

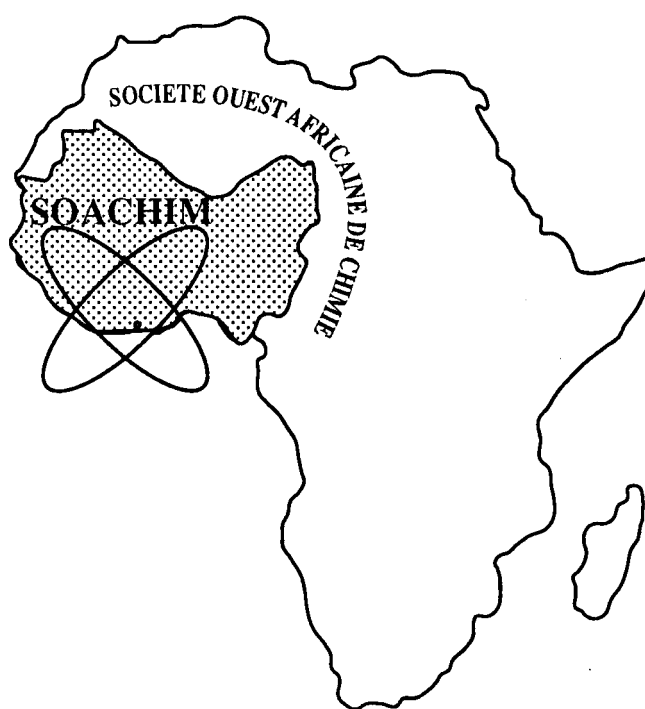
*Couplage des mécanismes de déshydratation  
et du retrait de la Spiruline platensis  
« Arthrospiraplatensis » lors d'un séchage  
isotherme*

**Salmwendé Eloi Tiendrebeogo, Alfa Oumar Dissa,  
Guy Christian Tubreoumya, Kayaba Haro,  
Fabien Cherblanc**

*Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*

*J. Soc. Ouest-Afr. Chim.(2015), 040 : 17 - 23*

20<sup>ème</sup> Année, Décembre 2015



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

Site Web: <http://www.soachim.org>

## Couplage des mécanismes de déshydratation et du retrait de la *Spiruline platensis* « *Arthrospiraplatensis* » lors d'un séchage isotherme

Salmwendé Eloi Tiendrebeogo<sup>1\*</sup>, Alfa Oumar Dissa<sup>1</sup>, Guy Christian Tubreoumya<sup>1</sup>,  
Kayaba Haro<sup>1</sup>, Fabien Cherblanc<sup>2</sup>

1. Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées, URF/SEA, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

2. Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) - Université de Montpellier 2, Place Eugène Bataillon 34000 Montpellier, France

(Reçu le 03/08/2015 – Accepté après corrections le 24/04/ 2016)

**Résumé :** L'étude expérimentale du suivi de la variation du volume d'un cylindre de *Spiruline platensis* lors du séchage isotherme à 50°C et  $HR = 6\%$  est abordée. Une caractérisation expérimentale et théorique des échantillons provenant du Burkina-Faso et de la France a montré que leur retrait volumique est non linéaire dans les dernières périodes de séchage. La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques montre que  $w = 1,8 \text{ kg}_w / \text{kg}_{dm}$  est une teneur en eau limite (limite de contraction linéique) de la saturation des échantillons. Ils passent à un régime triphasique où des cavités gazeuses apparaissent progressivement et empêchent le retrait sous l'effet de la déshydratation. Les données expérimentales de la variation du volume sont approximées par une fonction exponentielle qui est utilisée pour déterminer le coefficient d'expansion hydrique de chaque souche de *Spiruline*.

**Mots clés :** *Spiruline platensis*, Séchage, retrait volumique, phase gazeuse, Coefficient d'expansion.

## Coupling mechanisms dehydration and shrinkage of *Spirulina platensis* « *Arthrospiraplatensis* » during isothermal drying

**Abstract:** The experimental study of monitoring of the volume variation of a cylinder of *Spirulina platensis* during isothermal drying at 50°C and  $HR = 6\%$  is discussed. Experimental characterization and biphasic modeling applied to samples from Burkina Faso and France show that their volume shrinkage is nonlinear. From the comparison of experimental and theoretical results, it appears that  $w = 1,8 \text{ kg}_w / \text{kg}_{ms}$  is a water content limit of the saturation of the two samples. They pass to a regime triphasic where of the gaseous cavities appear gradually and prevents shrinkage under the dehydration effect. The experimental data of the volume variation are approximated by exponential function and used to determine the hydric expansion coefficient of each stump of *Spirulina*.

