



**HAL**  
open science

## Détermination de la porosité par mesure du retrait au cours du séchage des produits agroalimentaires

Jamel Madiouli, Jalila Sghaier, Didier Lecomte, Habib Sammouda

### ► To cite this version:

Jamel Madiouli, Jalila Sghaier, Didier Lecomte, Habib Sammouda. Détermination de la porosité par mesure du retrait au cours du séchage des produits agroalimentaires. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00166705

**HAL Id: hal-00166705**

**<https://hal.science/hal-00166705>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# DETERMINATION DE LA POROSITE PAR MESURE DU RETRAIT AU COURS DU SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES

Jamel MADIOULI<sup>1</sup>, Jalila SGHAIER<sup>2</sup>, Didier LECOMTE<sup>3</sup> et Habib SAMMOUDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LETTM, Faculté des sciences de Tunis, Campus universitaire 1060, Tunis, Tunisie

<sup>2</sup>DGE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn jassar, 5019 Monastir, Tunisie

<sup>3</sup>RAPSODEE, EMAC, France

*madiouli@enstimac.fr, jalila.sghaier@enim.rnu.tn, lecomte@enstimac.fr,*

*habib.sammouda@fsm.rnu.tn*

**Résumé :** Un modèle théorique général du retrait en fonction de la teneur en eau est présenté et appliqué au séchage des produits agroalimentaires. Ce modèle du retrait dépend de la densité intrinsèque du solide, de la teneur en eau initiale, de la densité du liquide et de la porosité initiale. Il permet de calculer la porosité de l'échantillon en comparant le retrait expérimental et le retrait théorique. La validation de ce modèle est réalisée en utilisant des données expérimentales de la littérature sur la lyophilisation de la pomme. La détermination de l'incertitude du retrait idéal, du retrait expérimental et de la porosité calculée à partir du modèle est présentée dans ce papier.

**Mots clés :** retrait, porosité, séchage, teneur en eau, modèle

## 1. INTRODUCTION

Le séchage est utilisé pour favoriser la préservation des aliments par la réduction de la teneur en eau qui diminue l'activité microbiologique et prolonge la vie de l'aliment. La plupart des fruits et légumes présentent au cours du séchage un changement du volume et de la surface dû à l'évaporation de solvant. Au cours du séchage, le changement du volume apparent ou le retrait des produits agro-alimentaires [1,2,3,4], influence la qualité de produit d'une part et engendre la variation de plusieurs paramètres physiques (densité, porosité...) d'autre part.

La détermination expérimentale de la porosité nécessite soit l'interruption de l'expérience du séchage de l'échantillon entraînant des erreurs de mesure, soit l'utilisation de plusieurs échantillons, de mêmes caractéristiques et qui subissent le séchage sous les mêmes conditions. La détermination de la porosité à partir des modèles théoriques est peu abordée par la littérature. Cependant, on trouve plusieurs modèles théoriques et des corrélations empiriques qui présentent seulement la variation du volume apparent au cours du séchage. Les corrélations empiriques [2,4,5,6,7] sont reliées aux conditions et aux matériaux utilisés au cours de l'expérience. Les modèles théoriques [1,8,9,10,11] dépendent de différents paramètres (teneur en eau au cours du temps, teneur en eau initiale, densité liquide, densité solide, densité apparente, densité particulaire, porosité initiale, fraction de glucose, fraction d'amidon,...) et représentent le retrait au cours du séchage sous plusieurs formes (la variation de la longueur, du volume spécifique, du volume, du volume normé à son volume initiale,... en fonction de la masse, la teneur en eau, la teneur en eau normé à la teneur en eau initiale, ...) ce qui complique la comparaison des différents modèles et leurs applications à différents matériaux. La mesure des paramètres des modèles théoriques nécessite l'interruption de l'expérience ce qui perturbe les mesures expérimentales.

Dans ce travail, on présente un modèle général du retrait se basant sur le principe de la conservation de la masse et l'additivité des volumes des différentes phases du matériau. Ce modèle s'écrit en fonction des paramètres déterminés en amont et en aval de l'expérience et

sans interruption du séchage (la densité intrinsèque du solide, la densité du liquide, la porosité initiale et la teneur en eau initiale). On détermine aussi les différents cas du retrait en fonction de la porosité initiale et de la porosité développée au cours du séchage. Dans un deuxième temps, on calcule la porosité à partir de ce modèle général de retrait et des résultats expérimentaux du retrait et on la compare à la porosité expérimentale mesurée pour différents matériaux sous différents modes et conditions du séchage. Dans la dernière étape, on détermine l'incertitude du modèle du retrait en utilisant des expériences faites sur différents matériaux de la littérature.

