



Cinétique de séchage et Courbe caractéristique de séchage d'une couche mince de tomate

Auteurs : Sana Ben Mariem¹, Slah Ben Mabrouk²

1 Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, Rue Hédi Karray - BP 17 Rue Hédi Karray, Ariana 2080, Tunisie.

2 Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie – C.R.T.En, Laboratoire des Procédés Thermiques -BP : 95 Hammam-Lif 2050, Tunisie

benmeriem.sana@gmail.com
salah.benmabrouk@crten.rnrt.tn

Résumé : Ce travail est consacré à l'étude des cinétiques de séchage en couches minces de la tomate à l'aide d'une soufflerie à convection forcée. Des expériences de séchage ont été réalisées dans le laboratoire de procédés thermiques du CRTEn sous différentes conditions de température de vitesse et d'humidité d'air asséchant.

Les courbes de perte de la teneur en eau et l'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant sont étudiées dans le but de déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS).

Les courbes expérimentales présentées en teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage sont approchées par des modèles mathématiques existant dans la littérature. L'analyse statistique des résultats, a permis de conclure que les modèles *Approche Diffusionnelle* et le modèle *Exponentiel à deux termes* sont les plus appropriés pour la description des cinétiques de séchage convectif en couches minces de la tomate. Les résultats ont permis de calculer le coefficient de diffusion effectif et l'énergie d'activation.

Mots clés : Tomates, Cinétique de séchage, Courbe caractéristique de séchage, modèles mathématiques.

1. Introduction

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation. En terme de physique, le séchage résulte le plus souvent d'un transfert simultané de chaleur et de masse au sein du produit à sécher et à l'interface entre ce matériau et l'environnement asséchant [1].

Cependant, vu la complexité des mécanismes de transferts et la diversité des produits, la connaissance des données de base, en l'occurrence les courbes de cinétique est nécessaire.

Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. Parmi ces théories on peut citer la courbe caractéristique de séchage et les modèles empiriques.

L'objectif de cette étude est la détermination expérimentale de la cinétique de séchage des tomates à l'aide d'une soufflerie. Les essais expérimentaux consistent à étudier l'influence des conditions de l'air asséchant (température, vitesse et humidité de l'air) sur l'allure de séchage. À l'aide d'une approche empirique, on essaie de déterminer la courbe caractéristique de séchage. Ces relations empiriques peuvent servir pour le dimensionnement et la modélisation des séchoirs solaires.

2. Matériels et méthodes

2.1. Mise à point d'un du système expérimental de séchage

Les essais de séchage ont été réalisés dans une soufflerie à air chaud à l'échelle du laboratoire (installé dans le LPT du CRTEn de Borj Cédria). Cette soufflerie est une sorte de séchoir tunnel convectif fonctionnant totalement en énergie électrique et dont les éléments constitutifs sont (figure 1) :

- un ventilateur pour assurer l'écoulement d'air à vitesse variable entre 0,3 et 5m/s,
- un ensemble de résistances chauffantes pour chauffer l'air en écoulement,

- un ensemble de thermocouple pour contrôler la température,
- une balance et une chaîne d'acquisition pour enregistrer et traiter instantanément les mesurés,
- et une veine d'essai équipée d'une grille perforée sur laquelle une seule couche de produit à sécher est exposée.

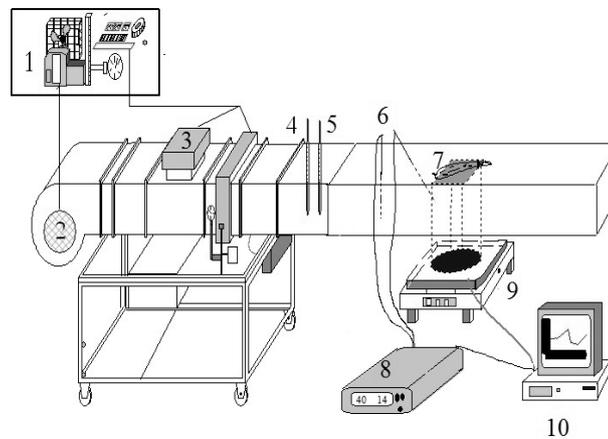


Figure 1 : Schéma de la soufflerie aérothermique à atmosphère contrôlée

- 1: Armoire électrique - 2 : Ventilateur – 3: bloc de résistances - 4: Thermo hygromètre - 5 : anémomètre - 6: Thermocouples - 7: Produit - 8 : chaîne d'acquisition HP - 9: balance - 10: Computer

L'écoulement d'air est transversal et homogène par rapport à la surface de la couche du produit à sécher au sein d'un tunnel de 80 cm de longueur et de section $25 \times 25 \text{ cm}^2$, en boucle ouverte à l'air libre. Afin d'assurer une meilleure stabilité des conditions de séchage et une homogénéisation de la température à l'intérieur de la soufflerie, l'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction des claies chargées dans la chambre de séchage.

