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁵Laboratoire de chimie physique, UFR SSMT, Université Félix Houphouët Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study aimed to describe the behavior of ginger, and to predict its water content, during artificial drying under four temperatures (60 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C). Experiments were carried out on ginger using a DRY-Line type oven. The obtained data was fitted using 4 semi-empirical thin layer drying models. Among the semi-empirical models considered, the diffusion approach model was chosen as the most appropriate model to describe the behavior of ginger. For the different temperatures, he presented respectively the coefficients (r) of 0.9970; 0.9974; 0.9949 and 0.9942; the coefficients Chi-square (χ^2) of 4.0306×10^{-6} , 3.7015×10^{-7} ; 1.6387×10^{-7} and 1.3637×10^{-6} and Root Mean Square Errors (RMSE) of 3.5851×10^{-4} ; 1.1415×10^{-4} ; 9.2226×10^{-5} and 2.6604×10^{-4} for the four temperatures. The diffusion coefficient varies from 9.585×10^{-9} to 3.466×10^{-8} m²/s and strongly depends on the drying temperature. The activation energy is estimated at 24.188 kJ/mol.

KEYWORDS: Ginger, Mathematical models, Drying kinetics, Diffusion coefficient, Activation energy.

RESUME: Cette étude a eu pour objectif de décrire le comportement du gingembre, et de prédire sa teneur en eau, au cours d'un séchage artificiel sous quatre température (60 °C, 80°C, 100°C, 120°C). Des expériences ont été effectuées sur du gingembre à l'aide d'une étuve de type DRY-Line. Les données obtenues ont été ajustées à l'aide de 4 modèles semi-empiriques de séchage sur couche mince. Parmi les modèles semi empiriques considérés, le modèle de l'approche diffusion a été choisi comme le modèle le plus approprié à décrire le comportement du gingembre. Pour les différentes températures, il a présenté respectivement les coefficients r de 0,9970; 0,9974; 0,9949 et 0,9942; les coefficients Khi carré (χ^2) de $4,0306.10^{-6}$, $3,7015.10^{-7}$; $1,6387.10^{-7}$ et $1,3637.10^{-6}$ et des erreurs quadratique moyenne (EQM) de $3,5851.10^{-4}$; $1,1415.10^{-4}$; $9,2226.10^{-5}$ et $2,6604.10^{-4}$ pour les quatre températures. Le coefficient de diffusion varie de $9,585.10^{-9}$ à $3,466.10^{-8}$ m²/s et dépend fortement de la température de séchage. L'énergie d'activation est estimée à 24,188 kJ / mol.

MOTS-CLEFS: Gingembre, Modèles mathématiques, Cinétique de séchage, Coefficient de diffusion, Energie d'activation.

1. INTRODUCTION

Le séchage est l'une des plus vieilles techniques de conservation des produits agricoles. C'est une technique d'élimination de l'eau qui implique un transfert de chaleur et de masse.

Elle constitue un moyen approprié pour freiner les pertes post-récolte et étendre la consommation du produit aux périodes de non-production.

Ce procédé facilite également le transport des aliments vers les centres urbains [1].

Le séchage est une opération largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire, mais de façon artisanale par les agriculteurs africains. Ce processus qui permet de stabiliser le produit par abaissement de l'activité de l'eau, doit respecter un certain nombre de critères de qualité du produit [2].

La prévision de la cinétique de séchage des produits agricoles est alors indispensable pour concevoir une installation de séchage ou pour déterminer les conditions optimales de son fonctionnement [3]. Si les travaux relatifs au séchage des produits agroalimentaires tels la pomme de terre, le café, le cacao, la betterave, le riz, le maïs ont été largement développés au cours des dernières années, il n'en est pas de même pour certains produits tropicaux, en particulier le gingembre pour lequel très peu d'articles existent à notre connaissance.

