

## Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine

A. Benhamou<sup>1</sup>, A. Idlimam<sup>2</sup>, A. Lamharrar<sup>2</sup>, B. Benyoucef<sup>3</sup> et M. Kouhila<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique  
Université M'Hammed Bouguerra, Boumerdès, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire d'Energie Solaire et Plantes Médicinales  
Ecole Normale Supérieure, B.P. 2400, Marrakech, Maroc

<sup>3</sup> Unité de Recherche en Matériaux et Energies Renouvelables  
Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie

(reçu le 10 Mars 2008 – Accepté le 30 Mars 2008)

**Résumé** - Ce travail se propose de contribuer à l'optimisation d'un séchoir solaire polyvalent pour plantes aromatiques et médicinales, en déterminant expérimentalement la courbe caractéristique de séchage convectif des feuilles de marjolaine. La cinétique de séchage est étudiée pour trois températures (40, 50 et 60 °C) et pour deux débits d'air asséchant (0,028 et 0,056 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). L'augmentation de la température dans le milieu a réduit de manière significative le temps de séchage. Les données de séchage de ce produit ont été analysées pour obtenir les valeurs de la diffusivité effective lors de la période de séchage à allure décroissante. Dans cette période, le transfert d'humidité à partir des feuilles de marjolaine a été décrit en appliquant le modèle diffusif de Fick. La diffusivité effective a varié entre 7,19 10<sup>-12</sup> et 1,17 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> avec l'augmentation de la température du milieu. La relation d'Arrhénius avec une valeur d'énergie d'activation moyenne de 82 kJ.mol<sup>-1</sup> a exprimé l'effet de la température sur la diffusivité effective. La vitesse de séchage est déterminée empiriquement à partir de la courbe caractéristique de séchage. Sept modèles mathématiques ont été utilisés pour la description des courbes de séchage. Le modèle mathématique 'Logarithmique' semble le plus adéquat pour décrire les courbes de séchage des feuilles de marjolaine avec un coefficient de corrélation  $r$  voisin de l'unité et dans des conditions aérothermiques contrôlées.

**Abstract** - This work is to contribute to the optimization of a multi-purpose solar dryer for aromatic and medicinal plants, determining experimentally the curve characteristic drying convective marjoram leaves. The kinetics drying is studied for three temperatures (40, 50 and 60 °C) and for two airflows drying (0.028 and 0.056 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). The increased temperatures in the middle has significantly reduced drying time. The drying of this product have been analysed to obtain values of the effective diffusivity during the drying period with decreasing speed. In this period, the transfer of moisture from the leaves of marjoram has been described by applying the model dissipative Fick. The effective diffusivity ranged from 7.19 10<sup>-12</sup> and 1.17 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> with increasing temperature of the environment. The Arrhenius relationship with a value activation energy averaged 82 kJ.mol<sup>-1</sup> expressed the effect of temperature on the effective diffusivity. The drying speed is determined empirically from the characteristic drying curve. Sept mathematical models have been used for the description of drying curves. The mathematical model 'Logarithmic' seems the most appropriate to describe the drying curves marjoram leaves with a correlation coefficient close  $r$  to unity and in conditions aero thermal controlled.

**Mots clés:** Cinétique de séchage - Diffusivité - Energie d'activation - Energie solaire - Marjolaine - Modélisation.

### 1. INTRODUCTION

La relation entre la durée de conservation d'un produit alimentaire et son degré d'hydratation est connue depuis toujours. L'eau intervient dans un très grand nombre de phénomènes d'altération: modifications biochimiques ou biophysiques, réactions enzymatiques ou encore processus d'ordre microbiologique. La durée de conservation pourra être considérablement

augmentée par abaissement de l'activité de l'eau, quelle que soit la technique mise en œuvre pour réduire cette activité: séchage, salage, ...

Dans le secteur agroalimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération du séchage [1-3]. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. A cet égard, le séchage solaire constitue une solution adéquate pour les pays pauvres en ressources énergétiques conventionnelles et disposant d'un gisement solaire important durant toute l'année [3, 4].