2.2. Méthodologie

Les expériences de séchage ont porté sur des échantillons tomates fraîches pesant entre 200-210g, à maturité commerciale (couleur rouge et fermes) et collectées auprès du producteur local.

L'air de séchage, caractérisé par une température T_a , une vitesse V_a et une humidité relative H_r , traverse la couche mince de produit qui est à une teneur en eau X et à une température T_p (inférieure à T_a) pendant un intervalle du temps Δt , ainsi un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit du fait de l'écart thermique et un transfert de matière s'effectue en sens inverse sous l'effet de l'écart de pression de vapeur d'eau entre l'air et la surface de produit, par conséquent, un taux d'humidité ΔX s'évapore vers l'air dont l'humidité relative augmente de ΔH_r et la température diminue de ΔT_a (en fonction de l'augmentation de la température du produit ΔT_p). A ce stade, l'énergie apportée par l'air étant supérieure à l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau, l'excédent d'énergie sera transmis au produit sous forme d'énergie sensible. La température du produit T_p va donc augmenter entraînant une augmentation de la pression de vapeur à l'interface air-produit (figure 2).

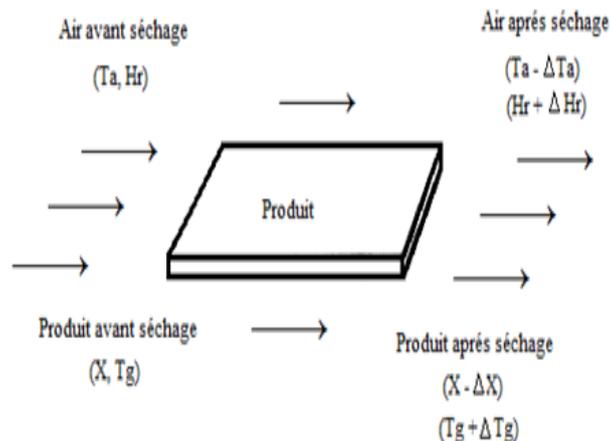


Figure 2 : Principe de séchage d'une couche mince

Le séchage des tomates ont été menées à différentes conditions expérimentales. Le tableau 1 indique les conditions opératoires des séries de mesure réalisées. Le choix de ces conditions opératoires est justifié par leur rapprochement des conditions réelles établies au sein d'un séchoir solaire ou hybride.

Tableau 1: Conditions expérimentales de séchage des tomates

Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)	Température de l'air (°C)
34	1	40
		45
		50
		60
		65
34	1,9	40
		45
		50
		60
		65
34	3	50
22	1,9	65
15	1,9	65

2.3. Paramètres mesurés

La mesure des températures est effectuée par des thermocouples de type (Testo 635-2, Allemagne) de diamètre 1 mm et de précision $\pm 0,5$ °C. Ces thermocouples servent à repérer la température sèche de l'air et celle à la surface du produit. L'ensemble des thermocouples est relié à un enregistreur à affichage digital.

La prise de température est effectuée pour différents endroits de la veine d'essai :

- à la surface du produit;
- pour l'air asséchant;
- et à l'entrée et à la sortie de la veine d'essai.

La mesure de l'humidité est effectuée à l'aide de thermo hygromètres à touches sensibles de précision ± 2 %. Les sondes d'humidité sont placées à différents endroits de la veine d'essai.

La vitesse d'air asséchant est mesurée par un anémomètre à hélice 16 mm avec une précision de lecture de 0, 1m/s (Testo 435-3, Allemagne). Cependant, il apparaît très difficile de passer de la mesure des vitesses à un calcul du débit.

Les masses humides du produit, sont effectuées au moyen d'une balance électronique à affichage numérique, (Kern 440-35A) de précision de $\pm 0,001$ g et ont été enregistrées grâce à un micro-ordinateur relié à la balance. Cette méthode de mesure permet de suivre continûment la diminution du poids du produit au cours du séchage.

Afin de déterminer la masse sèche du produit M_s , les échantillons séchés dans la soufflerie sont ensuite placés dans une étuve réglée à 105 °C durant 6 à 7 heures. Le produit est pesé toutes les heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractéristiques de séchage

3.1.1. Influence de la température de l'air de séchage sur la cinétique de séchage de la tomate

Les courbes de cinétiques de la perte de la teneur en eau d'une monocouche de tomate déterminée pour les différentes conditions expérimentales de séchage sont présentées dans les figures 3, et 4.

Le processus de séchage est caractérisé par une diminution progressive de la teneur en eau avec le temps, suivi par la suite d'une stabilisation, pour atteindre une valeur constante, surtout à haute température.

