

Etude de l'impact du séchage par micro-ondes sur certaines caractéristiques des algues vertes « *Ulva sp.* » (*Chlorophyta, ulvales*) et étude mathématique de la cinétique de séchage

Salma TRABELSI REKIK^{a,b}, Bilel HADRICH^a, Karim KRIAA^a, Nathalie BOURGOUGNON^b, Nabil KECHAOU^a

^a Groupe de Recherche en Génie des Procédés Agroalimentaires, Laboratoire de Recherche en Mécanique des Fluides Appliquée - Génie des Procédés - Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université de Sfax. BP 1173 3038, Sfax, Tunisie

^b Université européenne de Bretagne, Laboratoire de Biotechnologie et Chimie Marines (LBCM), Université de Bretagne-Sud, Centre de Recherche Yves Coppens. Campus de Tohannic, 56017 Lorient Cedex, France

salmatrabelsirekik@gmail.com; bilelhadrich@yahoo.fr; kriaa_karim@yahoo.fr; nabil.kechaou@enis.rnu.tn;

Résumé : Les cinétiques de séchage par micro-ondes des algues vertes du genre « *Ulva sp.* » d'origine tunisienne ont été déterminées à sept puissances (100 - 850 W). L'étude des cinétiques de séchage des algues a révélé que la vitesse de déshydratation est liée à la puissance des micro-ondes appliquées. L'augmentation de la puissance réduit énormément le temps de séchage et augmente la vitesse de déshydratation. L'activité de l'eau et les paramètres structuraux des algues (dureté, élasticité, rigidité, cohésion...) varient avec la variation des puissances de séchage. Par contre, la couleur des algues séchées n'a pas été trop influencée par la variation de puissance. Six modèles mathématiques ont été testés pour lisser les courbes expérimentales obtenues à différentes puissances. Le modèle de PAGE a montré la meilleure qualité de lissage de toutes les cinétiques effectuée à des puissances entre 100 et 850 W.

Mots clés : Séchage radiatif, micro-onde, lissage, cinétique de séchage, algues vertes « *Ulva sp.* ».

1. Introduction

Les algues constituent une part non négligeable des ressources marines exploitées dans le monde. Ainsi, 11,3 million de tonnes pour une valeur d'US \$5,7 billion d'algues fraîches sont récoltées chaque année dans le monde [1, 2]. La prolifération d'algues vertes appelées « laitues de mer » est un phénomène invasif décrit dans de nombreuses régions du monde : Chine, Cuba, Espagne, France, la Tunisie, etc... [3]. En Tunisie, l'algue verte « *Ulva sp.* » est présente abondamment surtout sur le littoral du gouvernorat de Sfax. Cette région a été caractérisée par un ensoleillement suffisant, une faible profondeur (50 cm) et une courantologie riche en éléments nutritifs qui favorisent la prolifération de cette algue.

Ce travail entre dans le cadre des essais de valorisation des bio-ressources naturelles. Il s'intéresse à l'étude de la déshydratation par micro-ondes des algues vertes du genre « *Ulva sp.* » d'origine tunisienne. On vise à apporter une solution à la problématique écologique de ces algues, en les collectant avant de les transformer en produits naturels destinés à plusieurs domaines de valorisation. Pour exploiter les molécules d'intérêt au sein des cellules algales, une étape d'extraction est nécessaire. La particularité de la biomasse micro-algale est d'avoir un taux d'humidité très élevée qui rend difficile la conservation, stockage et valorisation des produits à traiter.

L'objectif se résume à l'étude de l'impact de séchage par micro-ondes sur un certain nombre de caractéristiques du produit. Toute l'étude qui va suivre sera présentée et comparée aux résultats obtenus relatif au séchage convectif naturel.

2. Matériel et méthodes

2.1 Séchage radiatif des thalles d'algues vertes « *Ulva sp.* »

Les cinétiques de séchage « d' *Ulva sp.* » ont été déterminées par des rayonnements micro-ondes (MO) à différentes puissances croissantes (100, 200, 300, 450, 600, 700 et 850 W). Le dispositif expérimental permettant

l'étude de la cinétique de séchage est un four à micro-ondes, ayant une fréquence de 50 Hz et un rayonnement électromagnétique de 2450 MHz.

