

Modélisation et simulation du séchage solaire en couche mince de la Spiruline (Asthrospira platensis)

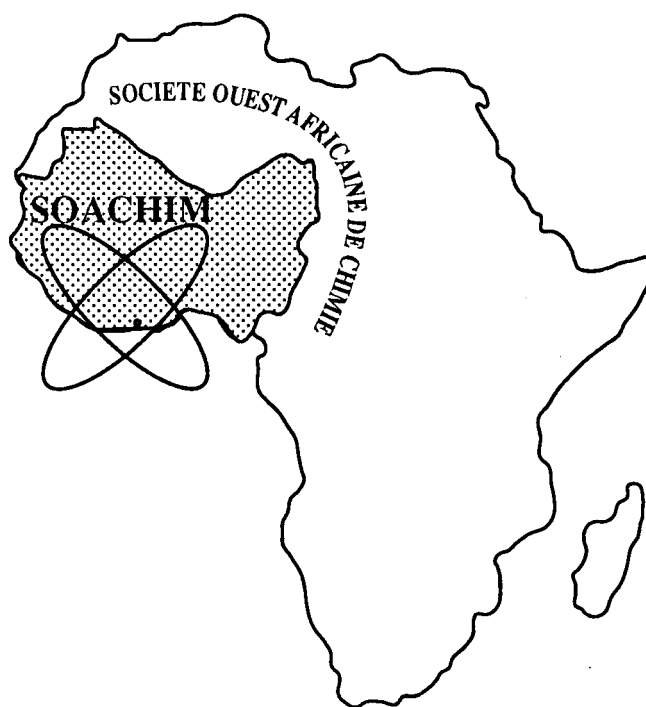
Alfa Oumar Dissa, Eloi Tiendrebeogo,

Salifou Garba, Jean Kouliati

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

J. Soc. Ouest-Afr. Chim.(2016), 042 : 1 - 7

21^{ème} Année, Décembre 2016



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

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

Modélisation et simulation du séchage solaire en couche mince de la *Spiruline* (*Astthrospira platensis*)

Alfa Oumar Dissa*, Eloi Tiendrebeogo, Salifou Garba, Jean Koulidiati

Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquée (UFR/SEA), Université Joseph Ky ZERBO de Ouaga I, BP7021, Burkina Faso

(Reçu le 12/06/2015 – Accepté après corrections le 25/11/ 2016)

Résumé : La méthode du séchage est l'un des procédés les plus appropriés pour conserver la *Spiruline*, une micro-algue très bénéfique à cause de ses qualités nutritionnelles exceptionnelles et de ses nombreuses vertus thérapeutiques. Ce travail est une étude de faisabilité du séchage solaire en couche mince de ce produit sous un climat tropical. Le séchage solaire de micro-cylindres de *Spiruline* de 2mm de diamètre est alors expérimenté puis modélisé. Les résultats obtenus montrent que la siccité de la spiruline est atteinte après environ 5 heures de séchage aux mois d'octobre, avril et mars. La teneur en eau finale après ce temps optimale de séchage est d'environ $0,156 \text{ kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (en base sèche). Aussi, le modèle de séchage en couches minces adopté permet de simuler convenablement la cinétique de séchage solaire de la Spiruline.

Mots clés : séchage, solaire, couche mince, modélisation, simulation, *Spiruline*

Modeling and simulation of thin layer solar drying of *Spirulina* (*Astthrospira* *Platensis*)

Abstract: Drying method is one of the most adapted processes to preserve Spirulina, a very beneficial microalga because of its exceptional nutritional qualities and its many therapeutic virtues. This work is a feasibility study of thin layer solar drying of this product under a tropical climate. The solar drying of micro-cylinders of Spirulina of 2 mms of diameter is then tested and modelled. The results show that the siccity of the spirulina is reached after about 5 hours of drying in April, October and March. The final water content after this optimal drying time is approximately $0.156 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{dm}}^{-1}$ (in dry basis). Also, the thin layer drying model adopted allows to simulate suitably the solar drying kinetics of Spirulina.