Comme peut être vu à partir des données présentées, pour une même vitesse d'air asséchant, le temps nécessaire pour sécher les tranches de tomate a diminué avec l'augmentation de la température de l'air de séchage et par conséquent la teneur en eau des échantillons de tomates diminue considérablement.

Le temps de séchage des tranches de tomate à une teneur en eau de 11% à 40°C, 45°C, 50°C, 60°C, et 65°C pour une vitesse d'air de 1m/s étaient de 22h, 18,5h, 16,7h, 13,5h et 9,9h, respectivement. Il est réduit de près de 2 fois lorsque la température de séchage augmentée de 45°C à 65°C.

Pour une vitesse de 1,9 m/s, le temps de séchage des tranches de tomate à 40°C, 45°C, 50°C, 60°C, et 65°C étaient de 20,2h, 15,8h, 13,7h, 10,5h et 8,5 h, respectivement.

La teneur en eau diminue avec des températures de l'air de séchage plus élevées qui peuvent offrir un plus grand déficit de pression de la vapeur d'eau (différence entre la vapeur saturée et la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air à une température donnée), qui est l'une des forces motrices pour le processus de diffusion de l'humidité vers l'extérieur.

L'augmentation du potentiel de séchage et la réduction du temps de séchage s'explique par le fait que l'élévation de température entraîne une augmentation de l'intensité du transfert de chaleur.

L'augmentation de la température de séchage est responsable de l'augmentation de l'énergie des molécules d'eau, accélérant ainsi la migration de l'eau à l'intérieur du produit, ce qui peut s'échapper plus facilement et plus rapidement.

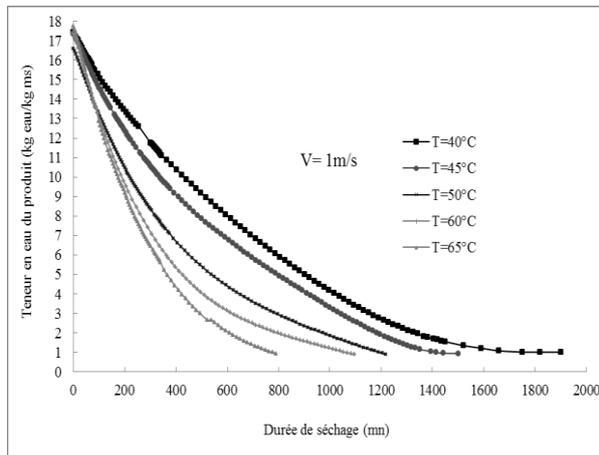


Figure 2 : Evolution de la teneur en eau moyenne d'une couche mince de tomate pour $V_a=1\text{ m/s}$ et $H_r=34\%$

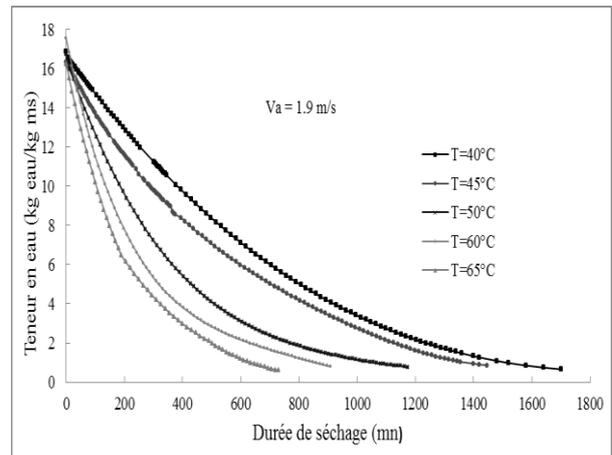


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau moyenne d'une couche mince de tomate pour $V_a=1,9\text{ m/s}$ et $H_r=34\%$

Les courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la durée de séchage sont rassemblées sur la figure 5. L'analyse de ces courbes montre que la cinétique de séchage est caractérisée par l'absence de la phase à allure croissante de mise en température et de la phase à allure constante et la présence d'une phase unique à allure décroissante. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs pour le séchage de la tomate [2], [3]. Ceci s'explique par l'absence de l'eau libre à la surface du produit et aussi à la structure de ce dernier.

