

## Modélisation de la Cinétique de Séchage de la Carotte (*Daucus carota*)

### [ Modeling of Drying Kinetics of Fresh Carrot (*Daucus carota*) ]

*Abraham TETANG FOKONE, Marcel EDOUN, Alexis KUITCHE, and Chancelier KENGNE*

Département de Génie Electrique, Energétique et Automatique,  
Université de Ngaoundéré, ENSAI,  
Ngaoundéré, Cameroun

Copyright © 2013 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 work concerned the study of the influence of the drying parameters on the water loss of the fresh carrot coming from the area of Adamawa. This study was undertaken in a drier designed and produced in a tropical environment. Drying was carried out at various temperatures 45; 50 and 55°C and at various speeds of the air circulation (0.5; 1 and 1.5 m/s), with relative humidity of the variable air between 60 and 70%. The water content initial of the carrot samples were 90.8%, and we followed during drying, the loss of weight of the samples. It arises from the results that the temperature and the air velocity drying have a significant influence over the time of drying. The couple (55°C; 1m/s) is that which makes it possible to obtain the results most interesting for fresh carrot. This couple led to a time of 200 minutes drying. The modeling of the experimental data shows that the exponential model represents perfectly the behavior of this product; some is the cases of figure considered. This work would allow a better valorization of the local resources, the reduction of the losses post harvests, the reduction of the consumption of energy.

**KEYWORDS:** Modeling, parameters of drying, loss out of water, drying kinetics, fresh carrot.

**RESUME:** Ce travail a porté sur l'étude de l'influence des paramètres de séchage sur la perte en eau de la carotte fraîche provenant de la région de l'Adamaoua. Cette étude a été menée dans un séchoir conçu et réalisé dans un environnement tropical. Le séchage a été réalisé à différentes températures 45 ; 50 et 55°C et à différentes vitesses de circulation de l'air (0,5 ; 1 et 1,5 m/s), avec des humidités relatives de l'air variant entre 60 et 70%. La teneur en eau initiale des échantillons de carotte étaient 90,8%, et nous avons suivi au cours du séchage la perte de poids des échantillons. Il ressort des résultats que la température et la vitesse de l'air séchant ont une influence significative sur le temps de séchage. Le couple (55°C ; 1m/s) est celui qui permet d'obtenir les résultats les plus intéressants pour la carotte. Ce couple conduit à un temps de séchage de 200 minutes. La modélisation des données expérimentales, montrent que le modèle exponentiel représente parfaitement le comportement de ce produit, quelque soit les cas de figure envisagés. Ce travail permettrait une meilleure valorisation des ressources locales, la réduction des pertes post récoltes, la réduction de la consommation d'énergie.

**MOTS-CLEFS:** Modélisation, paramètres de séchage, perte en eau, cinétique de séchage, carotte fraîche.

## 1 INTRODUCTION

Adopté par l'homme comme moyen de conservation de produits agricoles depuis des décennies, le séchage est mis en œuvre de plusieurs manières différentes, pour des résultats divers. Ayant pour but de stabiliser un produit en le déshydratant, de façon à abaisser sa teneur en eau en dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante, il provoque malheureusement des modifications d'aspect, de goût, de texture et de qualité nutritionnelle du produit final. Le séchage utilise principalement les phénomènes de transfert de chaleur comme moyen d'élimination d'eau contenue dans le produit. Plusieurs travaux portant sur l'étude du comportement de la carotte pendant le séchage et

d'autres légumes en général, montrent que plus la température est élevée et la couche mince, plus l'opération est rapide [1]. Mais très peu de chercheurs ont varié la vitesse de l'air lors des essais. De plus ils vont au delà de la température maximale de séchage admissible par les carottes. Dans ce travail, nous aborderons le cas spécifique du séchage en couche mince pour mieux appréhender le comportement d'une couche mince aux alentours de la température maximale admissible par les légumes [2], ceci pour un écoulement d'air variant en vitesse et température.