Cette étude a eu pour objectifs:

- de déterminer un modèle empirique capable de décrire le comportement de l'eau dans le gingembre au cours du séchage et de prédire sa teneur en eau;
- de déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS) du gingembre;
- d'évaluer le coefficient de diffusion et l'énergie d'activation du gingembre.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. DESCRIPTION DU SYSTEME DE SECHAGE

Les expériences de séchage du gingembre ont été effectuées à l'aide d'une étuve de type DRY-Line. Cette étuve est utilisée comme une chambre de température constante dans laquelle des échantillons de même masse sont séchés à différentes températures (60 °C; 80 °C; 100 °C et 120 °C). La Figure 1 présente le dispositif de séchage employé.



Fig. 1. Etuve de laboratoire

2.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le protocole expérimental consiste à peser à intervalle de temps régulier ces échantillons ayant séjourné dans l'étuve pendant quelques minutes pour chaque température.

Six (06) essais de séchage pour chacune de ces températures, ont été menés et la perte différentielle de masse des échantillons a été effectuée par pesée gravimétrique statique à l'aide d'une balance (Sartorius, A200S, France) jusqu'à ce que la différence entre trois (03) pesées successives (chaque intervalle de temps) n'excède la valeur de 0,001 [4].

En fin de séchage, la teneur en eau résiduelle a été déterminée en plaçant les échantillons dans une enceinte de dessiccation à 105 °C pendant 24 h [5].

2.3. CINÉTIQUE DE SÉCHAGE ET MODÉLISATION SEMI-EMPIRIQUE

La teneur en eau des échantillons à tout instant t a été transformée en teneur en eau réduite [6]. Cette dernière est calculée selon l'équation (1):

$$Xr = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Avec

X : la teneur en eau de l'échantillon à tout instant t (kg d'eau/kg de matière sèche);

X_0 : la teneur en eau initiale (kg d'eau/kg de matière sèche);

X_e : la teneur en eau à l'équilibre.

La teneur en eau réduite a été simplifiée par l'équation (2) parce que X_e est relativement négligeable devant X et X_0 [7-8].

$$Xr = \frac{X}{X_0} \quad (2)$$

La détermination des modèles a consisté à établir à l'aide de la méthode de régression non linéaire, une corrélation qui donne l'évolution de la teneur en eau réduite (Xr) du gingembre en fonction du temps. Quatre (04) modèles mathématiques de séchage en couche mince (tableau 1), ont été utilisés. Les ajustements ont été effectués sur le logiciel Matlab R2012a (MathWorks Inc., Massachusetts, USA).

Tableau 1. Modèles mathématiques de séchage testés

MODELES	EQUATIONS MATHÉMATIQUES	REFERENCES
Approche-Diffusion	$Xr = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[9]
Henderson et Pabis	$Xr = a \exp(-kt)$	[10]
Thomson	$t = a \ln(Xr) + b (\ln(Xr))^2$	[11]
Wang et Singh	$Xr = 1 + at + bt^2$	[12]

Avec: a , b , k ; les paramètres et coefficients à déterminer.

Les critères d'évaluation de la qualité de lissage sont: le coefficient de corrélation r et les paramètres statistiques: Khi carré réduit (χ^2) et l'erreur Quadratique Moyenne (EQM):

Coefficient de détermination :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Xr_{exp,i} - \bar{X}r_{exp})(Xr_{pre,i} - \bar{X}r_{pre}) / N}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (Xr_{exp,i} - \bar{X}r_{exp})^2] * [\sum_{i=1}^N (Xr_{pre,i} - \bar{X}r_{pre})^2]}} \quad (3)$$

Khi carré réduit:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Xr_{exp,i} - Xr_{pre,i})^2}{N - P} \quad (4)$$

Erreur Quadratique Moyenne:

$$EQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Xr_{exp,i} - Xr_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$Xr_{exp,i}$: Teneur en eau réduite expérimentale pour la i ème observation;

$Xr_{pre,i}$: Teneur en eau réduite prédite pour la i ème observation;

N: Nombre d'observations;

P: Nombre de coefficients dans le modèle

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

L'évolution des teneurs en eau réduite (X_r) en fonction du temps de séchage du gingembre, est présentée à la Figure 2.