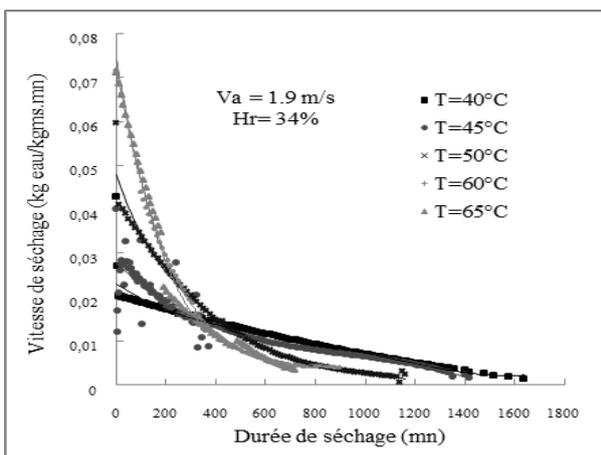
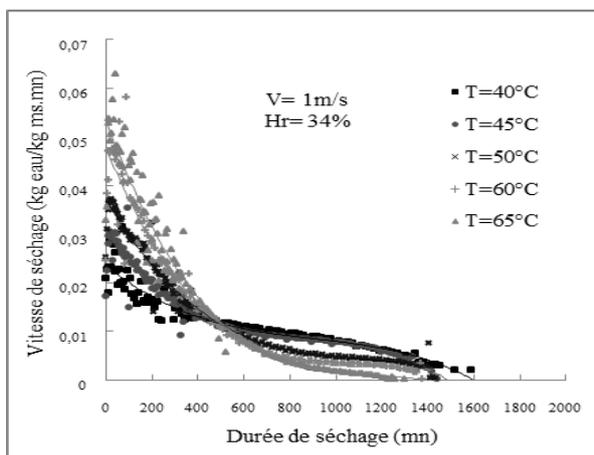


Figure 5 : Variation de la Vitesse de séchage des échantillons de tomates pour les différentes conditions de l'air asséchant

L'analyse de cette période décroissante révèle deux phases :

- Une phase de séchage à vitesse décroissante où les propriétés physiques du matériau influent de plus en plus fortement sur l'allure de la cinétique de séchage. Cette réduction de l'allure de séchage au cours du temps est souvent interprétée par un renforcement de la résistance interne aux transferts massiques [4].

- Une autre phase décroissante où le matériau est complètement dans le domaine hygroscopique. La vitesse de séchage décroît lentement pour atteindre le point correspondant à l'équilibre du matériau avec les conditions extérieures.

L'augmentation de température de l'air de séchage engendre généralement une augmentation de la vitesse de séchage notamment au début de l'opération de séchage.

Néanmoins, vers la fin de l'opération, l'influence de ce paramètre est faible, ceci s'explique par le fait que presque la totalité des molécules d'eau libres et liées ont été évaporées et reste que les molécules d'eau liées à la structure même du produit qui ne sont pas concernées par l'opération de séchage.

De ces résultats, la température semble bien être le paramètre le plus important en matière de séchage. En effet, la cinétique de séchage dépend fortement de la température.

3.1.2. Influence de la vitesse et de l'humidité de l'air sur la cinétique du séchage de la tomate

Pour étudier l'effet de ces deux paramètres sur la cinétique de séchage de la tomate, on a présenté la variation de la teneur en eau en fonction du temps (figures 6 et 7), pour trois vitesses moyennes de l'écoulement de l'air (1 m/s, 1.9 m/s et 3 m/s) et trois humidités de l'air différentes (34%, 22%, 15%). Dans cet intervalle, l'allure de séchage ne varie pas beaucoup en fonction de la vitesse et de l'humidité de l'air.

Donc l'influence de ces deux facteurs demeure plus faible que celle de la température. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux sur le séchage des produits agroalimentaires.

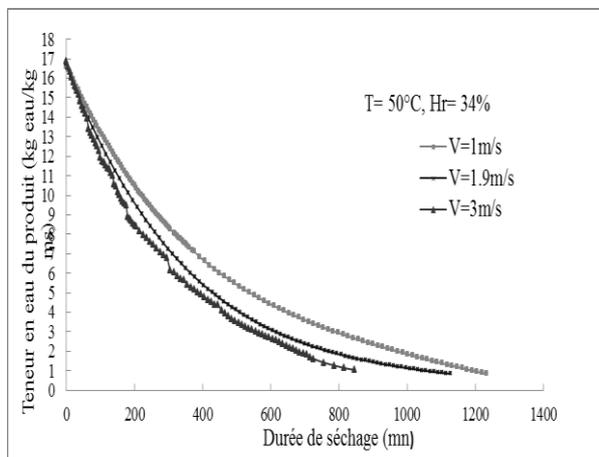


Figure 6 : Evolution de la teneur en eau moyenne d'une couche mince de tomate $H_r = 34\%$ et $T_a = 50^\circ\text{C}$