Les cinétiques de séchage des feuilles de marjolaine sont étudiées, à l'aide d'un séchoir solaire muni d'un appoint électrique et fonctionnant en convection forcée. Le but de cette étude est de contribuer à l'analyse et à la compréhension des mécanismes diffusionnels qui influent le processus de séchage des plantes médicinales. Les conditions aérothermiques de fonctionnement du séchoir ont été étudiées sans que la qualité organoleptique et nutritionnelle du produit soit altérée [5-7].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'approche macroscopique expérimentale qui consiste à déterminer le comportement cinétique des feuilles de marjolaine au cours de son séchage dans des conditions de température et de débit d'air contrôlées à l'aide d'un séchoir indirect à couche mince partiellement solaire fonctionnant en convection forcée installé au Laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure de Marrakech [8-10]. Les différents essais expérimentaux consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, humidité de l'air, débit) sur le processus de séchage. La vitesse de séchage est déterminée d'une façon empirique à partir la courbe caractéristique de séchage (CCS). Les courbes expérimentales de séchage obtenues sont approchées par sept modèles mathématiques existant dans la littérature. Ceci nous a permis de déterminer les coefficients de diffusion effectif et l'énergie d'activation correspondant et d'analyser les mécanismes relatifs au processus de séchage [11].

## 2. FORMULATION MATHÉMATIQUE

### 2.1 Teneur en eau et courbe caractéristique de séchage

Durant toutes les expériences, on fixe la température et le débit d'air asséchant et on suit l'évolution de la masse humide ( $M_h(t)$ ) du produit à sécher au cours du temps par pesées successives jusqu'à ce qu'elle devienne stationnaire. On procède ensuite à la déshydratation du produit dans une étuve à 105 °C pendant 24 h dans le but de déterminer la masse sèche ( $M_s$ ) du produit. La teneur en eau en base sèche à un instant  $t$  est définie par:

$$X(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (1)$$

La teneur en eau finale est une caractéristique de chaque produit. C'est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et organoleptiques (forme, texture, couleur, odeur et huiles essentielles) [12].

La détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau à partir des points expérimentaux en utilisant des logiciels appropriés.

Le principe de la méthode développée par Van Meel [13] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant  $t$   $\left( -\frac{dX}{dt} \right)$  à la vitesse de première

phase  $\left( -\frac{dX}{dt} \right)_I$ , dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite

$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$ . Etant donné que la première phase est absente dans le cas des produits

agroalimentaires, alors on prend  $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$  et  $X_{\text{cri}} = X_0$ . Ainsi, la forme générale de l'équation de la courbe caractéristique de séchage est donnée par  $f = f(X^*)$ :

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{\text{eq}}}{X_{\text{cri}} - X_{\text{eq}}} = \frac{X(t) - X_{\text{eq}}}{X_0 - X_{\text{eq}}} \quad (2)$$

$$\text{Ordonnée: } f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1} = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0} \quad (3)$$

La teneur en eau d'équilibre  $X_{\text{eq}}$  est déterminée à partir des isothermes de désorption du produit.

Pour une gamme raisonnable de conditions expérimentales constantes durant le séchage (température, vitesse, humidité de l'air et dimensions du produit à sécher), la courbe caractéristique de séchage (CCS) vérifie les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} f = 0 & \text{pour } X^* = 0 \\ 0 \leq f \leq 1 & \text{pour } 0 \leq X^* \leq 1 \\ f = 1 & \text{pour } X^* \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 Critère de choix du modèle approprié

Plusieurs modèles empiriques ou semi empiriques sont utilisés pour décrire les cinétiques de séchage et prédire la teneur en eau réduite  $X^*$  en fonction du temps de séchage [9, 14-17]. Pour décrire l'allure de séchage des feuilles de marjolaine et déterminer l'équation empirique la plus adéquate, nous avons utilisé sept modèles de séchage en couche mince des plantes médicinales [7, 9, 18, 19]. Le **Tableau 1** regroupe les équations empiriques de séchage utilisées dans la modélisation.

**Tableau 1:** Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage des feuilles de marjolaine [18, 19]

Nom du modèle	Expression du modèle
Newton	$X^* = \exp(-k t)$
Page	$X^* = \exp(-k t^n)$
Logarithmique	$X^* = a \exp(-k t) + c$
Two-term	$X^* = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Wang and Singh	$X^* = 1 + a t + b t^2$
Verna <i>et al.</i>	$X^* = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_0 t)$

Le modèle approprié à la description de l'allure de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine est choisi selon les critères suivants:

- Coefficient de corrélation ( $r$ ) élevé
- Erreur systématique moyenne (ESM) minimale
- $\chi$ -carrée réduite minimale.