Les Thalles d'algues ont été découpés sous forme de cercles de surfaces égales et uniformes (37,4 cm²). Puis, le suivi de la variation de la masse du produit au cours du temps a été effectué toutes les 30 secondes jusqu'à l'obtention d'une matière sèche ayant une teneur en eau finale (X_f) d'environ 0,1 kg/kg de Matière Sèche (MS). Les pesées ont été effectuées par une balance de résolution 10⁻³ g.

2.1.1 Présentation des courbes de séchage radiatif

La teneur en eau du produit au cours de séchage a été déterminée moyennant la relation (1) :

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

avec m : masse du produit à un instant donné (en g) et m_s : masse sèche du produit (en g).

Vue l'instabilité des valeurs des teneurs en eau initiales, les cinétiques de séchage des thalles d'algues vertes seront présentées par l'évolution de la teneur en eau réduite (X_r) en fonction du temps. Elle est donnée par la relation (2) :

$$X_r = \frac{X - X_f}{X_0 - X_f} \quad (2)$$

avec X : la teneur en eau du produit à chaque instant du séchage (en kg/kg MS), X₀ : la teneur en eau initiale du produit (en kg/kg MS) et X_f : la teneur en eau finale (en kg/kg MS).

2.1.2 Lissage des cinétiques de séchage des algues vertes

Six modèles mathématiques, choisis parmi les plus utilisés dans la littérature, ont été testés pour décrire les cinétiques de séchage des thalles d'*Ulva sp.* (tableau 1).

Tableau 1. Modèles mathématiques utilisés pour décrire les cinétiques de séchage par rayonnements micro-ondes des algues vertes

Modèle	Equation du modèle	Référence	
NEWTON	$X_r = \exp(-k \cdot t)$	[4]	(3)
HENDERSON et PABIS	$X_r = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	[5]	(4)
PAGE	$X_r = \exp(-k \cdot t^n)$	[6]	(5)
WANG et SINGH	$X_r = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	[7]	(6)
PARABOLIQUE	$X_r = a + b \cdot t + c \cdot t^2$	[8]	(7)
THOMSON	$t = a \cdot \ln(X_r) + b \cdot (\ln(X_r))^2$	[9]	(8)

Une analyse à régression non linéaire a été effectuée à l'aide du logiciel « CurveExpert (Version 1.4) » afin d'identifier les paramètres du modèle donnant le meilleur lissage des points expérimentaux. L'erreur standard (ES) et le coefficient de corrélation (r) sont les paramètres statistiques choisis pour tester la qualité du lissage de chaque modèle. Les modèles sont comparés selon les valeurs de leurs paramètres statistiques r et ES aux différentes conditions opératoires, ainsi que les allures des graphiques. En effet, un meilleur lissage, correspond à une erreur standard minimale (qui tend vers 0), et un coefficient de corrélation qui doit tendre vers 1 et la représentation graphique soit d'une allure la plus proche possible des points expérimentaux.

2.2 Paramètres structuraux des algues

La texture est un des critères principaux qui permet de juger la qualité et la fraîcheur des produits traités. Le texturomètre (texture Technologie Corp, TA, XT2, NY, USA) est muni d'une sonde cylindrique de diamètre de perforation de 10 mm et avec une vitesse de 1 mm/s. La perforation a été faite sur 3 plaques d'algues par traitement. Le texturomètre mesure la dureté, l'élasticité, la masticabilité, l'adhésion et la cohésion d'un produit.

2.3 Paramètres colorimétriques des algues

Les paramètres de couleur des algues fraîches et des algues séchées ont été obtenus à l'aide d'un colorimètre (Minolta Chromamètre CR-300, CIE, 1976). L'étalonnage de l'appareil a été effectué à l'aide d'une

plaque blanche, avant toute analyse. Les valeurs de couleur ont été exprimées à l'aide des coordonnées CIE Lab, où : Valeur de L* est une mesure de la légèreté, allant de 0 (noir) à 100 (blanc) ; les plages de valeur a* de -100 (vert) à +100 (rouge) et la b* valeur est comprise entre -100 (bleu) à +100 (jaune).