**Key Words:** *Spirulina platensis*, drying, volume shrinkage, gaseous phase, expansion coefficient

---

\* Auteur de correspondance : Salmwendé Eloi Tiendrebeogo ; E-mail : [tiendrebeogoeloi@yahoo.fr](mailto:tiendrebeogoeloi@yahoo.fr)

## 1. Introduction

La *Spiruline platensis*, une algue fortement poreuse est cultivée dans le monde pour ses qualités nutritionnelles et thérapeutiques. Dans le contexte actuel où des solutions efficaces doivent être trouvées pour produire des aliments sains et nutritifs pour tous, la réduction des pertes alimentaires liée au développement des micro-organismes sévères et l'amélioration de leur qualité devraient être une priorité permanente. Le séchage qui vise à renforcer les liaisons des molécules d'eau par réduction de cette dernière, est une des techniques les plus utilisées pour mettre à l'abri du produit des agents dégradants et d'étendre sa conservation.

En s'appuyant sur la composition exceptionnelle de cette algue en protéine, en acides aminés essentiels, en glucides, en lipides, en vitamines<sup>[1-3]</sup>, le séchage doit respecter un certain nombre de critères. En plus des contraintes et des fissures, le processus de séchage induit une contraction volumique de la matrice solide. Pendant la phase de séchage des matériaux déformables, le départ d'eau est accompagné d'un retrait solide qui dans le cas où il atteint la limite de la contraction peut engendrer une pénétration d'air. La phase gazeuse piégée contribuerait à augmenter la température des zones du milieu pouvant à son tour être l'une des sources de la détérioration de la qualité (les vitamines et les propriétés thérapeutiques) du produit. Que ce soit en moyenne ou en grande production de la *Spiruline*, la maîtrise du retrait associé à la teneur en eau lors d'un processus de déshydratation présente un véritable défi.

Dans ce document, l'objectif principal est de comprendre et de décrire le mécanisme du retrait lié au transfert du fluide dans la *Spiruline* afin de prédire la transition entre les régimes diphasique et triphasique. La contraction de la *Spiruline* avait déjà été abordée expérimentalement par Desmorieux et Dissa<sup>[4, 5]</sup> en utilisant une méthode de mesure des dimensions caractéristiques de l'échantillon. La complexité du mouvement des matériaux a conduit certains auteurs<sup>[6-11]</sup> à développer des méthodes numériques en appui avec les données expérimentales pour prédire le retrait des produits alimentaires tels que la patate, le gombo, la banane, etc. Desmorieux et Hui<sup>[4, 12]</sup> ont montré que le retrait au cours du séchage de certains matériaux est anisotrope et engendre des modifications géométriques non uniformes. Dans ce cas, l'accès au retrait par mesure directe des dimensions caractéristiques de l'échantillon devient délicat et ne permet pas d'avoir accès au retrait réel de la structure. Jusqu'à ce jour, les études réalisées

n'ont pas porté satisfaction totale en ce qui concerne la maîtrise du mécanisme couplé déshydratation-retrait. La présente étude est subdivisée en trois parties. D'abord, nous proposerons une méthode de détermination du retrait du volume basée sur la technique du maintien en immersion. Ensuite, déterminer l'évolution des propriétés hydrodynamiques de l'algue en fonction de la teneur en eau. Enfin, nous mettons en exergue une modélisation théorique diphasique des paramètres caractéristiques de la contraction solide.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Origine et prétraitement des matériaux