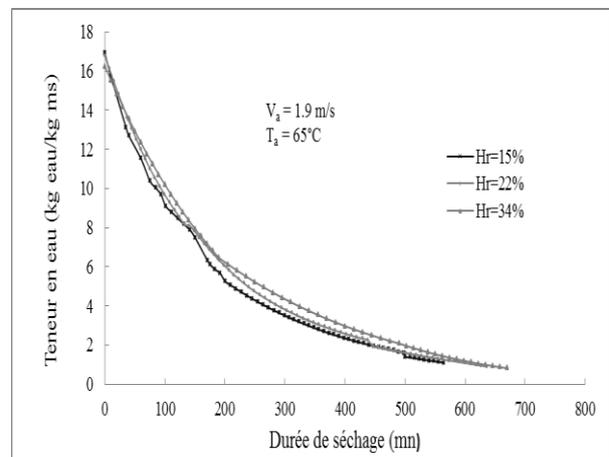


Figure 7 : Evolution de la teneur en eau moyenne d'une couche mince de tomate $V_a = 1,9\text{m/s}$ et $T_a = 65^\circ\text{C}$

3.2. Courbes caractéristiques de séchage

Le principe de cette méthode consiste à rassembler les résultats expérimentaux, pour diverses conditions de l'air asséchant sur une seule courbe dite Courbes Caractéristique de Séchage (CCS) pouvant être utilisable par l'ensemble des scientifiques.

La démarche suivie est de normaliser le rapport $(-dX/dt)/(-dX/dt)_i$ dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite X_r .

Plusieurs chercheurs ont choisi le modèle polynomiale pour le lissage de la courbe caractéristique de séchage [5], [6], [7], [8], [9], [10] et [11].

On a utilisé la méthode d'optimisation non linéaire en utilisant le logiciel OriginPro.8 et en traitant tous les points expérimentaux de séchage réalisés dans des conditions opératoires différentes.

Un modèle polynomial de degré trois a été utilisé pour décrire le comportement du produit à l'échelle macroscopique au cours du séchage.

La figure 8 montre un bon regroupement des courbes de séchage obtenues à différentes températures de l'air variant entre 40°C et 65°C .

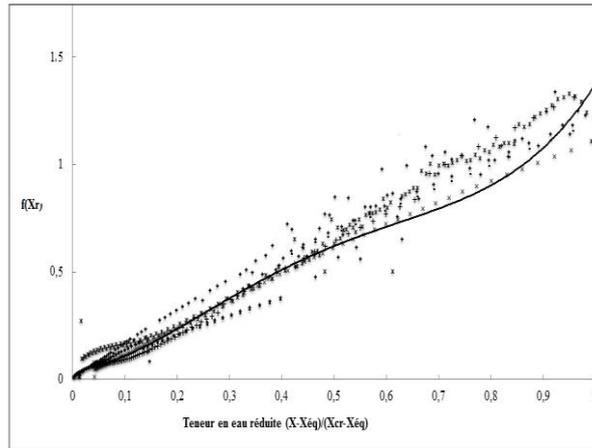


Figure 8 : Courbe caractéristique de séchage de tomate
Conditions de séchage $40^{\circ}\text{C} < T_a < 65^{\circ}\text{C}$, $1\text{m/s} < V_a < 3\text{m/s}$, $15\% < H_r < 34\%$

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

$$f(X_r) = 1,003 \cdot 10^{-2} X_r^3 - 5,396 \cdot 10^{-3} X_r^2 + 2,594 \cdot 10^{-4} X_r - 3,87 \cdot 10^{-5}$$

$$R^2 = 0,991$$

3.3. Coefficient de diffusion effectif 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.

Dans cette analyse, le principal mécanisme du transport d'eau pour les tranches des tomates est considéré de nature diffusive.

Un modèle de diffusion simple, basé sur la seconde loi de Fick est envisagée pour l'évolution de la teneur en eau en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1)$$

X = teneur en eau (g eau / g de matière sèche);

t = temps (s);

x = épaisseur de l'échantillon (m);

D_{eff} = coefficient de diffusion (m^2/s).

Cette équation mathématique permettant de décrire le processus de séchage et de calculer le coefficient de diffusion, est basée sur les hypothèses simplificatrices classiques:

- la migration de l'eau n'est que par la diffusion ;
- la teneur en eau à la surface est égale à celle d'équilibre;
- le coefficient de diffusion et la température du produit sont considérés constants ;
- et le retrait de l'échantillon est négligeable.

Sur la base de ces hypothèses, la solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par Crank, 1975, [12], peut être exprimée par:

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

Avec L est l'épaisseur des échantillons (m) et n est un nombre entier positif.

Les valeurs de D_{eff} sont généralement déterminées par la méthode graphique en représentant les données expérimentales de séchage en termes de $\ln X_r$ en fonction du temps de séchage (t). Le résultat est une droite de pente $(\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2})$ ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif (figures 9 et 10).