Les courbes des teneurs en eau réduite ont les mêmes allures. Elles ont une forme exponentielle décroissante. On observe l'absence de la phase de séchage à vitesse constante.

On remarque que la température a une forte influence sur la cinétique de séchage en régime continu du gingembre.

Ces résultats sont en accord avec ceux observés lors du séchage de différents produits [13,14-15].

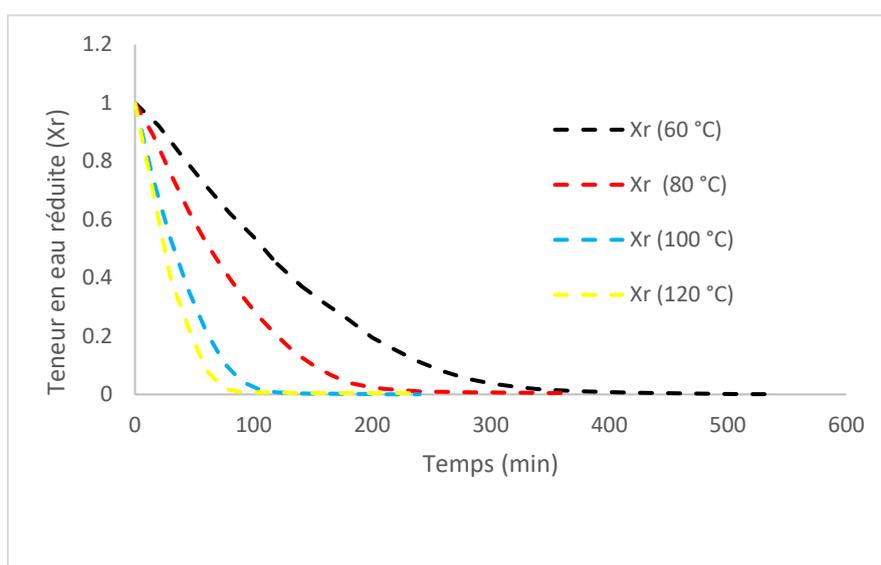


Fig. 2. Evolution des teneurs en eau réduites expérimentales du gingembre en fonction du temps

3.2. MODELISATION DES COURBES DE SÉCHAGE

Des calculs d'ajustement de l'évolution des différentes courbes (Figure 2) en fonction du temps de séchage ont été effectués pour les quatre modèles de séchage donnés dans le tableau 1.

Les paramètres statistiques utilisés pour évaluer la performance des modèles semi-empirique à décrire le comportement du gingembre au cours du séchage convectif, sont résumés au Tableau 2. L'analyse du tableau 2 montre que les coefficients (r) varient de 0,9707 à 0,9974; ces valeurs indiquent que les modèles employés ajustent de manière acceptable les valeurs expérimentales.

En outre, l'analyse des valeurs des paramètres (χ^2) et (EQM) met en relief la bonne aptitude du modèle approche diffusion à prédire l'évolution de la teneur en eau du gingembre de 60 °C à 120 °C. En effet ce modèle donne les plus grandes valeurs du coefficient (r), et les plus faibles valeurs des paramètres (χ^2) et (EQM) pour les quatre plages de température.

Tableau 2. Analyse statistique de corrélation des modèles

Modèles	Corrélation	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Approche-Diffusion	r	0,9970	0,9974	0,9949	0,9942
	χ^2	$4,0306.10^{-6}$	$3,7015.10^{-7}$	$1,6387.10^{-7}$	$1,3637.10^{-6}$
	EQM	$3,5851.10^{-4}$	$1,1415.10^{-4}$	$9,2226.10^{-5}$	$2,6604.10^{-4}$
Henderson et Pabis	r	0,9932	0,9946	0,9942	0,9921
	χ^2	$5,2184.10^{-6}$	$4,1782.10^{-7}$	$4,2103.10^{-7}$	$2,0571.10^{-6}$
	EQM	$4,1600.10^{-4}$	$1,2400.10^{-4}$	$1,4281.10^{-4}$	$3,6879.10^{-4}$
Thomson	r	0,9949	0,9836	0,9888	0,8863
	χ^2	27,4942	81,8719	27,2685	309,7575
	EQM	0,9549	1,7358	1,1897	4,0097
Wang et Singh	r	0,9954	0,9905	0,9707	0,9299
	χ^2	$2,0618.10^{-4}$	$4,2895.10^{-4}$	0,0014	0,0025
	EQM	0,0026	0,0040	0,0084	0,0115