## 2 MATERIEL ET METHODES

### 2.1 MATERIEL

#### 2.1.1 MATERIEL VEGETAL

La carotte (*Daucus carota*) est une plante bisannuelle de la famille des opiacées (anciennement ombellifères), largement cultivée pour sa racine pivotante charnue, comestible, de couleur orangée, consommée comme légume. Le terme «carotte» désigne aussi ce légume. C'est un légume riche en carotène. L'apport énergétique de la carotte crue est de 31 kilocalories par 100 g (130 kJ par 100 g). Elle contient environ 92 % d'eau, 1 % de protéines, 0,20 % de lipides et jusqu'à 4,50 % de sucre. Les carottes sont riches en Béta carotène (pro- vitamine A). Avec 25 g on couvre plus de la moitié du besoin quotidien de vitamine A (204% pour 100g). La teneur moyenne en vitamine C est de 7 mg par 100 g. Elle contient aussi de la vitamine B1 et B2. Les minéraux apportés sont principalement du calcaire, calcium, magnésium, potassium et fer. La teneur en fibres est importante. Celles-ci sont composées en majorité de pectine et de cellulose [3].

#### 2.1.2 MATERIEL EXPERIMENTAL

C'est un séchoir électrique à convection forcée avec recyclage contrôlé d'air. Ses dimensions extérieures sont : H = 2,10 m ; L = 0,50 m et l = 0,50 m. La partie intérieure, appelée chambre de séchage, a une capacité 0,25 m<sup>3</sup> et est revêtue de tôle en aluminium. La laine de verre placée entre le contre-plaqué et la tôle constitue l'isolant thermique entre l'extérieur et la chambre de séchage ; Ce qui permet de réduire le coefficient d'échange à une valeur inférieure à 0,40 W/m<sup>2</sup>°C [4]. L'extérieur du séchoir est recouvert d'une tôle d'aluminium enduite d'une couche de peinture. Ce séchoir permet d'avoir un écoulement d'air ascendant et donc un séchage traversant. La température de l'air asséchant peut varier entre 24 et 90°C et sa régulation est assurée par un thermostat du type AKO-14123. La plage d'utilisation de ce thermostat est de -30 à 99°C avec une précision de ± 1°C.

Les différents paramètres pris en compte pendant l'opération de séchage sont la température, l'humidité de l'air, la masse du produit et la vitesse de l'air asséchant.