Ces paramètres statistiques sont définis par:

$$\text{ESM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{pre},i}^* - X_{\text{exp},i}^*) \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{pre},i}^* - X_{\text{exp},i}^*)^2}{N - n} \quad (6)$$

### 2.3 Diffusivité effective et énergie d'activation

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau. Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de la teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde loi de Fick [20]:

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 X^* \quad (7)$$

avec  $D_{\text{eff}}$ , diffusivité effective (en  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) qui, le plus souvent, varie avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par la rétraction de la matrice solide.

La solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par Crank [21], dans le cas d'une plaque infinie, en assumant la distribution initiale uniforme d'humidité, avec la simplification du mouvement d'humidité par diffusion, rétrécissement négligeable, coefficients de diffusion constants et la température peut être exprimée par:

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4 L^2} \right] \quad (8)$$

Lorsque le temps est suffisamment grand, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier et on obtient:

$$X^* \cong \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4 L^2} \right] \quad (9)$$

où  $L$  (m) est la demi épaisseur de la feuille de marjolaine.

L'origine de l'autodiffusion est l'agitation thermique. La diffusion est donc thermiquement activée, et le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{R T} \right) \quad (10)$$

où  $D_0$  est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $E_a$  l'énergie d'activation ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), qui est l'équivalent d'une barrière de potentiel qui s'oppose à l'avancement de la réaction,  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) et  $T$  est la température de l'air asséchant en K [22, 23].

## 3. MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

L'appareillage expérimental utilisé pour étudier les cinétiques de séchage des feuilles de marjolaine est un séchoir convectif indirect partiellement solaire fonctionnant en convection forcée (Fig. 1). Il s'agit d'un système sans stockage et avec recyclage total ou partiel d'air [9, 15, 16, 24]. C'est un prototype de séchoir réel destiné aux petites exploitations agricoles.

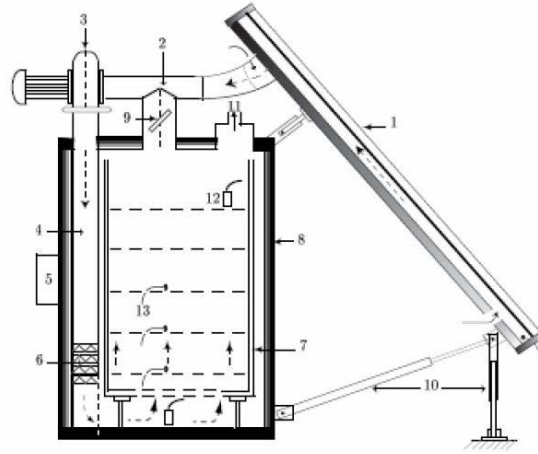


Fig. 1: Coupe schématique du séchoir solaire indirect (LESPAM, ENS Marrakech, Maroc)

- (1) insulateur, (2) conduite de ventilation, (3) ventilateur, (4) conduit d'aspiration,  
 (5) boîte de commande, (6) appoint électrique, (7) étages, (8) armoire de séchage,  
 (9) volet d'air, (10) entrée d'air, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité, (13) thermocouple

Les feuilles de marjolaine sont pesées et réparties en couche mince sur des claies en plastique dans la chambre de séchage. La densité de chargement de chaque claie est  $3 \text{ kg/m}^2$  de produit frais. Des études antérieures ont montré que le produit de la claie inférieure sèche plus vite que celui de la claie supérieure [24, 25]. Ainsi, durant tous les essais, seul la première claie est utilisée. Les échantillons sont uniformément et régulièrement répartis en couche mince afin d'assurer une homogénéité de diffusion lors de l'opération de séchage.

La variation de la masse humide du produit  $M_h(t)$  en fonction du temps est déterminée en faisant des pesées successives d'une durée de 30 s, au moyen d'une balance de précision  $\pm 0,001 \text{ g}$ . Le pas de temps varie de 10 min au début des essais jusqu'à 1 h vers la fin de l'expérience. A la fin de chaque expérience, on procède à l'étuvage du produit séché à  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 24 h pour déterminer sa masse sèche  $M_s$ . La teneur en eau des échantillons en fonction du temps est obtenue en appliquant l'équation 1.