Le tableau 3 présente les valeurs des coefficients du modèle.

Tableau 3. Valeurs des constantes de séchage et des coefficients du modèle

Modèle	Température	a	b	k
Approche-Diffusion	60 °C	-0,1528	0,1263	0,0684
	80 °C	-0,0952	0,1585	0,0872
	100 °C	0,0469	0,2105	0,1152
	120 °C	0,0854	0,2431	0,1272

Les teneurs en eau prédite Xrsim (approche diffusion) et expérimental (Xr) pour les différentes températures, sont présentées sur la Figure 3.

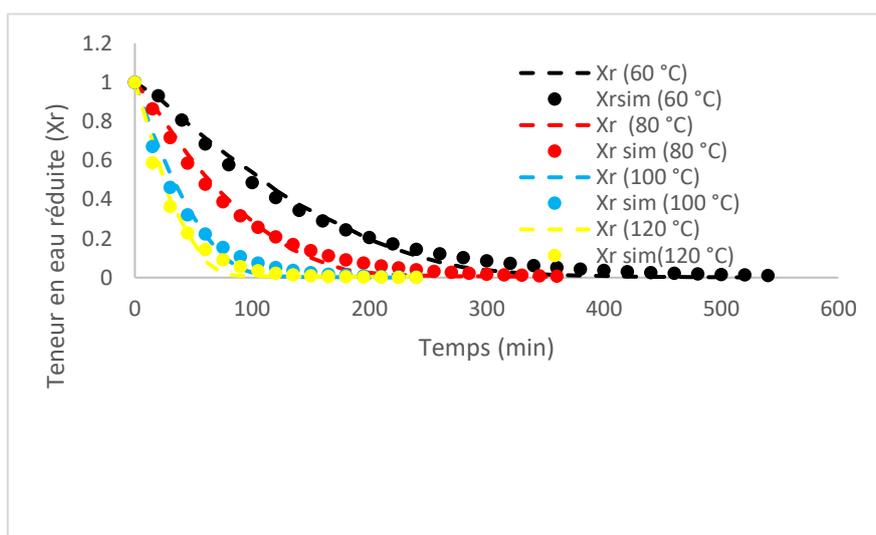


Fig. 3. Evolution des teneurs en eau réduites expérimentale et simulées du gingembre en fonction du temps

Afin de tenir compte de l'effet de la température de séchage sur les constantes du modèle approche diffusion, a, b et k ont été régressées, en utilisant une analyse de régression multiple par rapport à la température de l'air de séchage.

Le modèle de teneur en eau réduite (X_r) qui traduit le séchage du gingembre est donc le suivant:

$$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$$

Avec :

$$a = -10^{-5} T^2 + 0,0064 T - 0,5052 \quad r = 0,9768$$

$$b = 2 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,002 T + 0,0054 \quad r = 0,9953$$

$$k = -4 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0018 T - 0,0248 \quad r = 0,9925$$

(6)

3.3. COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE (CCS)

La courbe caractéristique de séchage (C.C.S) est importante pour décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelles conditions de l'air connaissant les valeurs initiales de la teneur en eau et la teneur en eau d'équilibre [16].

Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous une forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique [7].

La démarche suivie est de représenter les vitesses de séchage normées ou réduite (V_r) en fonction des teneurs en eau réduites (X_r) (Figure 4).

