

## MESURE DU RETRAIT AU COURS DU SECHAGE PAR UNE METHODE NON DESTRUCTIVE : LA STEREOVISION

J. Madiouli<sup>1</sup>, J. Sghaier<sup>1,2</sup>, D. Lecomte<sup>3</sup>, J. J. Orteu<sup>3</sup>, L. Robert<sup>3</sup>, H. Sammouda<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique (LETTM)  
Département de physique, Faculté des Sciences de Tunis,  
Campus universitaire 1060, Tunis, Tunisie  
[madiouli@enstimac.fr](mailto:madiouli@enstimac.fr)

<sup>2</sup> Département de Génie Energétique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir,  
Avenue Ibn Eljazzar, 5019 Monastir, Tunisie  
[Jalila.Sghaier@enim.rnu.tn](mailto:Jalila.Sghaier@enim.rnu.tn)

<sup>3</sup> Université de Toulouse, Ecole des Mines d'Albi, Centre (RAPSODEE).  
Campus Universitaire de Jarlard, Route de Teillet, 81013 Albi CT Cedex 09 - France  
[Didier.lecomte@enstimac.fr](mailto:Didier.lecomte@enstimac.fr), [laurent.robert@enstimac.fr](mailto:laurent.robert@enstimac.fr), [jean-jose.orteu@enstimac.fr](mailto:jean-jose.orteu@enstimac.fr)

<sup>4</sup> Ecole Supérieure des Sciences et de Technologie (ESST-HSousse)  
Rue Amine EL Abbassi 4011 Hammam Sousse Tunisie  
[habib.sammouda@fsm.rnu.tn](mailto:habib.sammouda@fsm.rnu.tn)

### RESUME

La plupart des produits agroalimentaires tel que les fruits et légumes présentent un important changement du volume, au cours du séchage dû à la perte d'eau. Ainsi, des nombreuses études théoriques et expérimentales portent sur la compréhension des mécanismes de transport au sein des produits au cours du séchage. Dans ce travail, on se propose de présenter une méthodologie expérimentale dite « non destructive » qui permet de déterminer la variation du volume apparent du produit (la banane), en continu, au cours du séchage. Cette méthodologie s'appelle la stéréovision ou la stéréo-corrélation. Le couplage de la mesure du volume apparent et la masse au cours du séchage, permet de déterminer la variation de plusieurs paramètres (volume, densité apparente, etc....) en fonction de temps. Utilisant un modèle de retrait développé par Madiouli et al. [1], on peut calculer la porosité au cours du séchage.

### NOMENCLATURE

$V$ : Volume du matériau	$m^3$
$\varepsilon$ : Porosité	
$X$ : Teneur en eau	$kg \text{ d'eau/kg du matériau sec}$
$\rho$ : Densité	$kg/m^3$

### Indices

0	: Porosité initiale
l	: Liquide
s	: Solide

### 1. INTRODUCTION

Dans le domaine agroalimentaire, le séchage permet la diminution de l'activité de l'eau afin de prolonger la conservation des aliments. La plupart des fruits et légumes présentent un important changement, au cours du séchage, de forme externe dû à la perte de l'eau [2,3,4]. Ce changement influence d'une part la qualité du produit et l'avis de consommateur et engendre d'autre part la variation de plusieurs paramètres physiques. Ainsi, des nombreuses études portent sur la compréhension des mécanismes de transport au sein des matériaux au cours du séchage et sur la détermination des propriétés thermo physiques [5,6,7].

La mesure expérimentale des paramètres physiques (volume apparent, perméabilité, masse, conductivité thermique, etc....) au cours de séchage a fait l'objet des plusieurs travaux dans la littérature afin d'analyser les différents mécanismes régissant le processus thermique. Mais cette mesure expérimentale s'accompagne dans plusieurs cas, soit par l'arrêt de l'expérience (influence sur les résultats), soit par l'utilisation de plusieurs échantillons de mêmes caractéristiques et

subissant les mêmes conditions au cours du processus thermique. Récemment, le développement des méthodes dites « non destructives » devient de plus en plus très important pour effectuer ces mesures. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode de balayage par Laser [8] qui est utilisée au cours du séchage des produits agroalimentaires (pomme, pomme de terre, carotte et l'avocat). De même, on trouve la méthode de la microtomographie aux rayons X [9], appliquée pour la mesure de la variation du volume des boues au cours du séchage dans des conditions atmosphériques. Le balayage par Laser et la microtomographie se basent sur l'hypothèse que les échantillons gardent leurs formes régulières (cylindriques) au cours du séchage.