## 2. PRESENTATION DU MODELE

On utilise le principe de la conservation de la masse et l'additivité des volumes des différentes phases de l'échantillon.

D'après l'équation de la conservation de la phase solide [10], on a :

$$\frac{\rho V}{\rho_0 V_0} = \frac{1 + X}{1 + X_0} \quad (1)$$

La densité apparente est la somme des concentrations massiques des phases liquide et solide (la concentration de la phase gaz est négligée):

$$\rho = \varepsilon_L \rho_L + (1 - \varepsilon - \varepsilon_L) \rho_S \quad (2)$$

Où la fraction liquide  $\varepsilon_L$  est reliée à la teneur en eau  $X$  par l'équation suivante :

$$\varepsilon_L = \frac{\rho}{\rho_L} \frac{X}{1 + X} \quad (3)$$

En introduisant le paramètre  $\beta = \frac{\rho_S}{\rho_L}$  et en utilisant les équations 1, 2 et 3, on a:

$$\frac{(1 - \varepsilon) V}{(1 - \varepsilon_0) V_0} = A(\beta) \frac{X}{X_0} + B(\beta) \quad (4)$$

$$\text{Où } A(\beta) = \frac{X_0 \beta}{1 + \beta X_0} \quad (5)$$

$$\text{et } B(\beta) = \frac{1}{1 + \beta X_0} \quad (6)$$

Les équations 4, 5 et 6 montrent que le modèle du retrait dépend de quatre paramètres: densité intrinsèque solide  $\rho_S$ , densité intrinsèque liquide  $\rho_L$ , porosité initiale  $\varepsilon_0$  et la teneur en eau initiale  $X_0$ .

On remarque que le terme  $\frac{(1 - \varepsilon) V}{(1 - \varepsilon_0) V_0}$  varie linéairement en fonction de la teneur en eau normé

à la teneur en eau initiale. Donc la variation du volume normé au volume initial est gouvernée par la porosité initiale et la porosité développée au cours du séchage et on peut distinguer quatre cas en fonction des porosités :

- 1- Retrait idéal ( $\varepsilon = 0$ ) sans porosité initiale ( $\varepsilon_0 = 0$ )
- 2- Retrait idéal ( $\varepsilon = \varepsilon_0$ ) avec porosité initiale non nulle ( $\varepsilon_0 \neq 0$ )
- 3- Retrait non idéal ( $\varepsilon \neq 0$ ) sans porosité initiale ( $\varepsilon_0 = 0$ )
- 4- Retrait non idéal ( $\varepsilon \neq 0$ ) avec porosité initiale non nulle ( $\varepsilon_0 \neq 0$ ) : cas général

On essaye de présenter dans ce qui suit le premier et le dernier cas (cas général) :

### 2.1. Retrait idéal ( $\varepsilon = 0$ ) sans porosité initiale ( $\varepsilon_0 = 0$ )

Dans le cas du retrait idéal, la courbe  $y$  est linéaire et peut être écrit sous la forme :

$$y = \frac{V}{V_0} = A(\beta) \frac{X}{X_0} + B(\beta) \quad (7)$$

Cette expression est établie par Vacarezza [12] et utilisée pour la modélisation du retrait des végétaux.

### 2.2. Retrait non idéal ( $\varepsilon \neq 0$ ) avec porosité initiale non nulle ( $\varepsilon_0 \neq 0$ )

Dans ce cas, le retrait est donné par l'équation (4). En prenant  $z = \frac{V}{V_0}$  comme retrait expérimental du produit et en l'utilisant avec  $y$  le retrait idéal, on peut déduire la porosité par l'équation suivante:

$$\varepsilon = \frac{z - (1 - \varepsilon_0)y}{z} \quad (8)$$

Cette équation a aussi une interprétation graphique dans le diagramme du retrait (Figure 1).