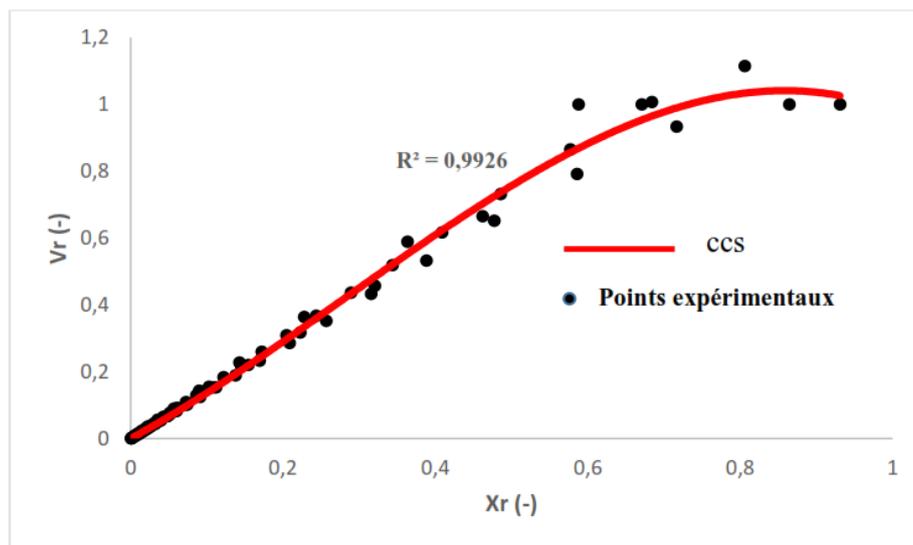


Fig. 4. Courbe caractéristique de séchage du gingembre

Le lissage de la courbe caractéristique de séchage du gingembre a permis de déterminer l'équation de la vitesse de séchage sous forme d'un polynôme de degré 3:

$$V_r = 1,2458 \cdot V_r + 1,3327 \cdot V_r^2 - 1,5975 \cdot V_r^3 \quad (7)$$

3.4. COEFFICIENT DE DIFFUSION

Les résultats expérimentaux peuvent être traités par l'équation de la diffusion de Fick.

En supposant que:

- la distribution initiale d'humidité est uniforme,
- le mouvement d'humidité se fait par diffusion,

- le rétrécissement est négligeable,
- et que le coefficient de diffusion est constant à une température;

La solution analytique de la deuxième loi de Fick dans la géométrie du produit, peut être exprimée par:

$$Xr = \frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (8)$$

Avec:

- D_{eff} est le coefficient de diffusivité effectif (m²/s);
- L est la demi-épaisseur de la dalle (m) et
- n, un entier positif.

Pour les longues périodes de séchage ($Xr < 0,6$), l'équation (8) peut être simplifiée au premier terme de la série [25]. Ainsi, la prise du logarithme népérien dans les deux membres de l'équation (8) donne la relation suivante:

$$\ln Xr = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

Le coefficient effectif de diffusion est déterminé en traçant les données expérimentales de séchage en termes de $\ln(Xr)$ en fonction du temps de séchage.

Le tracé de l'équation (9) donne une ligne droite avec une pente:

$$k = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (10)$$

Cette pente fournit la valeur du coefficient de diffusion.

Les valeurs de D_{eff} pour les différentes températures sont consignées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4. Valeurs de D_{eff} du gingembre pour les différentes températures

T (°C)	60	80	100	120
D_{eff} (m ² /s)	$9,585.10^{-9}$	$1,527.10^{-8}$	$2,708.10^{-8}$	$3,466.10^{-8}$

Le coefficient effectif de diffusion du gingembre aux différentes températures 60, 80, 100 et 120 °C varie dans la gamme de $9,585.10^{-9}$ à $3,466.10^{-8}$ m²/s. Les valeurs de D_{eff} augmentent avec la température (**Tableau 4**).