Key words: Drying, solar, thin layer, modelling, simulation, Spirulina

* **Auteur de correspondance:** Alfa Oumar DISSA; Tel.: (00226) 70 03 54 73; E-mail address: alfadissa@yahoo.fr; alfa_dissa@univ-ouaga.bf; Adresse postale BP7021 LPCE UFR/SEA Université Ouaga I Professeur Joseph Ky ZERBO Burkina Faso

1. Introduction

Dans de nombreuses zones tropicales, des sources potentielles d'aliments existent, mais sont mal exploitées faute de techniques de conservation. Les pertes après récolte sont considérables. Elles s'élèvent à plus de 25% pour certains produits et sont occasionnées par le mode de conservation ^[1]. Le séchage des produits agroalimentaires constitue un moyen approprié pour freiner ces pertes et étendre la consommation aux périodes de non-production. Il est une opération largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire, et de façon artisanale par les agriculteurs africains. Ce processus permet de stabiliser le produit par réduction de son activité de l'eau tout en respectant sa qualité ^[2].

La spiruline (*A. platensis*) est une espèce sauvage qui a été découverte en 1964 par les membres d'une expédition scientifique basée au Tchad ^[2]. De nos jours, cette algue est reconnue pour sa qualité nutritionnelle, sa haute résistance aux microbes et encore bien d'autres vertus thérapeutiques. Elle peut être séchée tout en conservant ces qualités nutritionnelles et thérapeutiques pourvue qu'une technique de séchage appropriée soit utilisée. C'est dans cette logique que s'inscrit ce travail dont l'objectif est d'établir expérimentalement les cinétiques de séchage solaire de la spiruline (*A. platensis*) sous des conditions climatiques de type tropical et d'esquisser un modèle de simulation permettant de prévoir la vitesse et la durée du séchage .

2. Matériels et méthodes

2.1. Equipements de séchage

Les principaux éléments composant le dispositif de séchage sont un capteur-plan qui assure le chauffage d'air, une unité de séchage en bois de forme parallélépipédique et un micro- ordinateur permettant l'acquisition de la température pendant toute l'opération de séchage. Les échantillons à sécher sont disposés sur quatre claies de forme rectangulaire (dimensions : $L_c=0,81m$, $l_c =0,44m$, soit une surface totale de $0,356 m^2$). Chacune de ces claies est formée d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage en nylon pour faciliter le passage de l'air.

2.2. Protocole expérimental

Les pâtes fraîches de la spiruline utilisées dans cette étude ont été achetées dans la ferme de spiruline de Loumbila, localité située à 30 kms de la ville de

Ouagadougou (Burkina Faso). Pour chaque expérience, la pâte provenant de la ferme est compressée dans un appareil à extruder pour obtenir des sortes de spaghettis de 2 mm de diamètre qui sont ensuite étalées sur chacune des quatre (4) claies grillagées. La masse fraîche sur chaque claie est de l'ordre de 0,26 kg pour une densité d'étalage de $0,729 kg.m^{-2}$. Pour la mesure des cinétiques de perte de masse au cours du séchage solaire, les claies chargées sont placées dans le séchoir solaire et régulièrement retirées pour être pesées à l'aide d'une balance électrique de marque OHAUS liée à un indicateur de modèle CD11. Cette balance a une capacité maximale fixée à 5 kg et une incertitude absolue de l'ordre 0,1g.

Les différentes prises de masse effectuées pour différents jours de séchage permettent à la fin du processus d'établir la cinétique de séchage solaire (teneur en eau en fonction du temps) une fois la masse de matière sèche connue. Pour déterminer la masse de matière sèche du produit à la fin du séchage, un échantillon est extrait sur chaque claie, pesé et placé dans une étuve de marque MEMMERT à $70^{\circ}C$ pendant 24h. La valeur de la masse sèche de cet échantillon est ensuite calculée et celle de la quantité de produit sec sur chacune des claies est déduite par extrapolation.