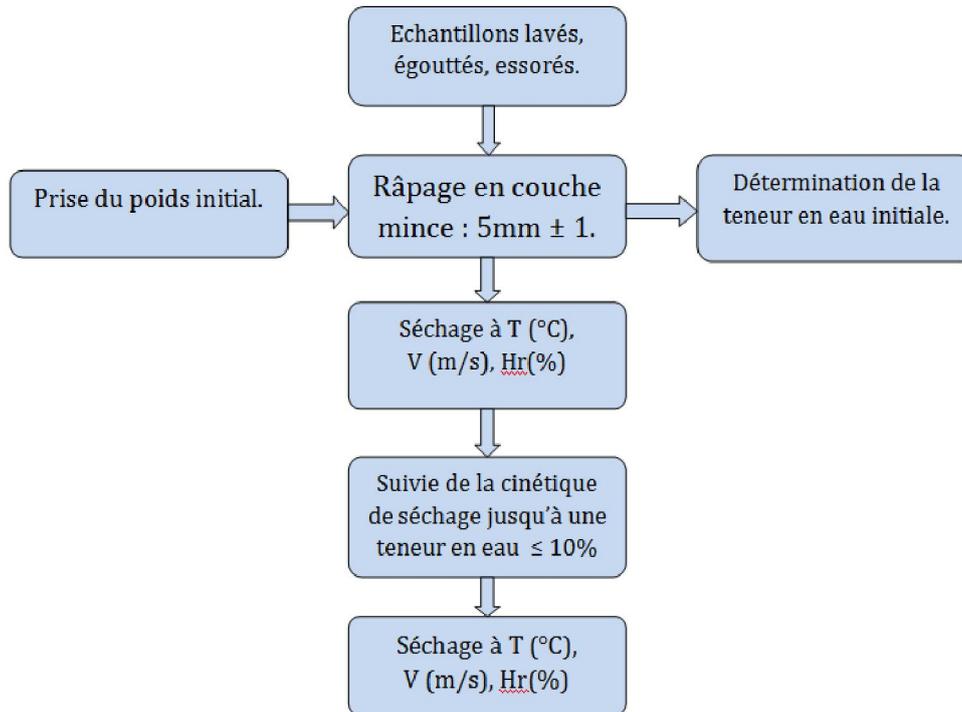
### 2.2 METHODES

#### 2.2.1 LES ESSAIS

Vingt et cinq essais ont été réalisés en faisant varier les propriétés de l'air d'un essai à l'autre. Ainsi trois valeurs possibles pour la température : 45 ; 50 et 55°C, se sont imposées, de même que trois valeurs possibles pour la vitesse de l'air : 0,50 ; 1 et 1,50 m/s. Pour chaque essai, la perte de poids a été enregistrée. Sept essais ont consisté à vérifier l'homogénéité de la température dans le séchoir vide pour différentes valeurs de la consigne.

### 2.2.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

La figure 1 ci-dessous présente le protocole expérimental utilisé lors des essais en laboratoire.



**Fig. 1. Protocole expérimental**

Ce protocole est le même pour chaque triplet température, vitesse, humidité relative de l'air.

Les opérations de séchage donnent lieu à deux types de transfert : le transfert de masse et le transfert de chaleur. Considérant le transfert unidirectionnel de vapeur d'un élément de volume vers de l'air à travers une surface d'échange plane, on peut faire les hypothèses suivantes :

- Le transfert de vapeur est unidirectionnel ;
- La surface d'échange est plane ;
- La teneur en eau initiale est la même en tout point de l'élément ;
- L'élément de volume est assimilable à un corps mince.

## 3 RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 INFLUENCE DE LA VITESSE DE L'AIR SUR L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU

Les figures 2, 3 et 4 présentent l'influence de la vitesse de l'air séchant sur l'évolution de la teneur en eau des échantillons en fonction du temps respectivement pour les températures 45 ; 50 et 55°C.