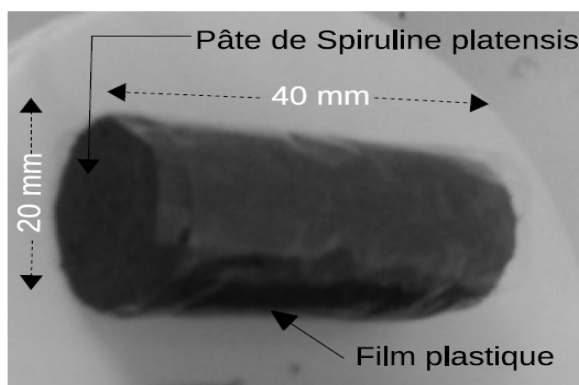
Les matériaux utilisés dans la présente étude sont des échantillons de *Spiruline platensis* provenant de deux sites exploitations situées dans deux zones différentes : Loumbila, ferme située à 15 km au nord de Ouagadougou, Burkina Faso. Cet échantillon de matériau est nommé « échantillon-B » dans ce manuscrit ; La Fon del Cardaire, ferme située à Gignac dans le sud de la France. Cet échantillon de matériau est appelé « échantillon-F ».

Leur mode de production n'est pas différent d'une exploitation à l'autre, d'un pays à l'autre. Ce sont les méthodes qui changent, adaptées à la taille de l'exploitation, à la main d'œuvre et aux matériels disponibles sur place. Cependant, si ces deux produits ont été cultivés dans des localités avec des climats différents, leur ensemencement est fait par des souches de même type « *platensis* » dans des bassins dont la salinité et l'alcalinité sont apportées par du bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) selon une norme Française sur les critères microbiologiques pour la *Spiruline*<sup>[13]</sup>. Des prétraitements ont été effectués sur chaque biomasse récoltée pour éliminer une bonne partie de l'eau de culture jusqu'à atteindre une teneur en eau donnée. Les modes de prétraitements employés sont différents d'une ferme à l'autre selon les matériels disponibles. Ainsi, la teneur en eau de l'échantillon-B est réduite à l'ordre de  $2,73 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  par un pressage manuel tandis que celle de l'échantillon-F est réduite à l'ordre de  $3,12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  par un essorage sous l'action du vide. Ces teneurs en eau obtenues après prétraitement sont considérées comme étant les teneurs en eau initiales des échantillons.

### 2.2. Échantillonnage

Après l'essorage, la *Spiruline* fraîche est transformée en échantillons adaptés aux essais. Une

forme cylindrique couramment utilisée dans les fermes lors du séchage est adoptée. Un procédé de conception est défini afin d'éviter la variabilité des échantillons : la biomasse fraîche est moulée sous forme cylindrique de 20 mm de diamètre et 40 mm d'épaisseur à l'aide d'une extrudeuse à piston constituée d'un tube cylindrique en téflon et d'un piston en acier ; les surfaces latérales cylindriques des échantillons sont enveloppées avec un film plastique de masse négligeable pour éviter l'adhésion entre l'échantillon et le support et assurer un transfert unidimensionnel; les échantillons ayant des masses initiales de l'ordre de 13 g sont sélectionnés pour être utilisés lors des essais (**Figure 1**). On admet par la suite que ces conditions sont remplies et les échantillons sont uniformes à l'état initial.



**Figure 1** : Cylindre d'échantillon d'étude

Pour déterminer expérimentalement le retrait de la *micro-algue* durant le séchage, nous avons choisi de suivre la variation du volume des échantillons par la technique du maintien en immersion.

### 2.3. Dispositif et procédure expérimentaux

La **figure 2** illustre le principe de l'approche expérimentale mise au point. Il consiste à déterminer à chaque instant le volume d'un échantillon cylindrique par la technique du maintien en immersion dont sa teneur en eau est préalablement identifiée.

Puis, d'en déduire l'évolution du coefficient du retrait par l'équation 2. Le liquide utilisé dans cette expérience est de l'eau distillée. Des échantillons sont placés dans une enceinte de séchage (**figure 2.a**) où la température et l'humidité relative de l'air sont maintenues respectivement à 50 °C par une étuve de marque Memmert UFP 600 et à 6 % fixée par une solution KOH. L'enceinte est mise en marche 24 heures, avant le début des mesures pour son conditionnement. Les mesures de masse ont été

effectuées avec une balance électronique de précision 10<sup>-3</sup>g. A chaque instant t, on prélève un échantillon et on détermine d'abord sa masse  $m_a$  dans l'air. Ensuite, à l'aide d'un panier grillagé, l'échantillon est immergé dans l'eau pour mesurer sa masse  $m_e$ . Le volume du produit immergé étant égal au volume d'eau déplacée, le volume  $V$  de l'échantillon correspondant à l'instant t est calculé par l'équation 1.  $V_0$ , volume initial du cylindre d'échantillon.