2.4 Activité d'eau

L'activité de l'eau (a_w) est un facteur critique qui détermine directement la conservation des produits étudiés. Elle est mesurée sur de petits échantillons enfermés hermétiquement dans un compartiment de mesure muni d'un élément sensible à l'humidité. La mesure de la valeur a_w permet d'optimiser un processus de séchage ou d'ajuster les conditions climatiques d'un entrepôt. La mesure de l' a_w garantit ainsi une haute qualité constante des produits. Elle permet de prévoir les échanges d'eau entre un produit et son environnement. Elle influe sur le développement microbien, les réactions enzymatiques, le brunissement non-enzymatique, l'oxydation des lipides...

3. Résultats et discussion

3.1 Etude et lissage des courbes de séchage par rayonnement micro-ondes des algues vertes

La figure 1 montre les courbes de séchage expérimentales effectuées à différentes puissances. La variation de la teneur en eau réduite a une allure décroissante au cours du temps de séchage. La teneur en eau réduite de l'échantillon algale se réduit au fur et à mesure que le temps de séchage augmente. On note une grande différence de durée de séchage entre les différentes puissances ($t = 1140s$ pour une puissance de 100W et $t = 360s$ pour une puissance de 850W). On constate alors que le séchage est plus rapide lorsque la puissance de séchage augmente. Plus la puissance augmente plus le produit arrive à une stabilité massique rapidement et les masses demeurent constantes. Les courbes obtenues sont identiques ayant une allure hyperbolique, elles sont constituées de deux phases :

- Phase 1 : Une régression rapide de l'humidité de la matière végétale correspondant à l'évaporation de l'eau superficielle.
- Phase 2 : La teneur en eau diminue lentement jusqu'à atteindre l'humidité d'équilibre qui s'approche vers une valeur nulle, alors on déduit que le séchage est achevé.

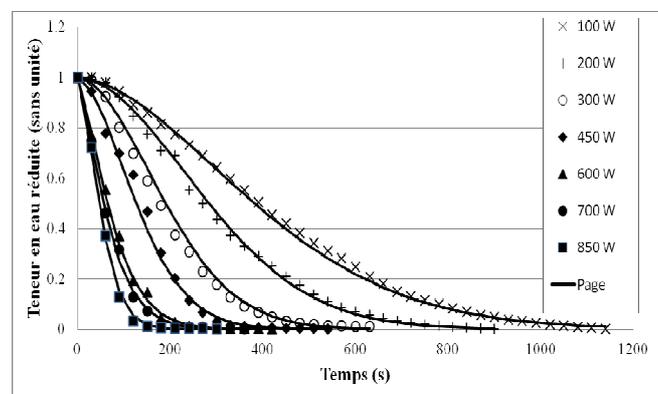


Figure 1. Evolution de la teneur en eau réduite (X_r) des thalles d'algues vertes « *Ulva sp.* » au cours du temps séchage par micro-ondes à différentes puissances (points : données expérimentales ; ligne : données calculées).

L'étude mathématique des cinétiques de séchage a révélé que le modèle de PAGE est le plus approprié à décrire et lisser les courbes expérimentales de séchage par MO des thalles d'algues vertes « *Ulva sp.* » ; ($0,992 \leq r \leq 0,998$; $0,081 \leq ES \leq 0,193$). La figure 1 illustre le choix adéquat du modèle de Page, qui montre la meilleure coïncidence des courbes lissées avec la totalité des points expérimentaux. Les paramètres du modèle de PAGE ont été aussi identifiés pour chaque expérience de séchage (Tableau 2).

Tableau 2. Paramètres a et b du modèle de PAGE (Eq. 5)

Puissance (W)	100	200	300	450	600	700	850
k	$2,234 \cdot 10^{-5}$	$1,769 \cdot 10^{-5}$	$4,331 \cdot 10^{-5}$	$1,711 \cdot 10^{-4}$	$2,584 \cdot 10^{-3}$	$3,473 \cdot 10^{-3}$	$2,089 \cdot 10^{-3}$
n	1,740	1,873	1,845	1,717	1,344	1,317	1,515

3.2 Impact du séchage radiatif sur les algues vertes

3.2.1 Impact de la puissance de séchage sur l'activité d'eau des algues

L'activité de l'eau du produit séché à différente puissance varie de même avec la puissance de séchage radiatif, elle atteint une valeur maximale de 0,484 à une puissance de 100 W et une valeur minimale de 0,224 à 850 W (figure 2). On remarque un effet décroissant de l' a_w en fonction de la puissance de séchage. Plus la puissance augmente, plus la quantité d'eau extraite augmente et plus l' a_w diminue. La figure 2 montre aussi que la courbe de durée de séchage varie pareil avec les activités d'eau. On conclut alors que l' a_w dépend du couple puissance et durée de séchage.