#### 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les différentes conditions expérimentales de séchage sont présentées dans le **Tableau 2**. Les expériences de séchage sont réalisées pour trois températures de l'air asséchant ( $40, 50$  et  $60 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et pour deux débits d'air ( $0,028$  et  $0,056 \pm 0,002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps est présentée dans la figure 2 pour l'ensemble des six essais (deux débits et trois températures de l'air asséchant).

**Tableau 2:** Conditions expérimentales de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine

N°Essai	$D_v \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$\theta \pm 0.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$	$H_a \pm 2 \text{ (\%)}$	t (min)
1	0,028	40	53,1	425
2	0,028	50	47,3	105
3	0,028	60	43,0	80
4	0,056	40	45,2	340
5	0,056	50	46,5	90
6	0,056	60	49,5	40

Les courbes expérimentales décrivant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps et de la teneur en eau sont présentées respectivement dans les figures 3 et 4. Les différentes courbes expérimentales obtenues ont montré une allure de séchage décroissante. Cependant, on note l'absence de la phase 0 (phase à allure croissante) et de la phase I (à allure constante), et la présence unique de la phase II (à allure décroissante) dans les courbes de séchage solaire convectif en couches minces des feuilles de marjolaine. Les mêmes résultats ont été obtenus pour différents produits végétaux [24, 26-28]. Le séchage durant la phase à allure décroissante est régi par la diffusion d'eau dans le solide. C'est un mécanisme complexe impliquant l'eau dans deux états liquide et vapeur, qui est souvent caractérisé par la diffusion effective. Cette propriété dépend de la température, de la pression et de la teneur en eau du produit [29, 30].

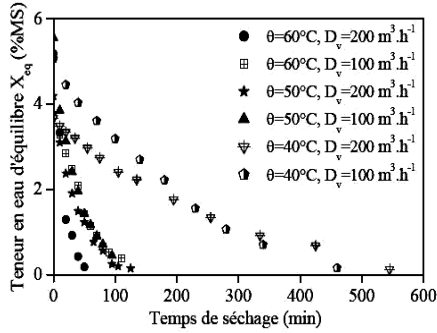


Fig. 2: Evolution de la teneur en eau des feuilles de marjolaine en fonction du temps de séchage pour différentes conditions de l'air asséchant

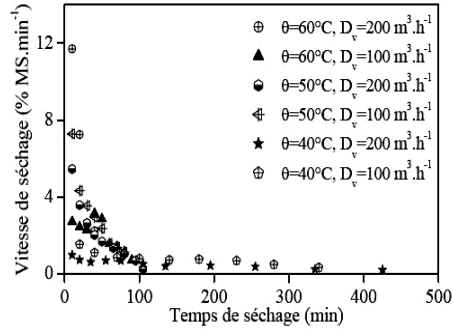


Fig. 3: Evolution de la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine en fonction du temps de séchage pour différentes conditions de l'air asséchant

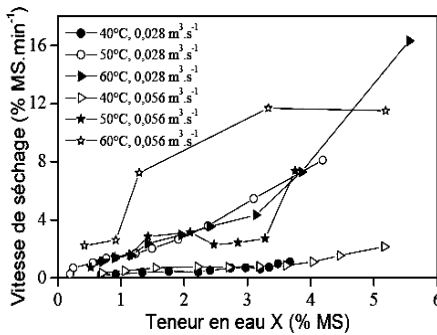


Fig. 4: Evolution de la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine en fonction de la teneur en eau pour différentes conditions de l'air asséchant

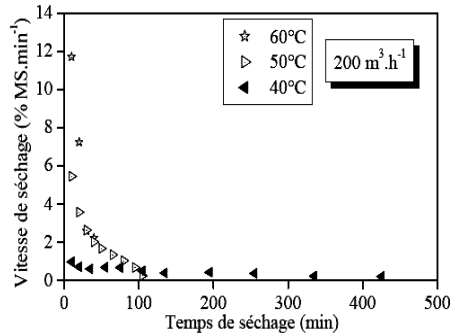


Fig. 5: Influence de la température sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

Pour un même débit d'air asséchant, la vitesse de séchage augmente quand la température de l'air asséchant croît et par conséquent la teneur en eau des feuilles marjolaine diminue considérablement (Fig. 5). L'influence du débit d'air asséchant ( $D_v$ ) sur la vitesse de séchage des feuilles marjolaine est illustrée sur la figure 6. Nous constatons que pour une même température de l'air asséchant, une augmentation du débit d'air asséchant favorise l'accélération du processus de séchage en impliquant des échanges convectifs.