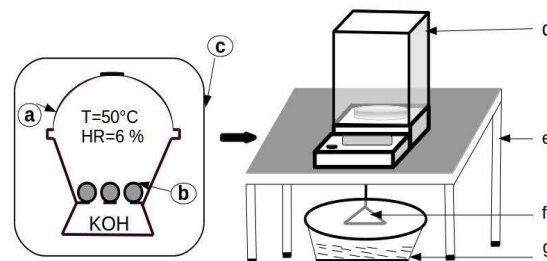
$$V = \frac{m_a - m_e}{\rho_w^*} \quad (1)$$

$$R_{sp} = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (2)$$

Où  $\rho_w^*$  est la masse volumique intrinsèque de l'eau et vaut 1000 kg.m<sup>-3</sup>.

La teneur en eau de l'échantillon est déterminée en mesurant sa masse sèche  $m_s$  après étuvage à 70 °C pendant 48 heures par :

$$w = \frac{m_a - m_s}{m_s} \quad (3)$$



**Figure 2** : Principe de détermination du volume d'échantillon : (a) dessiccateur ; (b) échantillon de *Spiruline* ; (c) étuve Memmert ; (d) balance ; (e) table ; (f) panier et (g) récipient contenant d'eau.

### 2.4. Détermination du coefficient d'expansion hydrique

Mrani<sup>[14]</sup> a montré que la déformation d'un milieu est liée au gradient de teneur en eau des pores. Cette relation peut être matérialisée par un coefficient d'expansion qui n'est rien d'autre que le rapport de la variation volumique relative par celle de la teneur en eau à température constante. Le modèle simplifié de la trace de déformation  $\Delta tr \epsilon$  pour un matériau fortement poreux donné par l'équation 4.

$$\Delta tr \varepsilon = 3\beta(w)\Delta w \quad (4)$$

Lorsque les variations sont infinitésimales, la déformation volumique peut être liée à la variation relative du volume par l'équation suivante.

$$\Delta tr \varepsilon = \frac{dV}{V} \quad (5)$$

Des relations 4 et 5, le coefficient d'expansion hydrique peut être décrit par l'équation 6 :

$$\beta(w) = \frac{1}{3V} \frac{dV}{dw} \quad (6)$$

### 2.5. Modélisation théorique

Formulation des hypothèses simplificatrices des modèles théoriquement des paramètres de la *Spiruline platensis* : le matériau est supposé diphasique, la teneur en eau initiale est homogène, les phases sont considérées incompressibles. La densité réelle de l'eau et celle de la phase solide sont décrites par :

$$\rho_w^* = \frac{m_w}{V_w} \quad \rho_s^* = \frac{m_s}{V_s} \quad (7)$$

Tandis que les masses volumiques apparentes sont définies par rapport au volume de l'échantillon.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V} \quad \rho_s = \frac{m_s}{V} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

En utilisant les relations 7 et 8 et en posant  $m = (1 + w)m_s$ , le volume peut être exprimé par :

$$V = m_s \frac{(w + \alpha)}{\rho_w^*} \quad (9)$$

En remplaçant l'expression 9 dans l'équation 2, on obtient le coefficient du retrait avec

$$\alpha = \rho_w^* / \rho_s^* \cdot R_{sp} = \frac{w_0 - w}{\alpha + w_0} \quad (10)$$

En négligeant la variation volumique provenant de la compressibilité de l'eau [15] et du solide devant celle associée à un incrément de teneur en eau  $dw$ , la variation relative du volume est décrite par :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dw}{\alpha + w} \quad (11)$$

Des équations 6 et 11, le coefficient de dilatation hydrique  $\beta(w)$  dévient :

$$\beta(w) = \frac{1}{3} \frac{1}{\alpha + w} \quad (12)$$

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Cinétiques de séchage

Cette expérience nous a permis d'appréhender les cinétiques de séchage présentées dans la **figure 3** de la *Spiruline platensis* pour rendre compte la baisse du taux d'humidité. Un écart entre les deux cinétiques est observé dès les premiers instants de séchage. Cet écart qui traduit l'influence de la différence de teneur en eau initiale des échantillons étudiés devient moins important vers la fin du processus. Contrairement aux tendances (deux phases de séchage) observées par Desmorieux, Hernandez, Fabriola [16, 17, 18], les résultats auxquels nous sommes parvenus montrent une seule phase à vitesse décroissante. Cela pourrait être lié aux conditions de séchage qui diffèrent d'une étude à l'autre. Dans ce travail, les expériences ont été menées à 50 °C et sur une période de 12 heures. Au-delà de cet intervalle de temps, le matériau commence à se dénaturer et pour une température inférieure à 25 °C le séchage devient très lent et occasionne l'apparition de certains micro-organismes.