Par ailleurs, les températures de l'air, du produit et des claies ont été mesurées à l'aide d'un boîtier de thermocouples reliés à un micro-ordinateur piloté par le logiciel LabVIEW.

2.3. Estimation des paramètres caractéristiques

A partir des résultats de prise de masse, la teneur en eau du produit aux différentes étapes du séchage est alors exprimée pour chaque claie en base sèche (kg_{eau}/kg_{ms}) par :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (1)$$

Où $X(t)$ et $m(t)$ sont respectivement la teneur en eau en base sèche et la masse de l'échantillon à l'instant t du séchage et m_s sa masse sèche.

La vitesse de séchage en termes de densité de flux massique a été estimée à partir du taux de variation de la masse de l'échantillon en fonction du temps de séchage selon la relation:

$$\varphi_m = \frac{1}{S} \frac{\Delta m}{\Delta t} = - \frac{m_s}{S} \frac{\Delta X}{\Delta t} \approx - \frac{m_s}{S} \frac{X(t) - X(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{m_s}{S} \frac{X(n) - X(n+1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Où φ_m est le flux massique ($kg_{eau}/s.m^2$) par unité de surface d'échange du produit, t le temps de séchage, Δt le pas de temps entre deux mesures successives

ayant lieu aux instants n et $n+1$, $X(n)$ et $X(n+1)$ les teneurs en eau de l'échantillon estimées à ces instants et S la surface d'échange de l'échantillon.

Enfin, la teneur en eau à l'équilibre et l'activité de l'eau ont été estimées l'une à partir de l'autre en utilisant les expressions de l'isotherme de désorption données par [2]:

$$X_{eq} = \frac{1}{100} \left[\frac{-\ln(1-A_w)}{2,33 \times 10^{-4}(1,8T_1 + 492)} \right]^{10/7} \quad (3a)$$

$$A_w = 1 - \exp[-2,33 \times 10^{-2,6}(1,8T_1 + 492)X_{eq}^{0,7}] \quad (3b)$$

Où X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre, T_1 est la température de l'air en équilibre hygroscopique avec le produit et A_w l'activité de l'eau.

2.4. Méthode de modélisation du séchage en couche mince

2.4.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation du séchage en couche mince on peut considérer les hypothèses suivantes :

- la vitesse de l'air est constante dans l'enceinte de séchage ;
- les conditions initiales sont les mêmes sur toutes les claies ;
- les échanges radiatifs à l'intérieur de l'enceinte sont négligés ;
- les échanges convectifs entre l'air et les parois de l'enceinte climatique sont négligés ;
- la température et la teneur en eau du produit sont supposées uniformes ;
- les transferts sont unidimensionnels.

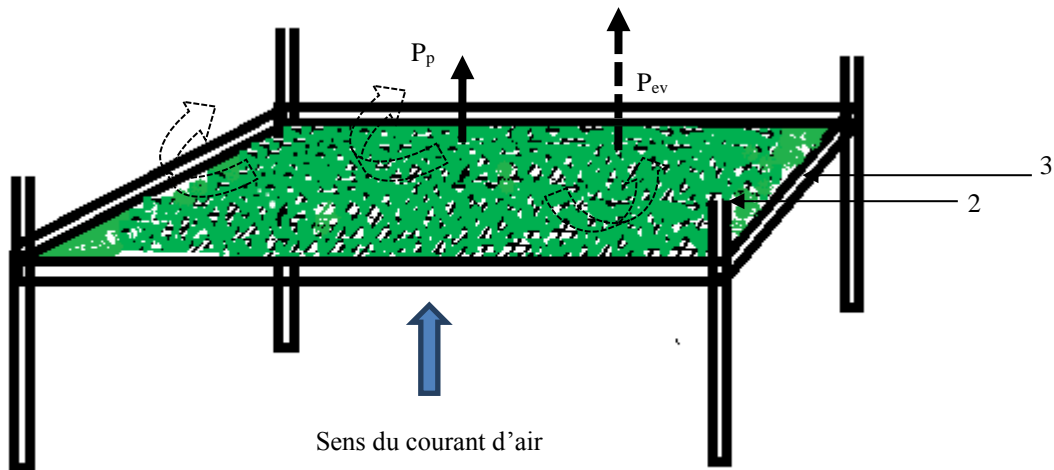


Figure 1: Echange thermique dans une tranche de séchoir

1: milieu asséchant, 2: produit, 3: claie, \dashrightarrow : puissance évaporatoire, \rightarrow : puissance cédée par l'air au produit
 \curvearrowright : échange par convection