On se propose, dans ce travail, de présenter la méthode de la stéréovision ou stéréocorrélation permettant de déterminer la variation du volume apparent de la banane, ayant une forme irrégulière, au cours du séchage. Cette mesure en continu, couplée à la mesure de la masse, permet de déterminer la variation de plusieurs paramètres (volume, densité apparente, teneur en eau, etc...) au cours du séchage. En utilisant le modèle de retrait présenté par Madiouli et al. [1], le couplage de la mesure du volume apparent avec la masse permet de calculer la porosité de la banane au cours du séchage.

## 2. LA VISION PAR ORDINATEUR

### 2.1. Définition

La vision par ordinateur consiste à déterminer les formes des objets par l'analyse des images prises par une ou plusieurs caméras. On peut faire une correspondance entre la vision par ordinateur et la vision de l'Homme en considérant le rôle des caméras comme le rôle des yeux en prenant les images des scènes et l'ordinateur comme le cerveau pour faire l'analyse des images et avoir la forme réelle des objets en 3D. Différentes situations peuvent être décrites suivant la mobilité ou la stabilité de la source de lumière, de l'objet et de l'appareil des prises des images. Trois cas peuvent être présents : la stéréo photométrie, le mouvement et la stéréovision. La stéréovision est le cas où la scène et les sources lumineuses sont fixes, l'observateur se déplace.

Dans ce que suit, on va présenter le cas de la stéréovision utilisé dans nos travaux pour déterminer le volume et la surface de l'échantillon au cours du séchage (Figure 1).

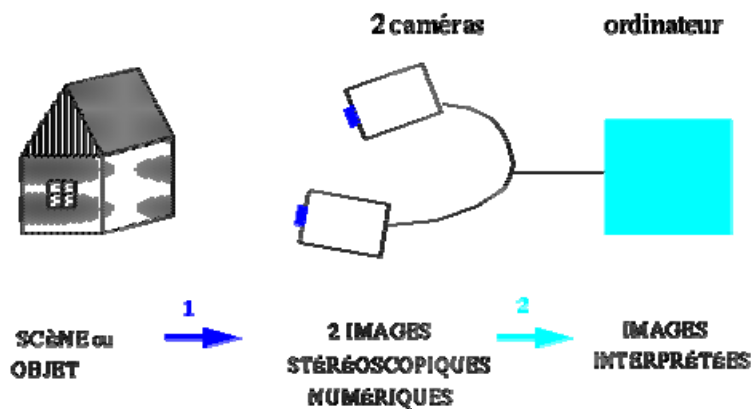


Figure 1. Le principe de la vision par ordinateur [10]

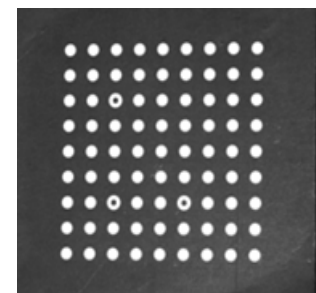


Figure 2 : Mire utilisée pour le calibrage des caméras

### 2.2. La stéréovision

On a utilisé dans l'expérience 2 caméras (stéréovision binoculaire). La stéréovision s'effectue en trois étapes successives : Calibrage, appariement et triangulation [11]. La phase la plus difficile est la phase de l'appariement et qui varie le plus d'une méthode à l'autre. Les phases 1 et 3 sont

purement géométriques, contrairement à la phase 2 qui utilise les niveaux de gris  $E_{i,j}$  des deux images prises par deux caméras dans le même instant.

### 2.2.1. Le calibrage : phase 1

Le calibrage d'une caméra est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Le calibrage consiste à calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'un système de stéréovision en utilisant une mire (figure 2) dont on connaît son modèle [12].

Le calibrage d'un capteur de stéréovision, constitué de deux caméras ou plus liées de façon rigide, consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de chacune des caméras, la position et l'orientation relative de ces caméras. Ces paramètres de calibrage sont nécessaires pour calculer par triangulation (la dernière étape de la stéréovision) les coordonnées tridimensionnelles d'un point correspondant à des pixels appariés dans les images.