#### 3.2. Contraction volumique de l'échantillon

Les **figures 4** et **5** représentent respectivement la variation volumique et l'évolution du coefficient du retrait en fonction de la teneur en eau. Les données expérimentales sont représentées par des points. L'intérêt de ces courbes est d'établir une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux résultant de la théorie. On remarque que les valeurs théoriques suivent la même allure que celles fournies par l'expérience dès le début de la déshydratation : la contraction volumique est quasi-linéaire. En effet, le vide libéré par l'eau est occupé par le solide sous l'effet de la contraction. Contrairement au retrait de la mangue à 50 °C qui est quasiment linéaire [19], Cette allure est similaire à celle des matériaux diphasiques déformables comme le gel d'agar et le gel d'alumine [20, 21, 22]. On remarque que l'allure demeure la même jusqu'à un certain stade où la variation réelle des paramètres est moins importante que celle de la théorie.

Les différences sont plus nettes à partir d'une teneur en eau de l'ordre de  $w = 1,80 \text{ kg}_w / \text{kg}_{dm}$  où le produit n'est plus saturé. La variation du volume n'est plus représentative de celle du volume d'eau évacuée. Cela implique l'immixtion d'une nouvelle phase dans le processus de transfert qui n'est rien d'autre qu'une phase gazeuse. Ce qui montre qu'une transition de régime (diphasique et triphasique) a eu lieu au cours du séchage.

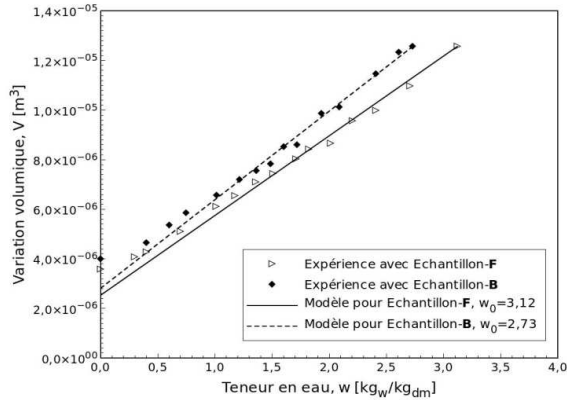


Figure 3 : Courbe de teneur en eau de la Spiruline platensis à 50 °C

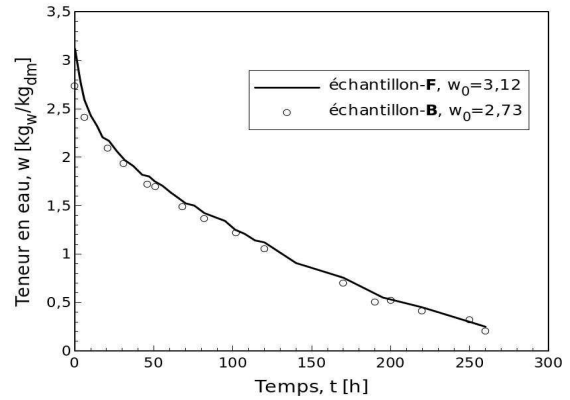


Figure 4 : Variation du volume d'un cylindre d'échantillon de Spiruline à 50°C

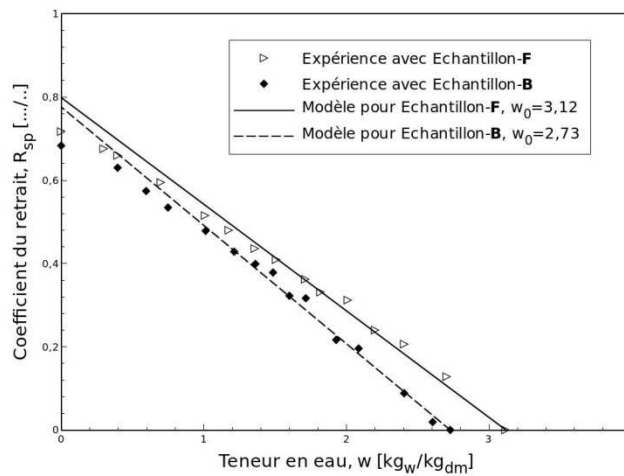


Figure 5 : Courbes du coefficient du retrait de la Spiruline à 50°C.