Ces valeurs sont comparables à quelques autres rapportées dans la littérature:

$2,641 - 5,711. 10^{-9}$ m²/s concernant les haricots verts [17], de $2,15.10^{-8} - 1,71.10^{-7}$ m²/s pour la menthe [18].

3.5. ENERGIE D'ACTIVATION

Le coefficient effectif de diffusion peut être relié avec la température par l'expression d'Arrhenius [19] comme suit:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

Où D_0 est la constante dans l'équation d'Arrhenius (m²/s), E_a est l'énergie d'activation (kJ/mol), T est la température de séchage (K) et R est la constante des gaz parfaits (kJ/mol. K). L'équation (10) peut être réarrangée sous la forme:

La représentation de $\ln(D_{eff})$ en fonction de $(1/T)$ est une droite (figure 5); de la pente de cette droite, on déduit l'énergie d'activation $E_a = 24,188$ kJ/mol du gingembre.

L'ordonnée à l'origine de cette droite donne une valeur de $D_0 = 6.10^{-5}$ m²/s.

Ces valeurs se situent dans la même plage que d'autres produits agricoles [20-21] et très proches des valeurs observées par Simal et al [17] et Doymaz [22] respectivement lors du séchage du pois vert et de la carotte.

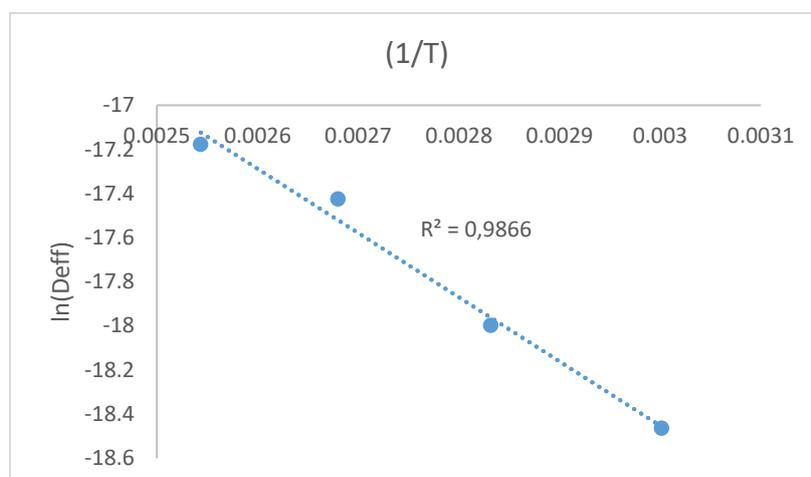


Fig. 5. Evolution de $\ln(D_{eff})$ en fonction de $1/T$

4. CONCLUSION

Des expériences de séchage du gingembre en régime continu ont été effectuées à différentes températures (60, 80, 100 et 120 °C).

D'après les résultats obtenus, on peut noter que les courbes de séchage affichent une seule phase à allure décroissante (phase II). Les courbes caractérisant la cinétique de séchage montrent que lorsque la température est élevée, le temps de séchage diminue considérablement.

Le modèle approche diffusion a présenté les valeurs du coefficient (r) les plus élevées et les plus faibles valeurs des paramètres χ^2 et **EQM** pour les différentes températures d'essais. Il a donc présenté les meilleures aptitudes à prédire le comportement du gingembre au cours du séchage.

Les valeurs du coefficient de diffusion calculées pour les températures 60 °C, 80 °C, 100 °C et 120 °C varient de $9,585 \cdot 10^{-9}$ à $3,466 \cdot 10^{-8}$ m²/s et elles augmentent au fur et à mesure que la température de l'air augmente. L'énergie d'activation a été calculée en utilisant l'équation d'Arrhenius, et elle s'élève à 24,188 kJ/mol.