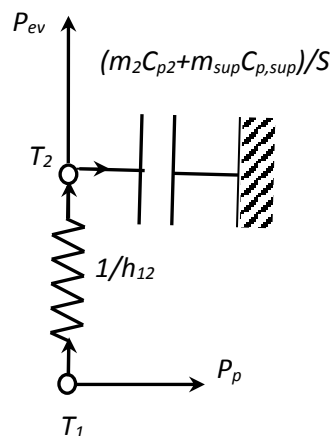


Figure 2 : Schéma électrique relatif à une tranche de séchoir

2.4.2 Modélisation du séchage solaire

Bilan d'énergie et de flux de matière

Les bilans couplés d'énergie et de matière sont établies à partir du schéma électrique simplifié du système. Ces bilans sont obtenus en écrivant l'équilibre des flux massiques et thermiques aux différents nœuds du système conformément à la figure 2. On peut alors discrétiser le temps de séchage en nombre de pas de temps n et la hauteur du séchoir en nombre de tranches j dans le sens de l'écoulement d'air [3, 4, 5]. Ainsi, entre les instants n et $n+1$, les bilans dans les différents milieux de la tranche j considérée s'obtiennent en écrivant la conservation du flux en chaque nœud du réseau de la figure 2.

Bilan sur le produit (nœud de température 2)

Flux de chaleur transféré de l'air chaud (provenant de la tranche $j-1$) vers le produit à la tranche j = flux de chaleur servant à évaporer l'eau du produit à la tranche j + flux de chaleur stocké par le produit et son support (la claie) à la tranche j

$$Sh_{12}[T_1(j-1, n+1) - T_2(j, n+1)] = P_{ev}(j, n+1) + \frac{m_2 C_{p2} + m_{sup} C_{p sup}}{\Delta t} [T_2(j, n+1) - T_2(j, n)] \quad (4)$$

Bilan sur l'air (nœud de température 1)

Flux échangé entre l'air sortant de la tranche $j-1$ et le produit à la tranche j = flux de chaleur perdu par l'air entre la tranche $j-1$ et j

$$Sh_{12}[T_1(j-1, n+1) - T_2(j, n+1)] = \dot{m}_1 C_{p1} [T_1(j-1, n+1) - T_1(j, n+1)] = P_p(j, n+1) \quad (5)$$

Bilan énergie - masse sur l'air et le produit (nœuds de température et matière 1 et 2)

Flux massique d'évaporation de l'eau du produit = flux massique transféré du produit à la tranche j vers l'air provenant de la tranche $j-1$

$$P_{ev}(j, n+1) = S \frac{h_e h_i}{h_e + h_i} [C_i(j, n+1) - C_v(j-1, n+1)] \times L_v \quad (6)$$

Avec : T_1 la température de l'air asséchant, T_2 la température du produit, h_{12} le coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et le produit, L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$), \dot{m}_1 le débit d'air ($kg.s^{-1}$), P_{ev} la puissance évaporatoire (W), P_p la puissance thermique perdue par l'air dans la tranche j (W), m_2 et m_{sup} respectivement les masses du produit et du support, C_{p2} et $C_{p sup}$ respectivement les capacités thermique du produit et du support, C_{p1} la capacité thermique de l'air

h_e et h_i respectivement les coefficients de transfert de masse à la surface et à l'intérieur du produit, C_v et C_i les fractions massique de la vapeur d'eau dans l'air et le produit.