La teneur en eau de l'ordre de  $w = 1,8 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  étant la valeur à partir de laquelle la structure de la *Spiruline* s'éloigne de son état saturé, on en déduit quelle est la teneur en eau particulière de la *Spiruline* qui indique l'étape de la transition de régime au cours du séchage. Des cavités et des fissures se développent dans le produit (Figure 7) et entravent ou empêchent le mouvement du solide. La différence entre les deux courbes expérimentales constatée vers la fin du séchage montre la *Spiruline* d'origine Française renferme plus de pores que celle cultivée au Burkina Faso. Au-delà de cet intervalle, la structure solide se rigidifie. Cela engendre un ralentissement du retrait suivi d'un établissement de liaisons fortes des particules constitutives du solide. Quel que soit la souche et la teneur en eau initiale de la *Spiruline* étudiée  $w = 1,80 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  est une teneur en eau de référence qui nous renseigne sur l'état structural du produit et qui permet de prédire ou de définir une transition de régime. La variation du volume de chaque échantillon est approximée par une fonction exponentielle (équation 14) dont

les coefficients sont consignés dans le **tableau I**. L'hypothèse d'un milieu saturé donne un retrait idéal, mais pour des faibles teneurs en eau.

$$V = A + B \exp(C * w) \quad (14)$$

### 3.3. Coefficient d'expansion hydrique

Les courbes représentatives de l'évolution du coefficient de dilatation hydrique  $\beta(w)$  de la *Spiruline* sont dressées dans la **figure 7**. On constate que les courbes obtenues par le modèle diphasique sont concordantes. On en déduit que lorsque les échantillons sont saturés (phases solide et liquide), leur contraction ne souffre d'aucune influence autre que de la teneur en eau.

Dans la plage de teneur en eau supérieure à  $w = 1,80 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dm}$  où le matériau est saturé, les courbes expérimentales et celles simulées sont pratiquement confondues. Ce qui confirme que le retrait solide des échantillons est idéal et que le coefficient d'expansion ne dépend que de la

teneur en eau. Pour toute teneur en eau donnée appartenant à cet intervalle, les souches de *Spiruline* présentent un coefficient d'expansion hydrique identique. Dans ce cas, on admet que les deux souches ont les mêmes performances de mouvement structural, dont les mêmes propriétés hydrodynamiques. En deçà de la teneur en eau de l'ordre de  $w=1,80\text{kg}_w/\text{kg}_{dm}$  qui a été également observée dans les **figures 4 et 5**, un écart entre les courbes théoriques et expérimentales est observé. Cet écart est plus important sur la courbe expérimentale de l'échantillon-**B** que celle de l'échantillon-F. Le degré d'expansion diffère un produit à l'autre. Dans le domaine non saturé (milieu triphasique), les deux types de souches présentent une faible capacité d'expansion et acquièrent une tenue mécanique due à la présence de la phase gazeuse. Grâce à sa concentration massique considérable, la tenue mécanique de l'échantillon-**B** est plus importante que celle de la

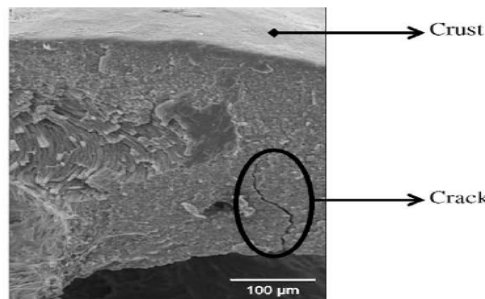
France. Le coefficient d'expansion est influencé non seulement par la teneur en eau et l'apparition de l'air dans la structure, mais aussi par la différence de concentration en masse des souches. La fin du séchage ne constitue pas un état limite d'expansion, la déformation peut se poursuivre sous l'effet de l'agitation thermique et n'atteindre un état stable qu'après un instant donné.