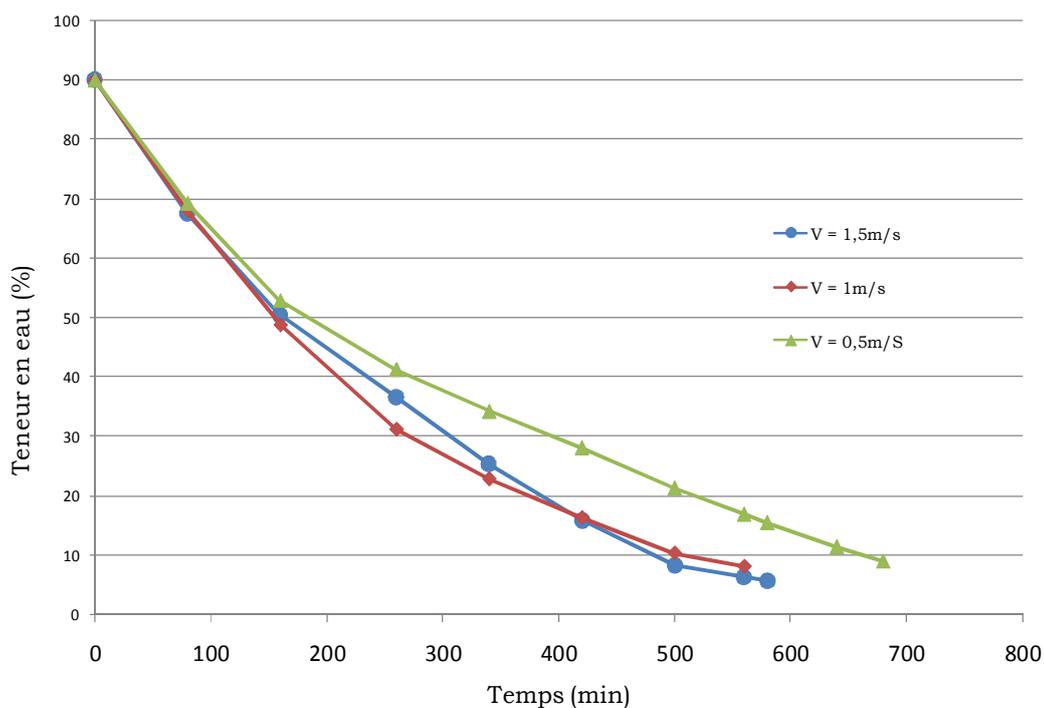


Fig. 2. Influence de la vitesse de l'air sur l'évolution de la teneur en eau à T= 45°C

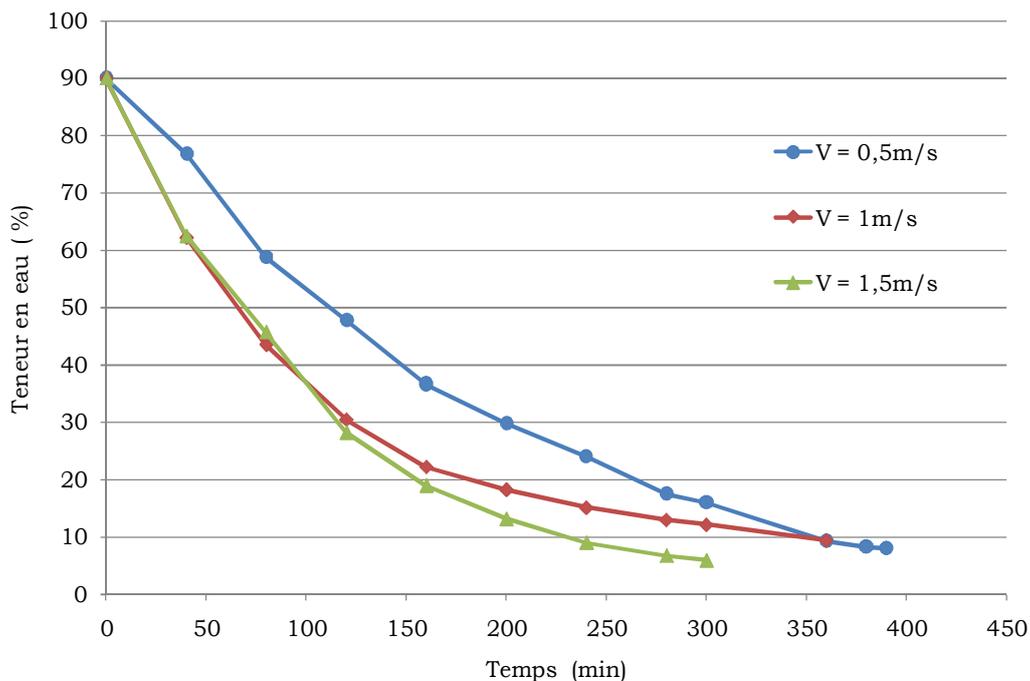
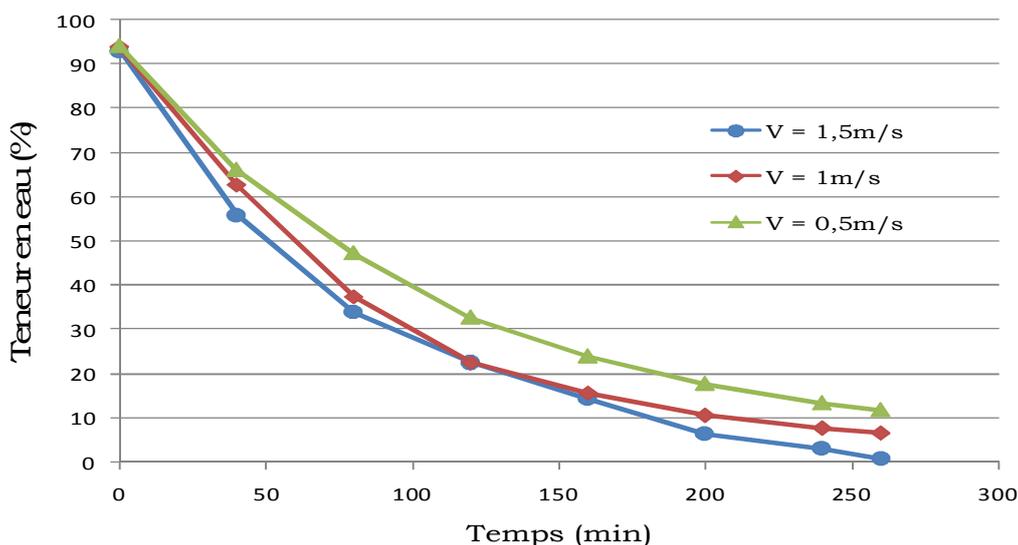