$$\text{où: } C_i = \frac{X}{X+1}, \quad C_v = \frac{\omega}{\omega+1}, \quad h_e = \frac{Sh \times D_v}{d}, \quad h_i = \frac{2D}{d}$$

avec ω l'humidité absolue de l'air, Sh est le nombre de Sherwood, D_v et D respectivement les coefficients de diffusion d'eau dans l'air et dans le produit,

En outre, les différents paramètres physiques utilisés dans le modèle peuvent être calculés à partir des expressions ci-dessous :

La chaleur latente de vaporisation [6]:

$$L_v = R(6435,7 - 3,868T_2) \quad (7)$$

Le coefficient de diffusion d'eau dans le produit [7]:

$$D = 6,85 \times 10^{-4} \exp(0,63X) \times \exp\left(-\frac{40056}{RT}\right) \quad (8)$$

Le nombre de Sherwood [8] :

$$Sh = 0,692 Re^{0,514} Sc^{1/3}, \text{ pour } 500 < Re < 5000 \quad (9)$$

Où Re et Sc sont respectivement les nombres de Reynolds et de Schmid.

Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air D_v donné par la formule de Shirmer [6]:

$$D_v = 2,26 \times 10^{-5} \times \frac{1}{P} \left(\frac{T_1}{273}\right)^{1,81} \quad (10)$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre l'air chaud et le produit estimé à partir du nombre de Nusselt exprimé par [8]:

$$Nu = 0,692 Re^{0,514} Pr^{1/3}, \text{ pour } 500 < Re < 5000 \quad (11)$$

La résolution de ce système d'équations nécessite le développement d'un programme avec une méthodologie d'analyse rigoureuse capable de garantir la fiabilité du modèle et d'assurer sa souplesse.

En posant, $C_1 = \dot{m}_1 C_{p1}$; $C_2 = \frac{m_2 C_{p2} + m_{sup} C_{p sup}}{\Delta t}$;

$$H_1 = Sh h_{12} \text{ et } H_2 = SL_v \frac{h_e h_i}{h_e + h_i}$$

La résolution des équations présentées ci-dessus donne le système suivant :

$$T_2(j, n+1) = \frac{C_2}{H_1 + C_2} T_2(j, n) + \frac{H_1}{H_1 + C_2} T_1(j-1, n+1) - \frac{1}{H_1 + C_2} P_{ev}(j, n+1) \quad (12)$$

$$P_p(j, n+1) = C_1 [T_1(j-1, n+1) - T_1(j, n+1)] \quad (13)$$

$$T_1(j, n+1) = \left(1 - \frac{H_1}{C_1}\right) T_1(j-1, n+1) + \frac{H_1}{C_1} T_2(j, n+1) \quad (14)$$

$$P_v(j, n+1) = H_2 [C_i(j, n+1) - C_v(j-1, n+1)] \quad (15)$$

Ce système d'équations est résolu par itération à partir de la méthode explicite dans l'environnement MATLAB version 7.6.0. Le critère d'arrêt de la simulation est fixé en l'occurrence sur l'une des deux conditions suivantes : soit la teneur en eau d'équilibre est atteinte ou le temps de simulation est écoulé.

Les résultats de simulation obtenus seront comparés aux résultats expérimentaux

3. Résultats et discussions

3.1 Résultats expérimentaux

Les mesures ont été effectuées courant les mois d'octobre 2010 et de mars et avril 2011. Au total, 260g, 240g, 250g, 260g de spiruline fraîche ont été utilisées respectivement pour les essais du 22/10/2010, 25/10/2010, 28/03/2011, et 14/04/2011. Les influences de la position des claies et de la période de séchage ont été ensuite examinées.

L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage

Les figures 3 A, B, C et D représentent, pour différentes claies, l'évolution des teneurs en eau en fonction du temps. Au début du séchage du 22/10/2010, 25/10/2010, 28/03/2011, et 14/04/2011 chaque claie est chargée respectivement de 260g, 240g, 250g et 260g de spiruline fraîche. A chaque instant du séchage, on peut noter que la teneur en eau dépend de la position des claies. Elle varie avec la position des claies dans la direction de l'écoulement d'air. La claie 1 placée en bas de l'unité où l'air est plus chaud, montre les plus basses teneurs en eau, pendant que la claie 4 localisée au sommet présente celles les plus hautes. Cette tendance avait été observée par Dissa et al ^[9] pour le séchage solaire indirect de la mange.