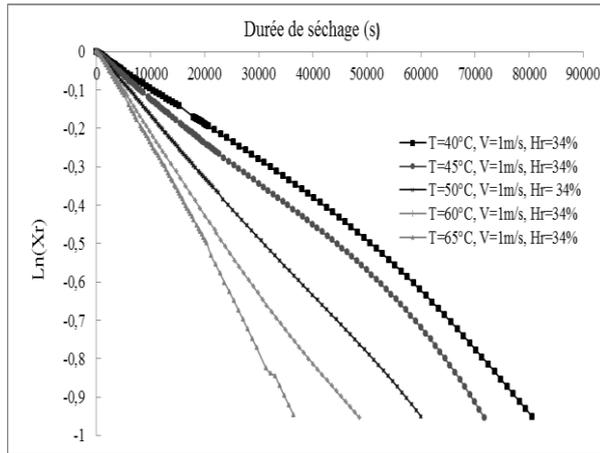


Figure 9 : Evolution de Log $[X_{réd}]$ au cours du temps pour une couche mince de tomate d'épaisseur $e = 20$ mm ($V_a = 1$ m/s, $40^\circ\text{C} < T_a < 65^\circ\text{C}$)

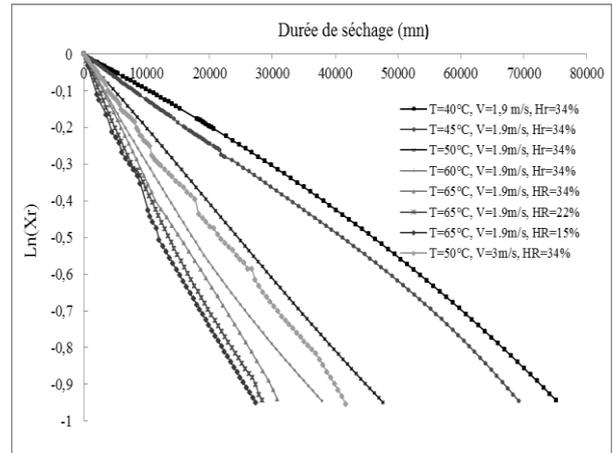


Figure 10 : Evolution de Log $[X_{réd}]$ au cours du temps pour une couche mince de tomate d'épaisseur $e = 20$ mm ($1,9$ m/s $< V_a < 3$ m/s, $40^\circ\text{C} < T_a < 65^\circ\text{C}$)

Les valeurs calculées de D_{eff} pour les différentes conditions de séchage sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs de D_{eff} pour les échantillons de tomate pour les différentes conditions de séchage

Température de l'air ($^\circ\text{C}$)	Humidité relative de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)	Coefficient de diffusion effectif (m^2/s)
40	34	1	$4,48732 \cdot 10^{-10}$
45			$4,92746 \cdot 10^{-10}$
50			$6,35275 \cdot 10^{-10}$
60			$8,2052 \cdot 10^{-10}$
65			$1,06072 \cdot 10^{-9}$
40	34	1,9	$4,89403 \cdot 10^{-10}$
45			$5,24123 \cdot 10^{-10}$
50			$8,15968 \cdot 10^{-10}$
60			$1,01876 \cdot 10^{-9}$
65			$1,21539 \cdot 10^{-9}$
50	34	3	$9,003 \cdot 10^{-10}$
65	22	1,9	$1,3287 \cdot 10^{-9}$
65	15	1,9	$1,36901 \cdot 10^{-9}$

Les valeurs du coefficient de diffusion effectif des échantillons de tomates séchées à $40^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}$ varient dans l'intervalle de $4,48732 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ à $1,36901 \cdot 10^{-9}$ pour les différentes conditions d'air asséchant. On remarque une augmentation de D_{eff} avec l'augmentation de la température, de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage. Ces valeurs se trouvent bel et bien dans la plage de 10^{-12} et 10^{-8} , relative aux produits agro-alimentaires.

Les valeurs obtenues du D_{eff} pour les tomates sont similaires à celles déterminées par différents auteurs pour les tomates et autres légumes: $1,52 \cdot 10^{-10} - 9,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les tomates séchées à partir de 40°C à 80°C [13]; $3,91 \cdot 10^{-10} - 6,65 \cdot 10^{-10}$ pour les tomates séchées à partir de 55°C et 70°C , [14]; $2,3 \cdot 10^{-9} - 9,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les tomates séchées à partir de 60°C à 110°C , [15]; $3,72 \cdot 10^{-9} - 12,27 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les tomates séchées de 45°C à 75°C , [16]; $0,87 \cdot 10^{-9} - 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les tomates cerise séchées à 40°C à 60°C , [17]; $9,9119 \cdot 10^{-10} - 6,4037 \cdot 10^{-9}$ pour les tomates séchées à partir de 40°C à 80°C , [18]; $0,87 \cdot 10^{-9} - 2,17 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la pomme de terre séchées à 50°C et 70°C , [19] et $2 \cdot 10^{-10} - 4,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les tranches d'ail séché à 50°C à 90°C , [20].