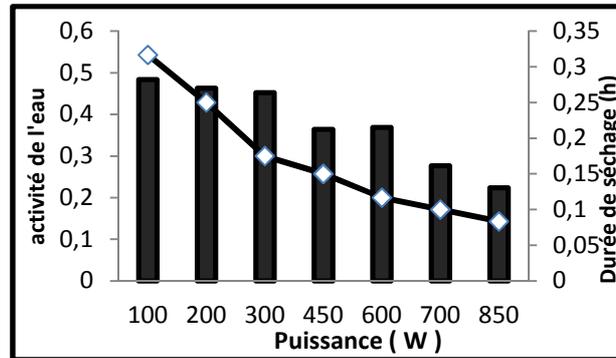


Figure 2. Activités d'eau des échantillons d'algues vertes (histogramme) et durée de séchage (\diamond) lors de séchage à différentes puissances.

3.2.2 Impact de la puissance de séchage sur les paramètres structuraux des algues vertes

La figure 3 illustre les variations des paramètres structuraux obtenus pour l'algue séchée par MO (450 W) et celle séchée à l'ombre (séchage convectif naturel). Ces variations sont présentées par rapport aux paramètres structuraux relatifs aux algues fraîches. La dureté de l'ulve séchée par MO est largement plus élevée par rapport à celle obtenue par séchage convectif ; de même pour l'adhésion et la rigidité. Tandis que l'élasticité est réduite de moitié. Ceci peut être expliqué par la forte diminution de la teneur en eau au cours du séchage de cette algue très riches en eau initialement ($X_0 = 4.829$ kg/kg MS). Ceci est prouvé aussi par la régression de la hauteur de l'algue au tiers au cours du séchage radiatif.

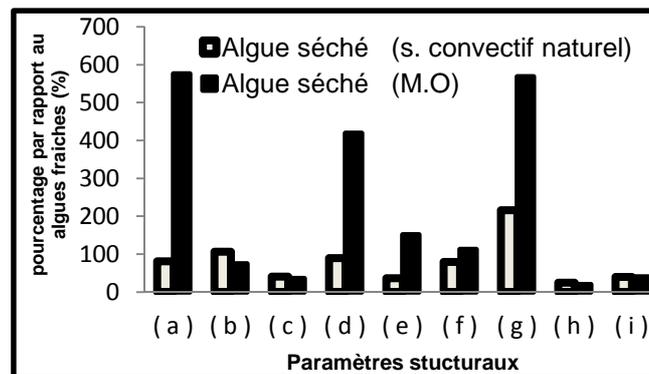


Figure 3. Variation des paramètres structuraux des algues vertes (Ulvaes) : (a) : dureté ; b : cohésion ; c : élasticité ; d : adhésion ; e : masticabilité ; f : force de rupture ; g : rigidité ; h : force d'adhésion ; i : hauteur)

Le séchage radiatif et surtout à forte puissance entraîne l'éclatement des cellules végétales et on a libération des molécules d'eau, sucres et protéine ; ce phénomène est responsable de la réduction de l'élasticité du thalle séché ainsi que l'augmentation de la masticabilité des algues. La grande diminution de la teneur en eau provoque l'augmentation de la rigidité et de la dureté. Le changement de texture des algues est relié à la dénaturation des composés hydrophobes tels que les protéines durant les procédés thermiques de séchage, surtout à grande puissance.

3.2.3 Impact de la puissance de séchage sur les paramètres de couleur des algues vertes

L'effet de la puissance de séchage radiatif sur les paramètres de couleur des algues vertes (L^* , a^* , b^* , C) a été étudié (figure 4). Les échantillons ont révélé une évolution des paramètres de couleur par rapport à

l'échantillon séchés par convection naturel (SCN). Pour le séchage radiatif, aucune variation significative pour toute les paramètres de couleur, ce qui permet de dire que ce type traitement n'altère pas les algues, ni leurs propriétés physiques (éclat, coloration...). Ce traitement thermique n'entraîne pas aussi une altération des pigments présents : chlorophylle a, chlorophylles b, caroténoïdes...