Si on prend par exemple plusieurs points objet  $P_i(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})$  visibles sur deux images, on cherche les deux points  $I_{gi} = (x_{pi}^g, y_{pi}^g)$  dans l'image gauche et  $I_{di} = (x_{pi}^d, y_{pi}^d)$  dans l'image droite correspondant à chaque point  $P_i$ . Le calibrage consiste à déterminer les coefficients permettant de calculer les coordonnées des points  $I_{gi}$  de l'image gauche et  $I_{di}$  de l'image droite pour tout point objet  $P_i(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})$ .

Grâce à des logiciels développés (VIC 2006) permettant de faire le calibrage en prenant plusieurs positions de la mire, à priori de dimension connue, on peut faire le calibrage du système.

### 2.2.2. L'appariement : phase 2

L'appariement ou "mise en correspondance" est la phase du traitement la plus difficile, car elle n'est pas purement géométrique. Cette phase fait appel aux niveaux de gris des deux images, contrairement aux phases 1 et 3, dans lesquelles on n'a pas à utiliser les niveaux de gris  $E_{i,j}^g$  et  $E_{k,l}^d$ .

Par définition, on dit que deux pixels  $I_{i,j}^g$  et  $I_{k,l}^d$  sont appariés s'ils correspondent au même point physique P de la scène. On essaye de chercher la similarité entre les niveaux gris  $E_{i,j}^g$  et  $E_{k,l}^d$  correspondant à ces deux pixels. On peut avoir des erreurs en fait que le point P ne réémet pas la même énergie lumineuse dans toutes les directions, donc les deux niveaux gris peuvent être différents. A cet effet et afin d'éliminer les erreurs ou les paires erronées, on essaye toujours de comparer non pas un pixel de l'image gauche avec un pixel de l'image droite, mais un pixel de l'image gauche et son voisinage, avec un pixel de l'image droite et son voisinage. C'est ce qu'on appelle la corrélation.

Pour faire cette comparaison d'un pixel et son voisinage de l'image droite avec un autre pixel et son voisinage de l'image gauche, on doit prendre la même fenêtre, sur une surface continue, de corrélation sur l'image gauche et l'image droite. Pour la mesure de la corrélation, on utilise généralement la corrélation euclidienne. Plus la valeur de la corrélation euclidienne entre deux pixels et leurs voisinages est faible, plus ces pixels sont corrélés.

Après la comparaison de la valeur des corrélations des points on peut avoir des paires erronées. Pour éliminer ces paires ou bien de les minimiser, on utilise des filtres ou des méthodes dites « contraintes » (la contrainte épipolaire, la contrainte d'unicité, la contrainte seuil et la contrainte d'ordre).

### 2.2.3. La triangulation

À partir des points correctement appariés, la reconstruction 3D s'effectue par triangulation [13,14]. La précision de mesure de formes 3D par stéréovision dépend de plusieurs facteurs

- la qualité des caméras et leur résolution ;

- la configuration des caméras (angle formé par leur axe optique) qui conditionne la précision de triangulation ;
- la précision du calibrage du capteur de vision stéréoscopique ;
- la précision avec laquelle les points de mesure sont extraits dans chacune des images stéréoscopiques.

La précision avec laquelle les points de mesure sont extraits dans chacune des images stéréoscopiques dépend du type de point de mesure choisi. Avec des caméras numériques de résolution élevée (par exemple  $1\ 024 \times 1\ 024$ ), il est possible d'obtenir par stéréo-corrélation une précision de l'ordre de 0,01 %.

### 3. MANIPULATION ET RESULTATS

La partie expérimentale consiste à utiliser la méthode de la stéréovision (la mesure du volume) couplée à une balance de sensibilité très élevée pour la mesure de la masse d'une banane au cours du séchage.

La banane coupée transversalement et posée sur une balance est séchée dans un banc de climatisation dans lequel circule de l'air venant d'une centrale de traitement d'air. L'air est soufflé et repris par des grilles d'air mises sur l'une des faces de la chambre. L'air soufflé est le mélange d'air repris (90%) et d'air neuf (10%). L'air est soufflé à une vitesse faible et à une température de  $26,7 \pm 0,4^\circ\text{C}$ . L'humidité dans le local n'est pas bien contrôlée vu que l'air soufflé contient de l'air neuf à humidité variable.

On projette sur la banane à l'aide d'un rétroprojecteur des mouchetis construits à l'aide de logiciel **VisioCalib**. On essaye de faire l'analyse des résultats de la banane en utilisant divers mouchetis pour s'assurer de la bonne construction des mouchetis appropriés à la banane.