De ces résultats de mesure de perte de masse, l'évolution du flux massique en fonction du temps de séchage peut être estimé à partir de l'équation (16) obtenue par ajustement des cinétiques selon le modèle empirique de Page $\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \exp(-a \times t^b)$, où a et b sont les constantes de Page^[4].

$$\varphi_m(g/kg.s) = \frac{m_s}{S} \frac{dX}{dt} = -0,1198 \frac{m_s}{S} \times (X_o - X_{eq}) \times t^{-0,64} \exp(-0,0001126 \times t^{1,064}) \quad (16)$$

L'évolution de la teneur en eau moyenne en fonction du temps de séchage

Les figures 4 A, B, C et D représentent l'évolution de la teneur en eau moyenne des quatre claies en fonction du temps. Au début du séchage du 22/10/2010, 25/10/2010, 28/03/2011, et 14/04/2011 la teneur eau initiale ($kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$) était respectivement de 5,905, 4,371, 4,528, et 5,125. Et à la fin de ces séchages la teneur en eau de la spiruline est abaissée respectivement à 16,65%, 9,24%, 15%, et 15%, soit une teneur en eau finale moyenne de 13,97%. Par ailleurs, on constate que toutes les courbes se stabilisent après environ 5 heures de séchage. On en déduit que pour 1kg de spiruline fraîche, le séchage solaire indirect demande un séchage continu pendant 5 heures pour atteindre la teneur en eau d'équilibre.

3.2. Validation du modèle de séchage solaire

Courbes simulées et confrontation des résultats expérimentaux et simulés

Les figures 5A, B, C, et A représentent à la fois les courbes expérimentales et les courbes simulées (en trait plein) utilisant 1,040 kg de spiruline (c'est-à-dire 0,26 kg de masse fraîche par claie) et de teneur en eau base sèche déterminée expérimentalement 5,125 $kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$, 4,528 $kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$, 4,905 $kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$ et 4,371 $kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$ respectivement le 14/04/11, 28/03/11, 22/10/10, et le 25/10/10. Pour chacune des courbes de teneur en eau simulée, on constate que la teneur en eau n'évolue quasiment pas au-delà de 5 heures de séchage. L'équilibre hygroscopique est donc atteint au bout de ce temps de séchage. Après ces 5 heures de séchage, la teneur en eau simulée obtenue à partir des courbes théoriques est de l'ordre de 0,156 $kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$ (15,6% bs). D'après les travaux de Van den Berg & Bruin ^[10], pour les activités de l'eau $A_w < 0,6$, les microorganismes n'arrivent plus à prélever l'eau nécessaire à leur développement et les enzymes deviennent inactifs. D'après les équations 3, la teneur en eau d'équilibre correspondant à la limite du développement des microorganismes serait alors de 16,02% (b.s) à la température maximale moyenne de conservation 40° C. A l'équilibre après 5 heures de séchage, les teneurs en eau expérimentales (13,97%) et simulée (15,6%) obtenues sont plus faibles que la valeur de référence de 16,02%. Ces résultats traduisent que le séchage solaire permet de réduire la teneur en eau de la spiruline à des valeurs pouvant assurer sa stabilité microbiologique.