On définit une courbe de retrait idéal modifiée en multipliant la courbe du retrait idéal par la quantité  $(1 - \varepsilon_0)$ . La porosité est égale au rapport des segments :  $\varepsilon = \frac{AD}{AC}$ , comme indiqué sur la figure 1.

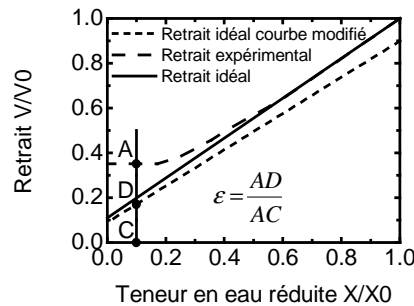


Figure 01 : la courbe du retrait non idéal avec porosité initiale non nulle

## 3. CALCUL DE L'INCERTITUDE DE MESURE

L'incertitude de la porosité calculée est due à :

- L'incertitude du retrait idéal qui dépend de l'incertitude de ses paramètres.
- L'incertitude du retrait expérimental.

Le modèle du retrait s'écrit sous la forme suivante :

$$(1 - \varepsilon) \frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0}{X_0 + 1} \left[ \frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_L} X \right] \quad (9)$$

La différenciation de la dernière équation donne l'expression suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} + \frac{\Delta X_0}{X_0 + 1} + \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s (1 + \beta X)} + \frac{\Delta X}{\left( \frac{1}{\beta} + X \right)} + \frac{X}{\rho_L \left( \frac{1}{\beta} + X \right)} \Delta \rho_L + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta V_0}{V_0} \quad (10)$$

Donc, on peut déterminer l'incertitude de la porosité calculée en connaissant les incertitudes de différents paramètres du modèle de retrait (la densité solide, la densité liquide, la densité initiale et la teneur en eau).

## 4. APPLICATION DU MODELE

On a appliqué le modèle du retrait idéal pour différents produits alimentaires soumis à des différents modes du séchage. On présente dans ce qui suit le cas d'un produit agroalimentaire (la pomme) séché par lyophilisation.

Krokida et Maroulis [3] ont étudié le comportement des produits agroalimentaires (pomme, carotte, banane et pomme de terre) sous différents modes du séchage (séchage convectif, lyophilisation,...). Ils ont utilisé comme appareils de mesure une balance électronique de précision  $10^{-4}$ g pour déterminer la masse de l'échantillon, le stéréo pycnomètre Beckmann 930 pour mesurer le volume particulier et le n-heptane pour mesurer le volume apparent de l'échantillon au cours du séchage.

Ces mesures expérimentales au cours du séchage ont permis à ces auteurs de tracer la variation de la densité solide, de la densité apparente, de la porosité et du volume spécifique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon au cours du séchage.

En appliquant le modèle du retrait idéal sur la pomme dans le cas de la lyophilisation (la température est de  $-35^{\circ}\text{C}$  et la pression est de 0.04 mbar), le retrait expérimental de la pomme (figure 2) est linéaire de pente plus faible que celle de la courbe du retrait idéal. La porosité calculée par le modèle est proche de la porosité expérimentale et elle varie linéairement, ce qui suggère la conservation d'un squelette poreuse au cours du séchage. En déterminant l'incertitude du retrait idéal et du retrait expérimental (figure 3), on a calculé l'incertitude de la porosité déterminée à partir du modèle (figure 4).

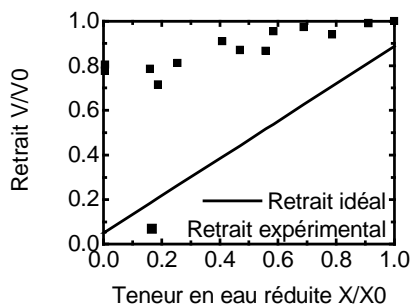


Figure 02 : Les retraits de la pomme en fonction de la teneur en eau réduite au cours de la lyophilisation

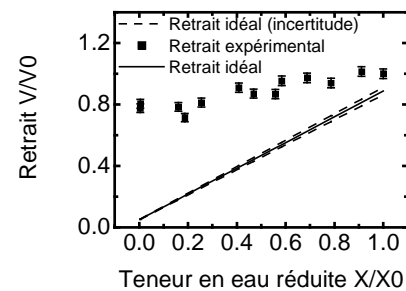


Figure 03 : Les retraits de la pomme munis de leurs incertitudes de mesure en fonction de la teneur en eau réduite au cours de la lyophilisation