Le rétroprojecteur est mis horizontalement sur une table et reflète sa lumière sur la banane grâce à un miroir mis à  $45^\circ$  de l'horizontal mis sur le socle rigide qui maintient les deux caméras. Les deux caméras sont fixées sur un socle fixe et orienté vers la banane en cours de séchage.

La phase de calibrage des deux caméras (la position des deux caméras : la distance qui les séparent, l'angle avec les trois axes de l'espace etc ...) est faite par la prise de quelques images des mirs en différentes positions. Le traitement des données donne la forme 3D (figure 3) ainsi que des coupes transversales de la banane avec une précision très élevée (figure 4). En exploitant ces données, on peut calculer le volume et la surface externe de la banane et déterminer la courbe du retrait en fonction de la perte de masse.

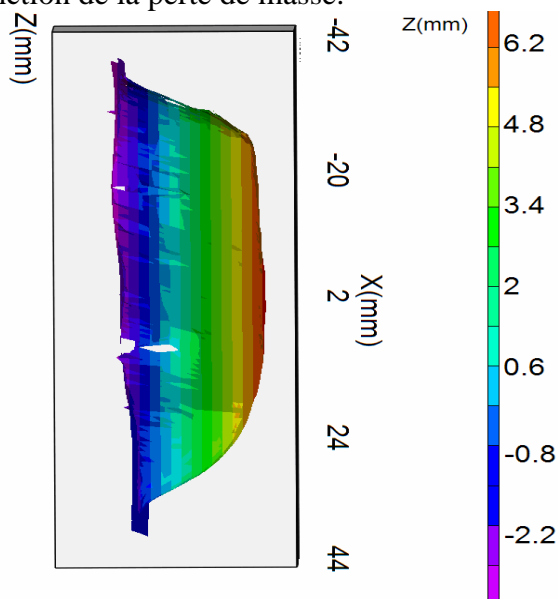


Figure 3 : Forme 3D de la banane au départ du séchage convectif ( $t=0$ )

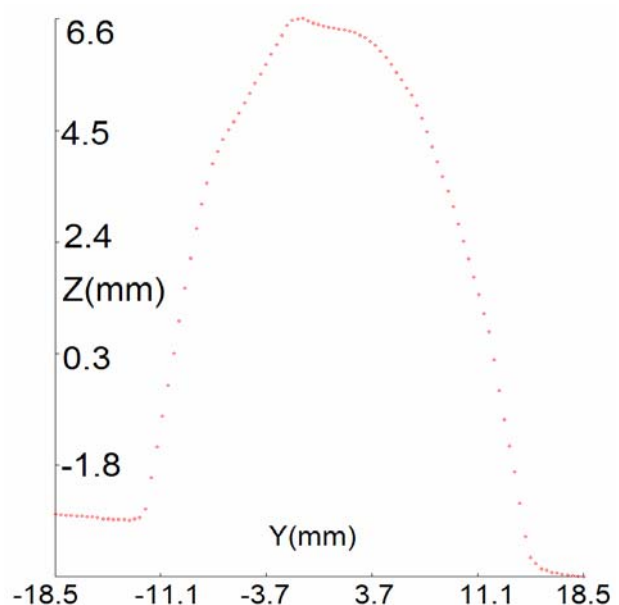


Figure 4 : coupe verticale de la banane en  $x=0$  au début du séchage

#### 4. PRESENTATION DU MODELE

Le modèle présenté par Madiouli et al. (2007) s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{(1-\varepsilon)V}{(1-\varepsilon_0)V_0} = \frac{\beta X_0}{1+\beta X_0} \frac{X}{X_0} + \frac{1}{1+\beta X_0} \quad (1) \quad \text{Où} \quad \beta = \frac{\rho_s}{\rho_L}$$

Ce modèle du retrait, dépendant de quatre paramètres mesurés en amont et en aval de l'expérience (densité intrinsèque solide  $\rho_s$ , densité intrinsèque liquide  $\rho_L$ , porosité initiale  $\varepsilon_0$  et la teneur en eau initiale  $X_0$ ) permet de calculer la porosité au cours du séchage. Dans le cas général où le retrait est non idéal ( $\varepsilon \neq 0$ ) et la porosité initiale est non nulle ( $\varepsilon_0 \neq 0$ ), le calcul de la porosité se fait par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{z - (1 - \varepsilon_0)y}{z} \quad (2)$$

avec  $z = \frac{V}{V_0}$  est le retrait expérimental du produit et  $y$  est le retrait idéal.