La relation entre les valeurs D_{eff} et des températures de séchage peut être calculée en utilisant l'équation d'Arrhenius:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (3)$$

Où D_0 est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius (m^2/s) ;

E_a l'énergie d'activation (kJ/mol) pour la diffusion de l'eau ;

R est la constante des gaz parfaits ($\text{kJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$) ($8,3143 \text{ kJ} / \text{kmol K}$) ;

et T_a est la température de l'air asséchant en K.

L'énergie d'activation, qui représente la barrière énergétique que le système doit franchir pour se stabiliser, est déterminée à partir de la pente de la courbe d'Arrhenius, représentée sur la figure 11.

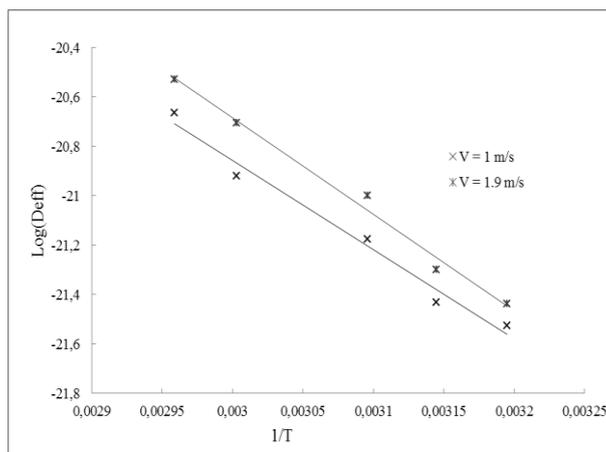


Figure 11 : Effets simultanés de la température et de la vitesse de l'air de séchage sur le coefficient de diffusion effectif des tomates

On tire une énergie d'activation des échantillons de tomates de 32,5 kJ.mol⁻¹ avec un coefficient de corrélation de 0,98 pour une vitesse de l'air de séchage de 1,9 m/s et 30 kJ.mol⁻¹ avec un coefficient de corrélation de 0,98 pour une vitesse de l'air de séchage de 1 m/s.

3.4. Équation caractéristique de séchage dans une couche mince des tomates

Les données expérimentales de la teneur en eau réduite obtenues à des températures de séchage différentes ont été simulées aux différents modèles de séchage indiqués dans le tableau 3.

Ces modèles consistent à représenter les courbes de séchage par une équation semi-empirique. Cette équation décrit soit l'évolution de la teneur en eau du produit au cours du séchage, soit la cinétique de séchage en fonction du temps ou de la teneur en eau. Ces formules contiennent toujours des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats des calculs avec les courbes expérimentales.

Tableau 3 : Modèles mathématiques pour décrire les courbes de séchage donnés par différents auteurs

Modèle	Equation
Newton	$X_r = \exp(-kt)$
Page	$X_r = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$X_r = a. \exp(-kt)$
Logarithmic	$X_r = a. \exp(-kt) + c$
Wang and Singh	$X_r = 1 + at + bt^2$
Two-Term Exponential	$X_r = a. \exp(-kt) + (1 - a). \exp(-kat)$
Page modifié	$X_r = \exp(-(kt)^n)$
Approche Diffusionnelle	$X_r = a. \exp(-kt) + (1 - a). \exp(-kbt)$

La régression non linéaire est utilisée pour déterminer les constantes du modèle utilisé.

L'efficacité d'un modèle est déterminée à partir des paramètres statistiques tels que le coefficient de corrélation (R²) élevé (tendant vers 1) et Chi-carrée r (χ²) minimale (tendant vers 0).

L'analyse de régression a été effectuée en utilisant le programme informatique OriginPro8 et les coefficients de chaque modèle de séchage ont été déterminés.

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R² variant de 0,97627 à 0,99995 et χ² variant de 0,0027 - 1,30305.10⁻⁶. Le modèle « Approche Diffusionnelle » et le modèle « Exponentiel à deux termes » peuvent être proposés comme étant les modèles les plus fiables pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

Cependant, le modèle le moins approprié est le modèle de « Wang and Singh » pour toutes les conditions de séchage utilisées.

Conclusion

L'objectif dans ce travail est l'étude des cinétiques de séchage de la tomate en utilisant la méthode de séchage à convection forcée. Les résultats expérimentaux du séchage en soufflerie à convection forcée où les

conditions aérothermiques sont contrôlables, ont été abordé de deux manières : une approche appelée courbe caractéristique de séchage qui a permis de regrouper les cinétiques de séchage en une courbe unique et une deuxième approche des équations empiriques ou semi-théoriques, permettant de décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

Le lissage de la courbe caractéristique de séchage des tomates sont bien décrites par un polynôme de 3^{ème} degré. Cette courbe donne des informations précieuses pour la prédiction de l'allure de séchage pour d'autres conditions expérimentales autres que celles dans lesquelles ont été réalisés nos essais.