A partir des six essais de séchage, nous avons établi la corrélation exprimant la vitesse de séchage normée des feuilles de marjolaine sous forme d'un polynôme d'ordre 4 en  $X^*$  (Fig. 7). Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire de Marquard-Levenberg en utilisant le logiciel Origin 6.1 et en traitant tous les points expérimentaux. Le meilleur lissage est obtenu en choisissant comme critère d'évaluation un coefficient de corrélation  $r$  élevé et une erreur systématique moyenne ESM minimale.

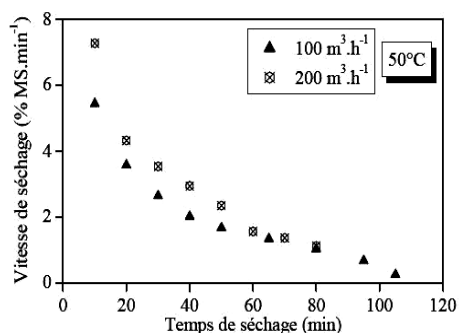


Fig. 6: Influence du débit d'air asséchant sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

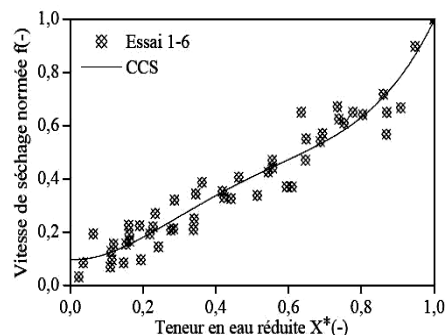


Fig. 7: Courbe caractéristique de séchage des feuilles de marjolaine

$$\begin{aligned}
 f &= 0,0923 - 0,0642 X^* + 3,6143 X^{*2} - 6,2326 X^{*3} + 3,5775 X^{*4} \\
 r &= 0,9572 \\
 \text{ESM} &= 0,0608
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Les courbes présentant les teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage sont décrites par six modèles. Les coefficients de chaque modèle de séchage sont déterminés (**Tableau 3**). Le modèle Logarithmique a montré une bonne corrélation avec les courbes expérimentales avec un  $r$  de 0,9986 et un  $\chi^2$  de  $5,2154 \cdot 10^{-5}$ . En effet, la figure 8 montre une parfaite concordance entre les teneurs en eau réduites expérimentales et les teneurs en eau réduites calculées par le modèle Logarithmique.

**Tableau 3:** Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage des feuilles de marjolaine

Modèle	Coefficients	$r$	ESM	$\chi^2$
Newton	$k=0,0190$	0,9818	0,0596	$5,3111 \cdot 10^{-3}$
Page	$k=0,0040$ ; $n=1,4$	0,9974	0,0242	$1,2732 \cdot 10^{-4}$
Logarithmique	$a=1,0223$ ; $k=0,0249$ ; $c=-0,0422$	0,9986	0,0194	$5,2154 \cdot 10^{-5}$
Two-term	$a=0,9308$ ; $k_0=0,0204$ ; $b=0,1307$ ; $k_2=0,0206$	0,9856	0,0650	$5,6506 \cdot 10^{-3}$
Wang and Singh	$a=-0,0141$ ; $b=4,4424 \cdot 10^{-5}$	0,9965	0,0280	$1,8441 \cdot 10^{-4}$
Verma <i>et al.</i>	$a=6,7371 \cdot 10^4$ ; $k=0,0050$ ; $k_0=0,0050$	0,9960	0,0318	$2,2809 \cdot 10^{-4}$

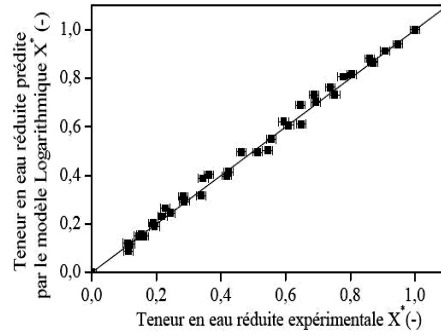


Fig. 8: Teneur en eau réduite prédite par le modèle Logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale des feuilles de marjolaine

La diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$  est typiquement calculée par la méthode graphique en représentant les données de séchage expérimentales en terme du logarithme népérien de la teneur en eau réduite  $X^*$  en fonction du temps de séchage. Le résultat est une droite de pente  $\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4 L^2}\right)$ , ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif pour différentes conditions aérothermiques (**Tableau 4**).