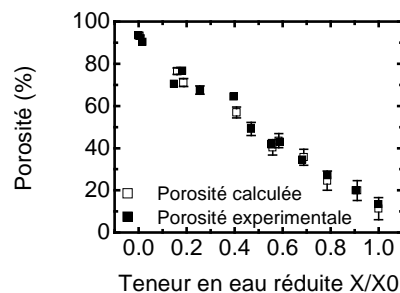


Figure 04 : La porosité calculée munie de son incertitude et la porosité expérimentale de la pomme en fonction de la teneur en eau réduite au cours de la lyophilisation.

## CONCLUSION

Dans ce papier, on a présenté un modèle théorique général permettant de déterminer le retrait de différents produits au cours du séchage en fonction de la teneur en eau. Ce modèle

permet aussi de calculer la porosité de l'échantillon à partir du retrait expérimental et du retrait théorique. On a validé ce modèle en l'appliquant à des données expérimentales de la littérature dans le cas de la lyophilisation de la pomme. Les résultats obtenus montrent la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la porosité. Ce modèle s'avère efficace pour la détermination de la porosité des produits agroalimentaires sans avoir recours aux expériences coûteuses et délicates. La détermination expérimentale de la porosité nécessite en effet soit l'interruption du séchage d'un échantillon soit l'utilisation de plusieurs échantillons correspondant aux différents teneurs en eau : ce qui augmente les erreurs de mesure et met l'accent sur l'avantage du modèle théorique développé. La détermination de l'incertitude du retrait idéal, du retrait expérimental et de la porosité calculée met l'accent sur l'efficacité du modèle développé.

### Nomenclatures

$V$  : Volume du matériau,  $m^3$   
 $V_0$  : Volume Initial du matériau,  $m^3$   
 $X$  : Teneur en eau,  $kg$  d'eau/ $kg$  du matériau sec  
 $X_0$  : Teneur en eau initiale,  $kg$  d'eau/ $kg$  du matériau sec

### Symboles grecs

$\varepsilon$  : Porosité  
 $\varepsilon_0$  : Porosité initiale  
 $\rho_0$  : Densité apparente initiale,  $kg/m^3$   
 $\rho_L$  : Densité du liquide,  $kg/m^3$   
 $\rho_S$  : Densité du solide,  $kg/m^3$

### Références:

- [1] J.E. Lozano, E. Rotstein et M.J. Urbicain, Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48, 1497-1502, 1983.
- [2] C. Ratti, Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91-105, 1994.
- [3] M.K. Krokida et Z.B. Maroulis, Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying technology*, 15(10), 2441-2458, 1997.
- [4] L. Mayor et A.M. Sereno, Modelling shrinkage during convective drying of food material: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386, 2004.
- [5] N.P. Zogzas et Z.B. Maroulis, Marinou-Kouris D., Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying technology*, 12(7), 1653-1666, 1994.
- [6] S. Azzouz, W. Jomaa et A. Belghith, Drying kinetic equation of single layer of grapes. *Proceedings of the 11th. International Drying Symposium (IDS 1998), Halkidiki (Greece)*, B, 988-997, 1998.
- [7] A. Talla, J.R. Puiggali, W. Jomaa et Y. Jannot, Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64, 103-109, 2004.
- [8] P.W. Kilpatrick, E. Lowe et W. B. Van Ardsel, Tunnel dehydrators for fruit and vegetables. In E. M. Mrak, & G. F. Stewart (Eds.), *Advances in food research* 6, 313-372. New York: Academic Press, 1955.
- [9] K. Suzuki, K. Kubota T. Hasegawa et H. Hosaka, Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, 41, 1189-1193, 1976.
- [10] M.G. Perez et A. Calvelo, Modeling the thermal conductivity of cooked meat. *Journal of Food Science*, 49, 152-156, 1984.
- [11] M.S. Rahman, C.O. Perera, X.D. Chen, R.H. Driscoll et P.L. Potluri, Density Shrinkage and porosity of calamari mantle meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, 30, 135-145, 1996.
- [12] L. Vacarezza, Cinética y mecanismo de transporte de agua durante la deshidratación de la remolacha azucarera, *Ph.D. Thesis, Universidad de Buenos Aires*, 1975.