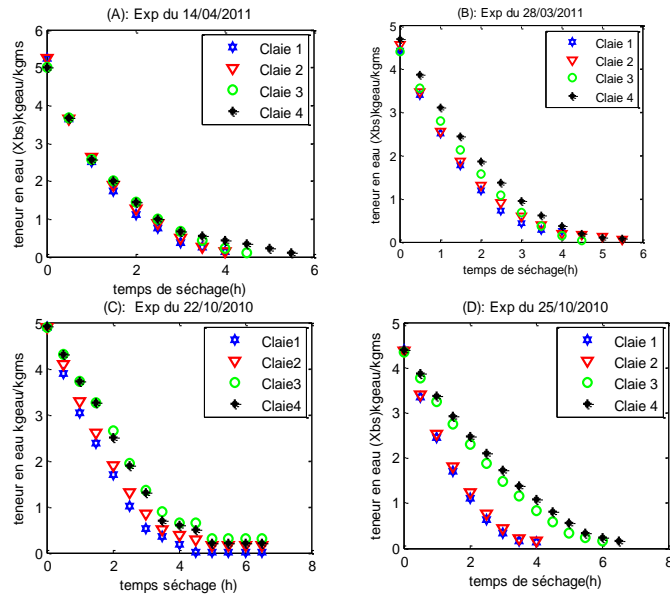


Fig.3A, B, C et D : Courbes expérimentales de l'évolution de la teneur en eau de la spiruline en fonction du temps

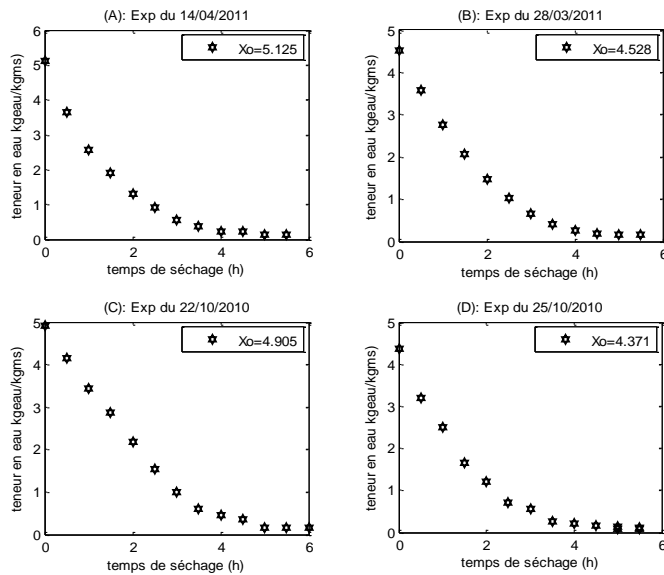


Fig.4A, B, C et D: Courbes expérimentales de l'évolution de la teneur en eau moyenne de la spiruline en fonction du temps de séchage.

La comparaison des résultats expérimentaux et simulés est effectuée sur la base de l'évolution de la teneur en eau moyenne de la spiruline. On constate dans toutes les quatre (4) périodes que, l'évolution des teneurs en eau simulée et expérimentale du produit présente une bonne concordance d'une part et un petit écart d'autre part comme le montre les **figures 5 A, B, C et D**. Cet écart étant plus important sur la figure 5C. Les différences qui subsistent peuvent provenir de l'hypothèse de l'homogénéité de

la teneur en eau dans la spiruline alors qu'un gradient d'humidité existerait sur les échantillons mesurés, ce qui nous éloigne de l'hypothèse des transferts unidimensionnels. Avec des valeurs du coefficient de corrélation R^2 de 0,9969; 0,9932; 0,9900 et 0,9954 très élevées et de l'erreur standard SE de 0,003155; 0,003092; 0,003124 et 0,003137 faibles, nous pouvons conclure que le modèle proposé décrit de manière satisfaisante la cinétique de séchage de la spiruline (*A. Platensis*).