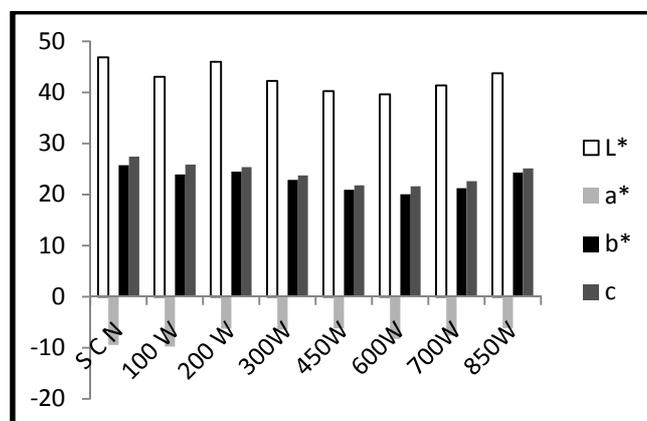


Figure 4. Effet du traitement Micro-ondes à différents puissances sur les paramètres de couleur des thalles d'ulves vertes (L*, a*, b*, C)

4. Conclusion

L'objectif de notre étude était d'étudier la déshydratation par micro-ondes des algues vertes « *Ulva sp.* ». Ce travail détermine les cinétiques de séchage radiatif de cette biomasse algale.

L'investigation mathématique des données expérimentales du séchage par rayonnements micro-ondes des thalles d'algues vertes « *Ulva sp.* » a été réalisée dans des intervalles de puissances (100 – 850 W). Six modèles mathématiques ont été testés. Le modèle de PAGE a été révélé le plus approprié à décrire les cinétiques de séchage par MO de ces algues à 100 – 850 W. L'étude a révélé que la vitesse de déshydratation est étroitement liée à la puissance des micro-ondes appliquées. En plus, plus la puissance est élevée plus le temps de séchage est plus court et la vitesse de déshydratation est rapide. L'activité de l'eau varie de même avec la puissance de séchage radiatif, elle atteint une valeur maximale de 0,484 à une puissance de 100 W et une valeur minimale de 0,224 à 850 W. Les paramètres structuraux des algues (dureté, élasticité, rigidité, cohésion...) varient de même avec la variation des puissances de séchage. L'optimisation de procédés de séchage radiatif et la nécessité de développement de méthodes analytiques rapides et non destructives pour la quantification des composants bioactifs dans les algues au cours de leurs transformations seront envisagées en perspectives. Ainsi que la comparaison du séchage radiatif par microonde des thalles d'algues vertes « *Ulva sp.* », avec d'autre moyens de séchage : convectif, combiné.

Références

- [1] FAO, 2004, The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004 (SOFIA), FAO, Rome, http://www.fao.org/sof/sofia/index_en.htm.
- [2] T. Chopin et M. Sawhney, Seaweeds and their Mariculture, Encyclopedia of Ocean Sciences, Pages 317-326, 2009.
- [3] A. H. Dizerbo et E. Herpe, Liste et répartition des algues marines des cotes françaises de la Manche et de l'Atlantique, Iles Normandes incluses. pp. [1]-315, 92 pls, Landernau: Editions Anaximandre, 2007.
- [4] W. K. Lewis, The rate of drying of solid materials, J of Ind and Eng Chem, 13(5), 427-432, 1921.
- [5] Q. Zhang et J.B. Litchfield, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, Drying Tech, 9, 383-395, 1991.
- [6] G. E. Page, Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer, Unpublished Masters Thesis, Prude University, Lafayette, Indiana, USA, 1949.
- [7] C. Y. Wang et R.P. Singh, A single layer drying equation for rough rice, ASAE, Paper n° 3001, 1978.
- [8] G. P. Sharma, et S. Prasad, Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave convective drying, Journal of Food Eng, 65(4), 609-617, 2004.
- [9] M. R. Paulsen et T.L. Thomson, Drying endysus of grain sorghum, Transactions of the ASAE, 16, 537-540, 1973.