**4. Conclusion**

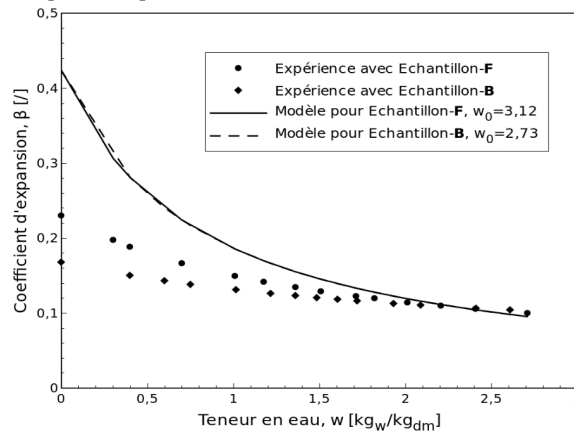
Dans cette étude, nous avons couplé les mécanismes de déshydratation et du retrait d'un cylindre de *Spiruline platensis* lors d'un séchage isotherme à 50°C à travers des expériences et théoriquement. Nous avons montré que le retrait du solide est idéal pour des fortes teneurs en eau (saturation). Quel que soit l'origine de la *Spiruline*  $w=1,8\text{kg}_w/\text{kg}_{dm}$  est une teneur en eau de référence à partir de laquelle le

**Tableau I** : Paramètres des échantillons et coefficients du modèle proposé.

Echantillons	Coefficients approximatifs				Paramètres		
	A	B	C	$R^2$	$m_s$	$V_0$	$\rho_s^*$
	---	---	---	%	kg	$\text{m}^3$	$\text{kg}/\text{m}^3$
échantillon-F	$-5,853.10^{-6}$	$9,722.10^{-6}$	0,200	0.989	3,485	$1,256.10^{-5}$	1270
échantillon-B	$-1,608.10^{-5}$	$1,953.10^{-5}$	0,122	0.949	3,155	$1,256.10^{-5}$	1270



**Figure 7** : Image microscopique de *Spiruline platensis* séchée : illustration de cavités, de fissuration<sup>[5]</sup>.



**Figure 7** : Evolution du coefficient d'expansion hydrique expérimental et théorique.



milieu passe d'un régime diphasique à un régime triphasique. L'immixtion de la phase gazeuse dans les phénomènes de transfert vers les dernières étapes de séchage provoque l'apparition des cavités et empêche la contraction du solide. Il ressort de cela que le coefficient d'expansion hydrique est sensible à la teneur en eau et à la phase gazeuse infiltrée dans le milieu. Cependant, la phase gazeuse qui s'y installe influencera le transport d'eau du produit ?

### Remerciements

Les auteurs remercient :2IE et PIMASO pour le financement qui a permis la réalisation de ce travail. FSF (France Fédération of Spiruliniers) pour la fourniture de la Spiruline platensis.