Le modèle « Approche Diffusionnelle » et le modèle « Exponentiel à deux termes » sont les plus fiables pour présenter l'évolution de la teneur en eau réduite de la tomate en fonction du temps.

Lors du séchage en soufflerie, les différents résultats de cinétiques de séchage établies ont confirmé que la température de l'air asséchant est le facteur le plus influent sur les cinétiques de séchage. C'est un paramètre important pour les transferts internes de l'eau. La vitesse de séchage est d'autant plus grande que la température de l'air est élevée. La température a, en effet, une influence plus importante que la vitesse et l'humidité de l'air asséchant sur les cinétiques de séchage.

Les coefficients de diffusion de la tomate dépendent à la fois de la température et du débit d'air asséchant.

Nomenclature

Symbole	Nom, <i>unité</i>
H_r	Humidité relative, %
D_{eff}	Coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$
D_0	facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhénius, $m^2.s^{-1}$
E_a	Energie d'activation, $kJ.mol^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits, $kJ/mol.K$
t	Temps, s
T_a	Température de l'air, K
T_p	Température du produit, K
x	Epaisseur de l'échantillon, m
X	Teneur en eau, g_{eaux} / g de matière sèche
X_r	Teneur en eau réduite

Références

- [1] M. Kouhila, Étude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (menthe, verveine, sauge et eucalyptus) de la région de Marrakech. Thèse de Doctorat Université Cadi Ayyad, Marrakech, 284 Pages, 2001.
- [2] D.Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de Mastère, Université Kasdi Merbah Ouargla, 115 Pages, 2006.
- [3] H. Ridene, S. Azzouz, D. Ghorbel, L. Ayed, M. B. Slama, A.Belghith, Séchage des tomates par l'air chaud : cinétique et qualité, 1^{er} séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage, Tunisie, Pages 271-279, 2006.
- [4] S. Ben Mabrouk, Etude des transferts simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux: Modélisation des phénomènes de séchage. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 240 Pages, 1999.
- [5] A. Belghit, M. Kouhila, et B.C. Boutaleb, Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, Energy Conversion and Management, 44(12), Pages 1303-1321, 2000.
- [6] F. Zagrouba, D. Mihoubi, A. Bellagi, A. Szlay, Kinetics and characteristic curve for convective and infra-red conditions during drying of clay, Hungarian Journal of Ind.Chem.VESZPREM, Volume 30: Pages 155-160, 2002.
- [7] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam, et A. Jamali, Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel, Energy 29, Pages 211 – 244, 2004.
- [8] L. Ait Mohamed, C.S. Ethmane Kane, M. Kouhila, A. Jamali, M. Mahrouz, N. Kechaou, Thin layer modelling of Gelidium sesquipedale solar drying process. Energy Conversion and Management 49, pp 940-946, 2008.
- [9] N. Boudhrioua, M. Kouhila, N. Kechaou, Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. Food and Bioproducts Processing 86, Pages 176–184, 2008.
- [10] N. Djendoubi, N. Boudhrioua, C. Bonazzi, N. Kechaou, Drying of sardine muscles: Experimental and mathematical investigations. Food and Bioproducts Processing 87, Pages 115-123., 2009.
- [11] A. Touil, S. Chemkhi, F.Zagrouba, Modelling of the Drying Kinetics of Opuntia Ficus Indica Fruits and Cladodes. International Journal of Food Engineering 6 (2), Article 11, 2010.

- [12] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion* 2nd edition, Pages 11-103, ISBN 0-19-8533446, 1975.
- [13] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, J. C. Hou et A. B. W. Teng, Drying Characteristics of Tomatoes. *Journal of Food Engineering* 14, Pages 259-268, 1990.
- [14] I. Doymaz, Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 78, 1291-1297, 2007.
- [15] G. Giovanelli, B. Zanoni, V. Lavelli, R. Nani, Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, 52: Pages 135-141, 2002.
- [16] C.T. Akanbi, R.S. Adeyemi et A.Ojo, Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering* 73, Pages 157-163, 2006.
- [17] N. Varadharaju, C. Karunanidhi and R. Kailappan, Coffee cherry drying: a two layer model. *Drying Technology* 19, Pages 709-715, 2001.
- [18] A. Taheri-Garavanda, S. Rafieea, A.Keyhania, Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy of Tomato in Thin Layer Dryer during Hot Air Drying. *International Transaction: Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies* 2(2), Pages 239-248, 2011.
- [19] L. Ahrne, F. Prothon, et T. Funebo, Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, Pages 411–420, 2003.
- [20] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, et K. A. Buckle, The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), Pages 75–97, 1996.