Fig. 3. Influence de la vitesse de l'air sur l'évolution de la teneur en eau à T= 50°C



**Fig. 4.** Influence de la vitesse de l'air sur l'évolution de la teneur en eau à  $T=55^{\circ}\text{C}$

L'on voit que pour des vitesses de l'air de 0,5 ; 1 et 1,5 m/s, les temps de séchage respectif, sont de 650, 500 et 490 minutes (fig. 2), de 350, 345 et 220 minutes (fig. 3) et de 270, 200 et 170 minutes (fig. 4). Considérant la teneur résiduelle en eau de 10 % [2], l'augmentation de la vitesse de l'air séchant n'a d'influence significative que pour le passage de 0,5 à 1 m/s où l'on gagne 150 minutes soit 30% du temps de séchage (fig. 2), de 1 à 1,5 m/s où l'on gagne 125 minutes soit 36% du temps de séchage (fig. 3) et 30 minutes, soit 15 % du temps de séchage (fig. 4).

Le temps de séchage des échantillons diminue avec l'élévation de température. Augmenter la température de 45 à 50°C permet de réduire ce temps de 300, 165 et 270 minutes en valeurs absolues et 46 % ; 33 % et 55 % en valeurs relatives pour des consignes de vitesse de 0,5 ; 1 et 1,5m/s respectivement. Augmenter la température de 50 à 55°C permet de réduire ce temps de 80, 145 et 50 minutes en valeurs absolues et 42 % ; 42 % et 23 % en valeurs relatives pour des consignes de vitesse de 0,5 ; 1 et 1,5m/s respectivement. Au terme de cette première partie, des résultats portant sur l'influence des paramètres sur l'évolution de la teneur en eau des échantillons, il ressort que le couple 55°C - 1m/s est le plus intéressant car il conduit à une texture acceptable pour la teneur en eau finale recommandée. Il induit aussi un temps de séchage de 260 minutes. Travailler avec une température et/ou une vitesse plus faible conduit à un temps de séchage plus long et onéreux. Choisir une température et/ou une vitesse plus élevée conduit au phénomène de croustade. Le tableau 1 suivant récapitule ces résultats.

**Tableau 1.** Récapitulatif des résultats

Température (°C)	Vitesse (m/s)	Temps de séchage (min)	Observation
45	0,5	650	
	1	500	
	1,5	490	
50	0,5	350	
	1	345	
	1,5	220	
55	0,5	270	
	1	200	
	1,5	170	Croustade

En dehors du triplet (55°C, 1m/s, 170 min) qui confère un produit de qualité non acceptable, on remarque que le temps le plus court, et pour lequel la qualité du produit est acceptable est 200 minutes. C'est le temps optimal pour ces essais.

### 3.2 EXPRESSION DES MODELES DE SECHAGE

#### 3.2.1 TEMPS DE SECHAGE

Dans la littérature, plusieurs modèles sont utilisés pour approcher les données expérimentales [5]. Les modèles ci-dessous expriment le profil de temps de séchage, obtenu durant les essais. Ces modèles sont valables pour le séchage dans les plages limites des variables fixées et, applicables à cet équipement uniquement, sous réserve des essais concluant sur d'autres équipements.