REFERENCES

- [1] C. Ahouanou, Y. Jannot, B. Lips, A. Lallemand, Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux: manioc, gingembre et gombo. *Sciences des aliments*, vol.20, pp. 413-432, 2000.
- [2] IGLESIAS H.A., CHIRIFE J. *Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components*. Academic Press, New-York, 1982.
- [3] DAUDIN J.D., BIMBENET J.J. Détermination expérimentale du comportement des produits solides lors du séchage par entraînement. *Ind. Alim. Agric.*, 99^e année, vol.4, pp. 226-235, 1982.
- [4] M. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, A. MIR, M. Kaoua, Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires. *Rev. Gen. Therm.*, pp. 380-381: 444-453, 1993.
- [5] AOAC. *Official Methods of Analysis (18th edn)*. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC, Moisture Content in Plants, vol.1 p 949, 2005.
- [6] Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeials, A. & Farhang, A. Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol.12, no. 2, pp. 121-127, 2013.
- [7] Akmel, D. C., Assidjo, E. N., Kouamé, P. & Yao, K. B. Mathematical Modelling of Sun Drying Kinetics of Thin Layer Cocoa (Theobroma Cacao) Beans. *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 5, no. 9, pp. 1110-1116, 2009.
- [8] Haoua, A. Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse de doctorat, *Université Louis Pasteur Strasbourg I*, Strasbourg, France. p 205, 2007.

- [9] A. Gowen, N. Abu-ghannam, J. Oliviera, Modelling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot air drying. *Innov. Food Sci. Emerg.*, no. 9, pp. 129-137, 2008. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.06.009
- [10] N. Abouo, D. Akmel, K. Kakou, N. Assidjo, N. Amani, K. Yao. *Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa bean in microwave oven and sun*. *Food Environ. Saf.*, vol. 14, no. 2, pp. 127-137, 2015.
- [11] Paulsen, M.R. and T.L. Thomson. Drying end uses of grain sorghum. *Transactions of the ASAE*, vol. 16 pp.537-540, 1973.
- [12] C. Y. Wang, R. P. Singh. A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper no: 3001*, 1978.
- [13] Ertekin, C. and O. Yaldiz. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, vol. 63, pp. 349-359, 2004.
- [14] Sabarez, H.T. and W.E. Price. A diffusion model for prune dehydration. *Journal of Food Engineering*, vol. 42, pp.167-172, 1999.
- [15] Erenturk, S., M.S. Gulaboglu and S. Gultekin. The thin-layer drying characteristics of rosehip. *Biosystems Engineering*, vol.89, pp.159-166, 2004.
- [16] G.B. Noumi, E. Ngameni, C. Kapseu, M. Permentier. *Variation de la composition en acide gras et en triglycérides de l'huile des fruits de l'aïélé en fonction des conditions d'extraction et de la couleur du fruit*. *La rivista italiana delle sostanze grasse*, vol. 79, pp. 315-318, 2002.
- [17] S. Simal, A. Mulet, J. Tarrazo and C. Rosello. 'Drying Models for Green Peas', *Food Chemistry*, Vol. 55, no. 2, pp. 121 - 128, 1996.
- [18] A. Aghfir, S. Akkad, M. Rhazi, C.S.E. Kane, M. Kouhila. Détermination du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation de la menthe lors d'un séchage conductif en régime continu. *Revue des Energies Renouvelables* vol. 11, no. 3, pp. 385 – 394, 2008.
- [19] A. Lopez, A. Iguaz, A. Esnoz and P. Virseda. 'Thin Layer Drying Behaviour of Vegetable Wastes From Wholesale Market', *Drying Technology*, Vol. 18, pp. 995 - 1006, 2000.
- [20] Akpinar, E.K. Determination of Suitable Thin Layer Drying Curve Model for Some Vegetables and Fruits. *Journal of Food Engineering*, vol.73, pp.75-84, 2006.
- [21] Sabarez, H.T. and W.E. Price. A diffusion model for prune dehydration. *Journal of Food Engineering*, vol.42, pp.167-172, 1999.
- [22] I. Doymaz, 'Thin- Layer Drying Behaviour of Mint Leaves (*Mentha Spicata* L.)'. *Journal of Food Engineering*, Vol. 74, pp. 370 – 375, 2006.