### Bibliographie

- [1] Harrigan G.G, Luesch H, Yoshida W.Y, Moore R.E, Nagle D.G, Paul V.J. A dolastatin 13 analogue from the marine cyanobacterium symplocanhydroides. *Journal of Natural Products* (1999) 62 (4), 655-658.
- [2] Olguín E.J., Galicia, S., Angulo-Guerrero, O., Hernández, E. The effect of low light flux and nitrogen deficiency on the chemical composition of *Spirulina* sp. (*Arthrospira*) grown on digested pigwaste. *Bioresource Technology* (2001) 77 (1), 19-24.
- [3] Bermejo, P., Piñero, E., Villar, Á.M. Iron-chelating ability and antioxidant properties of phycocyanin isolated from a protean extract of *Spirulina platensis*. *Food Chemistry* (2008) 110, 436-445.
- [4] Desmorieux, H., Madiouli, J., Herraud, C. et Mouaziz, H. Effects of size and form of *Arthrospira spirulina* biomass on the shrinkage and porosity during drying. *Journal of Food Engineering* (2010) 100, 585-595. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.021>
- [5] Dissa, A. O., Desmorieux, H., Savadogo, P. W., G. S. B. et Koulidiati, J. Shrinkage, porosity and density behavior during convective drying of *Spirulina*. *Journal of Food Engineering* (2010) 97, 410 - 418.
- [6] Lozano, J. E., Rotstein, E., Urbicain, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of food stuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science* (1983) 48, 1497-1502.
- [7] Ratti, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering* (1994) 23 (1), 91-105.
- [8] Krokida, M. K., Maroulis, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology* (1997) 15 (10), 2441-2458.
- [9] Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology* (1994) 12 (7), 1653-1666.
- [10] May, B. K., Perré, P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foods tuffs. *Journal of Food Engineering* (2002) 54, 271-282.
- [11] Guine, R. P. F., Ramos, M. A. and Figueiredo, M. Shrinkage Characteristics and Porosity of Pears During Drying. *Drying Technology* (2006) 24, 1525-1530.
- [12] Hussain, M.A., Shafiur Rahman, M., Ng, C.W. Prediction of pores formation (porosity) in foods during drying: generic models by the use of hybrid neural network. *Journal of Food Engineering* (2002) 51, 239-248.
- [13] Hui, Y., Noboru, S. and Manabu, W. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technology* (2001) 19(7), 1441-1460.
- [14] Jourdan, J.P., Ancel, P., Boileau, E. Small scale production of *Spirulina*. *International Journal of Small Scale Food Processing* (1999) 24, 3-7.
- [15] Mrani, I. Transport de matière en milieu biconstituant élastique : application au séchage du gel d'agar. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2 (1993) pp 139.
- [16] Desmorieux, H. et Decaen, N. Convective drying of spirulina in thinlayer. *Journal of good Engenering* (2005) 66, 497-503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.021>
- [17] Hernandez, F.S. Contribution à l'étude du séchage de la spiruline et de son impact sur la qualité. Biochimique du produit sec Thèse de l'Université Claude Bernard de Lyon 1, France (2006).
- [18] Fabriola, H. S. Contribution à l'étude du séchage de la Spiruline et de son impact sur la qualité biochimique du produit sec. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université Claude Bernard, Lyon 1 (2006).
- [19] Dissa A. O., Desmorieux A., Almeck A., Bathiebo J., Koulidiati J. Drying of "Amelie" mango (*Mangifera Indica* L.): Influence of temperature on drying rates and shrinkage curves from 50 to 90°C. *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.* (2010) 029, 55 -65.
- [20] Ochoa, M. R., Kesseler, A. G., Pirone, B. N., Marquez, C. A. and Michelis, A. D. Volume and area shrinkage of whole our cherry fruits (*prunuscerasus*) during dehydration. *Drying Technology* (2002) 20 (1), 147-156.
- [21] Pourcel, F. Séchage de gel d'alumine : mise en évidence et définition d'un critère de fissuration. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux (2003).
- [22] Madioudi, J., Lecomte, D., Nganya, T., Chavez, S., Sghaier, J. et Sammouda, H. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. *Drying Technology* (2007) 25 (4), 621-628.

### Nomenclature :

<i>HR</i>	humidité relative (%)	<i>Lettres grec</i>	
<i>W</i>	water content (kg/kg)	$\alpha$	rapport de densités réelles (/)
<i>m</i>	masse de l'échantillon	$\rho_s$	densité apparente du solide (kg/m <sup>3</sup> )
<i>m<sub>a</sub></i>	Masse de l'échantillon immergé (kg)	$\rho_w$	densité apparente de l'eau (kg/m <sup>3</sup> )
<i>m<sub>w</sub></i>	Masse de l'eau (kg)	$\rho_s^*$	densité réelle du solide (kg/m <sup>3</sup> )
<i>m<sub>s</sub></i>	masse sèche (kg)	$\rho_w^*$	densité réelle de l'eau (kg/m <sup>3</sup> )
<i>R<sup>2</sup></i>	coefficient de corrélation (%)	$\beta$	coefficient d'expansion
<i>V</i>	volume de l'échantillon (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Indices</i>	
<i>V<sub>s</sub></i>	volume de la phase solide (kg/m <sup>3</sup> )	<i>o</i>	initiale
<i>V<sub>w</sub></i>	volume de la phase liquide (kg/m <sup>3</sup> )	<i>W</i> , <i>dm</i>	eau, masse sèche
<i>t</i>	temps de séchage (h)	<i>S</i>	solide