**Tableau 4:** Valeurs de la diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$  des feuilles de marjolaine pour différentes conditions aérothermiques

N°Essai	$D_v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	r
1	0,028	40	$7,19 \cdot 10^{-12}$	0,9947
2	0,028	50	$4,54 \cdot 10^{-11}$	0,9872
3	0,028	60	$4,71 \cdot 10^{-11}$	0,9886
4	0,056	40	$1,01 \cdot 10^{-11}$	0,9412
5	0,056	50	$5,79 \cdot 10^{-11}$	0,9969
6	0,056	60	$1,17 \cdot 10^{-10}$	0,9682

Les courbes de la figure 9 montrent les effets simultanés de la température et du débit d'air asséchant sur la diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$ . On remarque une augmentation de  $D_{\text{eff}}$  avec la température et avec le débit d'air chaud.

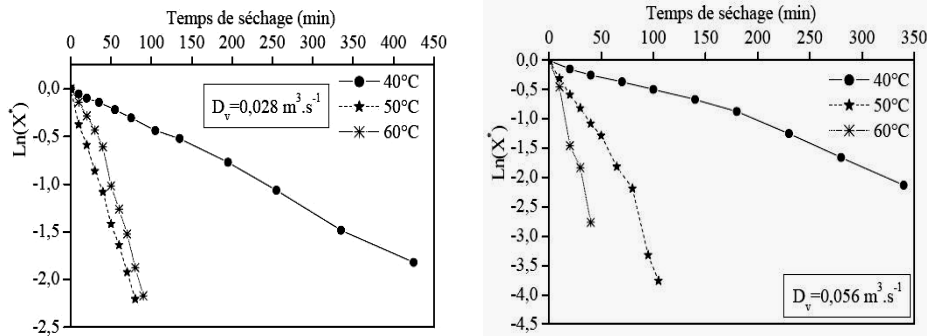


Fig. 9: Effets simultanés de la température et du débit d'air sur le coefficient de diffusion effectif des feuilles de marjolaine



L'équation 10 peut être réarrangée sous la forme:

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (12)$$

L'énergie d'activation est calculée en représentant le logarithme népérien des valeurs expérimentales de la diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$  en fonction de l'inverse de la température. C'est une droite qui indique la dépendance d'Arrhénius dans la gamme de températures étudiées. Cette dépendance peut être représentée par l'équation suivante tirée de la figure 10, qui représente l'influence de la température de l'air asséchant sur la diffusivité effective.

$$D_{\text{eff}} = 322,821 \exp\left(\frac{-9824,8370}{T}\right) \quad (13)$$

De la pente de la droite décrite par l'équation (12) et représentée sur la figure 10, on tire une énergie d'activation des feuilles de marjolaine de:  $E_a = 82 \text{ kJ.mol}^{-1}$  avec un coefficient de corrélation  $r = 0,9936$ .

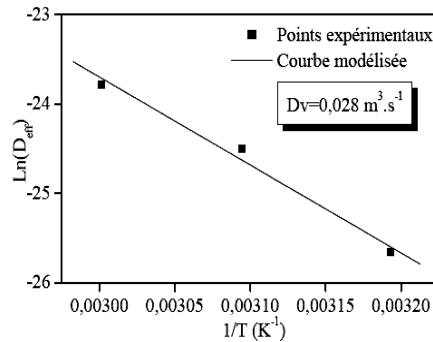


Fig. 10: Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif des feuilles de marjolaine

## 5. CONCLUSION

Dans ce travail, les expériences de séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de marjolaine sont effectuées pour trois températures (40, 50 et 60 °C) et pour deux débits d'air asséchant (0,0227 et 0,0556  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Les courbes expérimentales obtenues ont montré une allure de séchage décroissante. Le principal facteur qui influe les cinétiques de séchage est la température de l'air asséchant. La courbe caractéristique de séchage est obtenue et l'équation de la vitesse de séchage est déterminée empiriquement.

L'analyse statistique des résultats expérimentaux en coordonnées réduites  $X^*(t)$ , lissés par six modèles a permis de conclure que le modèle Logarithmique est le plus approprié pour la description des cinétiques de séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de marjolaine.