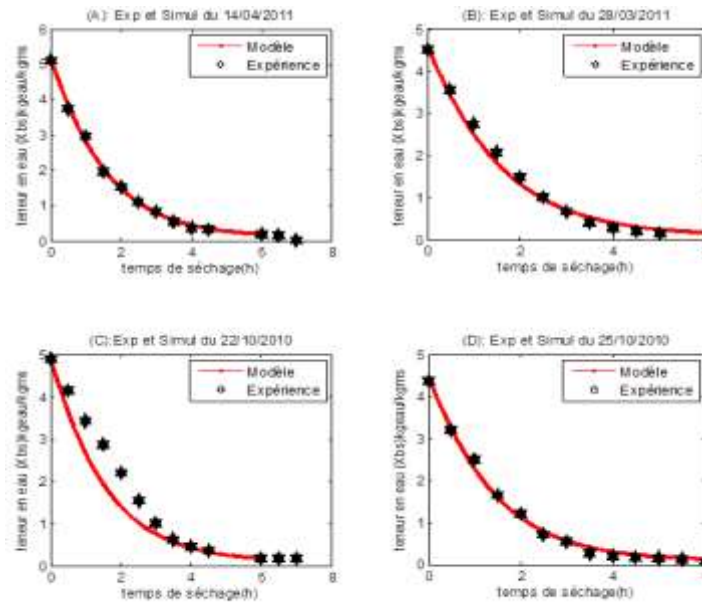


Fig.5A, B, C, et D : Séchage solaire indirect de la spiruline : Comparaison des valeurs simulées et expérimentales pour le 14/04/11, 28/03/11, 22/10/10 et le 25/10/10

4. Conclusion

Dans ce travail, le séchage solaire de micro-cylindre de spiruline de 2 mm de diamètre de spiruline disposées en couche mince a été caractérisé. Le séchage a ensuite été modélisé à l'aide d'un modèle simple de séchage en couche mince. Les données simulées ont été confrontées aux mesures obtenues et sont en accord avec celles-ci. La teneur en eau finale optimale de la spiruline en base sèche obtenue dans tous les cas est d'environ $0,156 \text{ kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$. De même, les résultats montrent qu'il faut 5 heures de séchage continu pour atteindre cette teneur en eau optimale et que les mois d'octobre, avril et mars sont des périodes propices pour sécher cette micro-algue.

Bibliographie

[1] Dieudonné J. BATHIEBO, Étude des Transferts de Masse et de Chaleur en Convection Naturelle dans un Milieu Poreux Humide de Type Granulaire Inséré entre deux Plaques Planes Verticales Recevant un Flux de Chaleur de Densité Constante : Application au Séchage, Thèse de Doctorat d'état ès Sciences Physiques. Université de Ouagadougou, 2004, Ouagadougou, Burkina Faso.
 [2] Desmorieux H, Decaen N. Convection drying of spirulina in layer. *Journal of Food Engineering*(2005), 66, 497-503.

[3] Andriazafimahazo LF, Bakotomahevitra A, Ramamonjisoa B, Zeghamti B. Modélisation de la vitesse de séchage du maïs. *Afrique SCIENCE*(2009), 05(2),173-183.
 [4] Dissa AO, Bathiebo DJ, Desmorieux H, Coulibaly O, Kouliadiati J. Experimental characterization and modeling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. *Energy* (2011), 36, 2517-2527.
 [5] Karathanos VT, Villalabos G, Saravacos, GD. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Engineering* (1990), 55(1), 218-223.
 [6] Michel DAGUENET, Séchoirs Solaires: Théorie et Pratique. UNESCO, 1985, France.
 [7] Dissa AO, Compaore A, Tiendrebeogo E, Kouliadiati J. An effective moisture diffusivity model deduced from experiment and numerical solution of mass transfer equations for a shrinkable drying slab of microalgae spirulina. *Drying Technology* (2014), 32, 1231–1244.
 [8] Hélène DESMORIEUX, Le Séchage en Zone Subsaharienne: Une analyse Technique à Partir des Réalités Géographiques et Humaines. Thèse présentée à l'INPL1992, Lorraine, France.
 [9] Dissa AO, Bathiebo J, Kam S, Savadogo PW, Desmorieux H, Kouliadiati J. Modelling and experimental validation of thin layer solar drying of mango slices. *Renewable Energy* (2009), 34, 100-1008.
 [10] C. VAN DERBERG, S. BRUIN, Water activity and its estimation in food systems: Theoretical aspects. In L. B. Rockland & G.F. Stewart, *Water activity: Influences on food quality* (pp.1-43) 1981, New York: Academic Press.