Cette équation a aussi une interprétation graphique dans le diagramme du retrait (Figure 5). 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 5. L'application de cette équation sur les résultats obtenus par la stéréovision, mesurant le volume apparent de la banane, permet le calcul de la porosité au cours du séchage (figure 6 et 7)

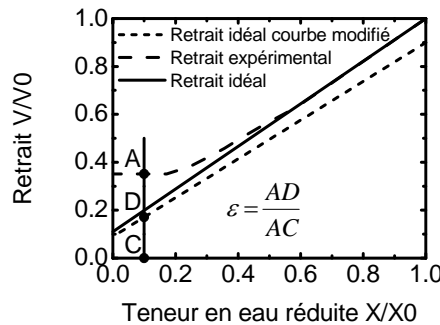


Figure 5 : la courbe du retrait non idéal avec porosité initiale non nulle

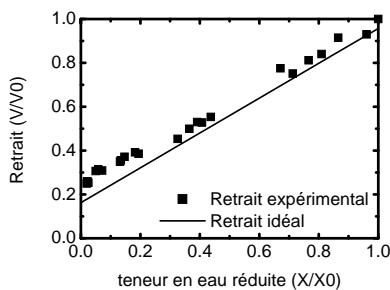


Figure 6 : Le retrait de la banane mesuré par la méthode la stéréovision

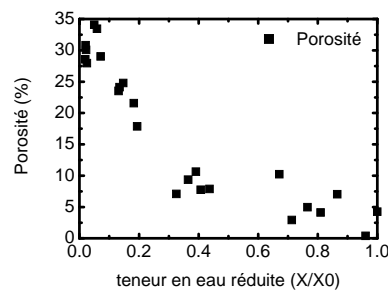


Figure 7 : La porosité de la banane calculée par le modèle du retrait idéal

## 5. CONCLUSION

Ce travail présente la méthode de stéréovision utilisée pour mesurer le volume apparent et la surface d'un échantillon de banane au cours du séchage. Cette méthode est dite non destructive car elle permet de déterminer en continu le volume et la surface de l'échantillon au cours du séchage. La première étape de la manipulation est la construction de la forme 3D à partir des paires des images prises par des Caméras numériques. La deuxième étape consiste à exploiter les formes 3D obtenus de la banane pour extraire des informations du volume apparent et de la surface d'échange. Enfin on a utilisé le modèle développé par Madiouli et al. pour le calcul de la porosité.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. J. Madiouli, D. Lecomte, T. Nganya, S. Chavez, J. Sghaier and H. Sammouda, 2007, A Method for Determination of Porosity Change from Shrinkage Curves of Deformable Materials, *Drying Technology*, 25:4, 621 – 628
2. C. Ratti, 1994, Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23 (1), 91–105.
3. N.P. Zogzas, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, 1994, Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying technology*, 12 (7), 1653–1666
4. L. Mayor, A.M. Sereno, 2004, Modelling shrinkage during convective drying of food material: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
5. N. Kechaou, 1989, Séchage de gels fortement déformables : étude de la diffusion interne de l'eau et modélisation.
6. W. Jomaa, 1991, Séchage de matériaux fortement déformables prise en compte de la vitesse de retrait; Thèse de l'Université Bordeaux I.
7. F. Zagrouba, 1993, Séchage mixte par convection et un apport rayonnant micro-onde des milieux déformables. Modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de matière.
8. B.K. May, P. Perré, 2002, the importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 54, 271–282.
9. A. Leonard, S. Blancher, R. Pirard, P. Marchot, J.P. Pirard, M. Crine, 2003, Multiscale texture characterization of wastewater sludges dried in a convective rig. *Drying Technology*, 21 (8), 1507–1526.
10. Durou J. D. et Pocquet A. M., Cours pour la maîtrise d'informatique, Module 11 Vision par ordinateur, Université Paul Sabatier, Toulouse.
11. J.J. Orteu, 2007, Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision, *Techniques de l'Ingénieur*, BM 7 015.
12. S. Drouin, Calibrage et auto calibrage d'un système de stéréovision, Rapport final, Août 2000.
13. Garcia, D. ; Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 21 déc. 2001.
14. D. Garcia, J.J Orteu, and L. Penazzi, 2002. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 125-126, Pages 736-742