Le coefficient effectif de diffusion, qui regroupe les différents phénomènes de transport, est déterminé selon une loi analogue à la seconde loi de Fick (approximation de Madamba). Les effets simultanés de la température et du débit d'air asséchant sur la diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$  sont mentionnés. On remarque une augmentation de  $D_{\text{eff}}$  avec la température et avec le débit d'air chaud. L'énergie d'activation, qui représente la barrière énergétique que le système doit franchir pour se stabiliser, est déterminée en utilisant l'équation d'Arrhenius.

## NOMENCLATURE

$D_v$	Débit de l'air asséchant ( $m^3.s^{-1}$ )	$M_h$	Masse humide du produit
ESM	Erreur systématique moyenne	$M_s$	Masse sèche du produit
f	Vitesse de séchage normée	N	Nombre de points expérimentaux
$X^*$	Teneur en eau réduite	n	Nombre de constantes du modèle
$X_{eq}$	Teneur en eau d'équilibre (% MS)	r	Coefficient de corrélation
$X_{exp,i}^*$	Teneur $i^{ème}$ en eau réduite expérimentale	T	température absolue (K)
$X_{pre,i}^*$	Teneur $i^{ème}$ en eau réduite prédite	Ha	Humidité relative de l'air (%)
$D_{eff}$	Diffusivité effective ( $m^2.s^{-1}$ )	t	Temps de séchage (min)
MS	Matière sèche	$\theta$	Température de l'air asséchant ( $^{\circ}C$ )
a, b, c,	Coefficients des modèles utilisés	$E_a$	Energie d'activation ( $kJ.mol^{-1}$ )
k, $k_0, k_1, n$			

## REFERENCES

- [1] A. Belghit, M. Kouhila and B.C. Boutaleb, 'Experimental Study of Drying Kinetics of Sage in a Drying Tunnel Working in Forced Convection', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 2, N°1, pp. 17 - 26, 1999.
- [2] M. Daguinet, '*Les Séchoirs Solaires : Théorie et Pratique*', Publication de l'UNESCO, Paris, France, 1985.
- [3] A. Idlimam, '*Etude Théorique d'un Système de Séchage des Peaux et des Cuirs pour La Région de Marrakech Constitué d'une Serre Agricole Jouant le Rôle de Générateur Solaire d'Air Chaud et d'un Séchoir Conventionnel*', Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Ecole Normale Supérieure, Marrakech, Maroc, 1990.
- [4] A. Idlimam, A. Jamali, M. Kaoua, M. Kouhila et M. Fliyou, '*Etude Comparative Expérimentale des Températures et des Composantes du Rayonnement Solaire à Marrakech et à Oukaimeden*', Les Cahiers de la Recherche, Université Hassan II-Ain Chock, Ref VPR-DR, 2006.
- [5] G. Archimed et B. Solagro, '*Le Séchage des Plantes Aromatiques et Médicinales*', Guide de Conception et d'Utilisation d'un Séchoir, Fondation de France et Direction de l'Energie de la Commission des Communautés Européennes, 80 p., 1989.
- [6] M. Camara, '*Séchage Solaire des Plantes Aromatiques*', Mémoire de Fin d'Etudes de 3<sup>ème</sup> Cycle, IAV Hassan II, Rabat, 81 p., 1993.
- [7] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, '*Thin Layer Convective Solar Drying and Mathematical Modeling of Prickly Pear Peel (Opuntia ficus indica)*', *Energy*, Vol. 29, N°2, pp. 211 - 224, 2004.
- [8] L. Ait Mohamed, M. Kouhila, A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou and M. Mahrouz, '*Single Layer Solar Drying Behaviour of Citrus aurantium Leaves under Forced Convection*', *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, N°9-10, pp. 1473 - 1483, 2005.
- [9] A. Idlimam, C.S.E. Kane and M. Kouhila, '*Single Layer Drying Behaviour of Grenade Peel in a Forced Convective Solar Dryer*', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°2, pp. 191 - 203, 2007.
- [10] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, L. Ait Mohamed and B. Agorram, '*Characteristic Drying Curve and Mathematical Modeling of Thin-Layer Solar Drying of Prickly Pear Cladode (Opuntia ficus indica)*', *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 27, N°2, pp. 103 - 117, 2004.
- [11] A. Iguaz, M.B. San Martin, J.I. Mate, T. Fernandez and P. Virseda, '*Modelling Effective Moisture Diffusivity of Rough Rice (Lido cultivar) at Low Drying Temperatures*', *Journal of Food Engineering*, Vol. 59, N°2-3, pp. 253 - 258, 2003.