Tableau 2. Matrice de calcul des effets

N° de l'essai	Moyenne	Température (°C)	Vitesse (m/s)	Interaction Température-Vitesse	Temps de séchage (mn)
1	+ 1	- 1	- 1	+ 1	$Y_1 = 650$
2	+ 1	+ 1	- 1	- 1	$Y_2 = 270$
3	+ 1	- 1	+ 1	- 1	$Y_3 = 490$
4	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	$Y_4 = 170$
Effets et Interaction	395	-700	-260	60	
Niveau -	45 °C	0,5 m/s			
Niveau +	55 °C	1,5 m/s			

A partir des données issues de ce tableau, nous exprimons le temps de séchage ainsi qu'il suit :

$$Y = 395 - 700T - 260V + 60T*V \quad (1)$$

Dans ce modèle

- Y est le temps de séchage (teneur en eau finale de 10%) ;
- T est la température comprise entre 45 et 55°C ;
- V est la vitesse de l'air comprise entre 0,5 et 1,5 m/s.

#### 3.2.2 TENEUR EN EAU

Parmi les modèles existant dans la littérature, le modèle exponentiel de [6], a été retenu pour rendre compte de l'évolution de la teneur en eau du produit pendant le séchage.

$$\Phi = A \exp(-Kt) \quad (2)$$

- $\Phi$  : la teneur en eau du produit ;
- A: coefficient d'adéquation du modèle ;
- K ( $\text{min}^{-1}$ ): facteur de décroissance "decay factor" de l'exponentiel.

Nous obtenons les valeurs et expressions suivantes des coefficients à l'aide du logiciel STAT GRAPHIC

Tableau 3. Coefficients du modèle mathématique

	A	K	R <sup>2</sup>
Couple (55°C ; 1m/s)	0,9	0,0109	0,5

Le modèle de perte en eau est donc :

$$\Phi = 0,9 * \exp(0,0109 t) \quad (3)$$

Comme on peut le constater, le modèle ainsi obtenu rend compte du comportement du produit avec un carré de corrélation ( $R^2 \leq 0,5$ ) assez intéressant.

Ceci veut dire que les courbes de perte en eau exprimées ci-dessus (courbes théoriques) décrivent au mieux et dans le temps le comportement du produit lors du séchage. On observe une différence maximale absolue au carré de 0,5 entre les valeurs que donnent les modèles et les valeurs réelles (obtenues lors des essais).

#### 4 CONCLUSION

Au vue des travaux menés, il ressort que les paramètres non adéquats conduisent bien évidemment à un séchage, mais aussi à un temps de séchage plus long et donc à une consommation excessive de l'énergie électrique. Or, avec les paramètres adéquats, on diminue considérablement la consommation d'énergie. Lorsque toutes les conditions sus citées sont atteintes, il en découle naturellement l'idée de modélisation des cinétiques tant de la perte en eau, que du temps de séchage. Ceci, dans le but d'une éventuelle interpolation et/ou extrapolation.

#### NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
t	Temps	min
V	Vitesse	m/s
T	Température	°C
H	Hauteur	m
L	Longueur	m
l	Largeur	m

#### REFERENCES

- [1] Puigalli J.R., *Séchage de produits naturels : du processus au procédé*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, France, 1987.
- [2] Codex Alimentarius Commission, *Joint FAO/WHO Food standards programme*, FAO, Rome, Italy, 2003.
- [3] Agriculture and Consumer Protection, *Food composition table for use in Africa*, 2002.
- [4] Kuitche A., Kapseu C, Hassana B., Fomethé A., *Mise au point d'un séchoir amélioré dans le contexte local*, 2005.
- [5] Kajuna, "Thin-layer drying of diced cassava roots," *AJFT, Science and Engineering Series*, Vol. 2, N° 2, pp. 94-100, 2001.
- [6] Henderson S.M. and Pabis S., "Grain drying theory: Temperature effect on drying coefficient," *J. Agric. Eng. Res.*, 6, pp. 169-174, 1961.