- [12] M. Kouhila, A. Belghit et M. Daguinet, 'Détermination Expérimentale et Théorique des Courbes de Sorption et de la Cinétique de Séchage de la Menthe Verte', *Entropie*, Vol. 37, N°233, pp. 20 - 31, 2001.
- [13] D.A. Van Meel, 'Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air', *Chemical Engineering Science*, Vol. 9, pp. 36 - 44, 1958.
- [14] L. Ait Mohamed, 'Etude Physico-Chimique de la Qualité de la Conservation Avant Et Après Séchage Solaire Convectif du *Gelidium sesquipedale* (Algue Rouge) et du *Citrus aurantium* (Orange Amer)', Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 2006.
- [15] A. Jamali, 'Etude des Isothermes de Sorption et des Cinétiques de Séchage Solaire par Convection Forcée des Feuilles d'Ansérine (*Chenopodium ambrosioides*) et de Mandarinier (*Citrus reticulata*) pour une Meilleure Conservation', Thèse d'Habilitation Universitaire, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 250 p., 2006.
- [16] S. Lahsasni, 'Etude de la Composition Chimique et de la Conservation par Séchage Solaire Convectif d'un Cactus Inerme d'*Opuntia ficus indica* : Impact du Séchage sur la Qualité des Polysaccharides et des Pigments', Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 189 p., 2004.
- [17] A. Midilli and H. Kucuk, 'Mathematical Modelling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy', *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, N°7, pp. 1111 - 1122, 2003.
- [18] C. Ertekin and O. Yaldiz, 'Drying of Eggplant and Selection of a Suitable Thin Layer Drying Model', *Journal of Food Engineering*, Vol. 63, N°3, pp. 349 - 359, 2004.
- [19] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, 'A New Model for Single Layer Drying', *Drying Technology*, Vol. 20, N°7, pp. 1503 - 1513, 2002.
- [20] A. Fick, 'Ueber Diffusion', *Annalen der Physik*, Vol. 170, pp. 59 - 86, 1855.
- [21] J. Crank, 'The Mathematics of Diffusion', 2<sup>nd</sup> Ed. Oxford, Oxford University Press, 414 p., 1975.
- [22] I. Doymaz, 'Convective Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots', *Journal of Food Engineering*, Vol. 61, N°3, pp. 359 - 364, 2004.
- [23] I. Doymaz and M. Pala, 'The Thin-Layer Drying Characteristics of Corn', *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, N°2, pp. 125 - 130, 2003.
- [24] M. Kouhila, 'Etude Expérimentale et Théorique de Cinétiques de Séchage Convectif Partiellement Solaire des Plantes Médicinales et Aromatiques (Menthe, Verveine, Saugue et Eucalyptus) de la Région de Marrakech', Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 170 p., 2001.
- [25] A. Midilli, 'Determination of Pistachio Drying Behaviour and Conditions in a Solar Drying System', *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, N°8, pp. 715 - 725, 2001.
- [26] A. Belghit, M. Kouhila and B.C. Boutaleb, 'Experimental Study of Drying Kinetics by Forced Convection of Aromatic Plants', *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, N°12, pp. 1303 - 1321, 2000.
- [27] S. Bellagha, E. Amami, A. Farhat and N. Kechaou, 'Drying Kinetics and Characteristic Drying Curve of Lightly Salted Sardine (*Sardinella Aurita*)', *Drying Technology*, Vol. 20, N°7, pp. 1527 - 1538, 2002.
- [28] N. Kechaou, 'Etude Théorique et Expérimentale du Processus de Séchage de Produits Agro-Alimentaires', Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p., 2000.
- [29] N. Boudhrioua, 'Etude des Migrations de l'Eau et du Chlorure de Sodium dans des Gels Alimentaires et Influence de la Composition du Gel et du Procédé Appliqué', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Massy, France, 149 p., 2004.
- [30] C. Moyne, N. Kechaou, P.J. Do Amaral Sobral, M. Roques, A. Cairault et H. Bizot, 'Séchage et Mécanismes de Transport de l'Eau dans les Gels', *Entropie*, Vol. 28, N°167, pp. 9 - 17, 1992.