

CARACTÉRISATION THERMOPHYSIQUE DE DEUX PLANTES MÉDICINALES PAR SÉCHAGE SOLAIRE CONVECTIF EN VUE D'UNE MEILLEURE VALORISATION

A. IDLIMAM*, A. LAMHARRAR, M. AGHFIR, M. KOUHILA

Laboratoire d'Énergie Solaire et Plantes Médicinales, École Normale Supérieure, BP 2400,
Marrakech, Maroc

*aidlimam@gmail.com, alamharrar@yahoo.fr, kouhila@gmail.com

RÉSUMÉ

Un produit de qualité mérite un traitement de qualité. Les thermiciens et les spécialistes en génie des procédés doivent fournir aux utilisateurs de l'information précise sur la façon de manipuler un produit pendant la manutention, l'entreposage et la conservation. C'est dans cette perspective que nous avons déterminé expérimentalement les caractéristiques thermophysiques de deux plantes d'intérêt pharmaceutique et médical : L'armoise (*Artemisia herba-alba*) et la plante guérisseuse (*Zygophyllum gaetulum*).

Ce travail se propose de comprendre le comportement hygroscopique et établir les courbes de sorption et les cinétiques de séchage solaire convectif des deux plantes aux vertus thérapeutiques bien connues. Les isothermes de désorption/adsorption et les cinétiques de séchage convectif en couches minces ont été déterminées expérimentalement pour trois températures (30, 40 et 50°C) en vue de définir les conditions optimales de conservation et de transformation post-récolte de ces deux produits.

1. INTRODUCTION

Utilisées par la majorité de la population marocaine pour se soigner, cuisiner et s'embellir, les plantes aromatiques et médicinales sont encore exploitées de façon quasi artisanale au Maroc. Le *zygophyllum gaetulum* pousse dans les ergs et les gens en connaissent de façon empirique le pouvoir anti-diabétique. Une étude récente a mis en évidence son activité hypoglycémiant. Sa capacité d'abaisser le glucose de sang a été étudiée sur treize patients avec diabète non insulino dépendants [1].

L'*artemisia herba-alba* a été reconnue par les populations pastorales et nomades pour ses vertus purgatives ; au Maroc, on l'utilise notamment comme vermifuge pour soulager les maux gastro-intestinaux et comme un traitement antidiabétique. [2, 3, 4].

La connaissance et la maîtrise des mécanismes intervenant dans les opérations de séchage des plantes aromatiques et médicinales (PAM) sont devenues des sujets faisant l'objet de nombreuses recherches en vue de valoriser et de préserver le produit obtenu. Ce travail décrit ces mécanismes à partir des mesures hygroscopiques et des cinétiques de séchage et des corrélations empiriques des vitesses de séchage des deux plantes médicinales.

2. MATÉRIEL ET MODE OPÉRATOIRE

Le dispositif expérimental utilisé dans les expériences de sorption est présenté dans la figure 1. L'échantillon est suspendu dans le bocal, au-dessus des sels, et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et en hygrométrie. Le suivi de la désorption et de l'adsorption se fait par la méthode gravimétrique à contrôle continu du poids de l'échantillon au moyen d'une balance de précision liée à un microordinateur par une interface appropriée.

L'appareillage expérimental utilisé pour analyser les cinétiques de séchage des deux plantes est un séchoir convectif indirect partiellement solaire fonctionnant en convection forcée (Figure 2). Il s'agit d'un système sans stockage et avec recyclage total ou partiel d'air et fonctionnant en régime continu [5, 6, 7].

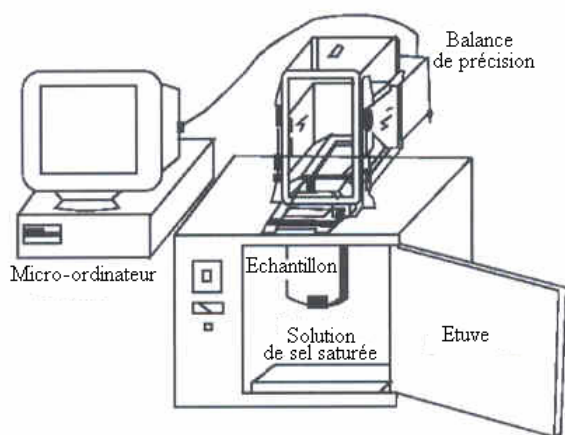


Figure 1 : Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de sorption en continu

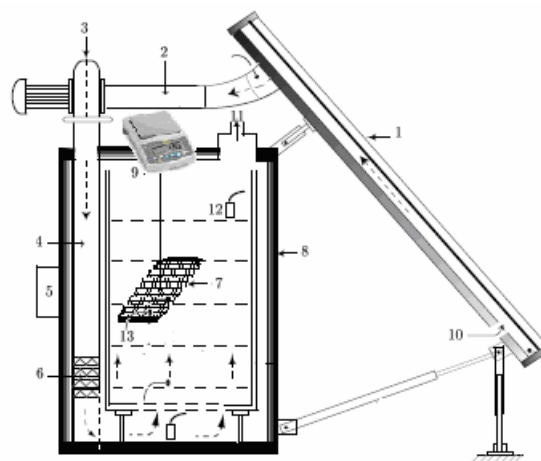


Figure 2: Coupe schématique du séchoir solaire (GRISPAM, ENS Marrakech)

3. FORMULATION MATHÉMATIQUE

3.1 Isothermes de sorption

Les masses humides des produits sont traitées par intervalles de temps successifs. Au fur et à mesure que la variation de la masse devient petite, on augmente l'intervalle de temps jusqu'à l'obtention d'une masse fixe indiquant l'atteinte de l'équilibre hygroscopique. Dès que la masse de l'échantillon devient stationnaire, on arrête l'expérience et l'échantillon est pesé et placé dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à ce que sa masse ne varie plus avec le temps. L'objectif de cette dernière opération est de déterminer les masses sèches des six échantillons. La connaissance de la masse humide et de la masse sèche du produit avant et après le séchage dans l'étuve, nous permet d'avoir la teneur en eau d'équilibre du produit dans chaque bocal :

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1)$$

3.2 Cinétique de séchage

Dans ce travail, nous avons utilisé le concept de courbe caractéristique de séchage. Cette méthode consiste à décrire la cinétique de séchage par une équation empirique obtenue par ajustement des courbes expérimentales réalisées. Elle vise à rassembler l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur un produit et pour diverses conditions de l'air asséchant sur une seule courbe de base dite courbe caractéristique de séchage (CCS). Il serait fort souhaitable de tenter de réduire cet ensemble de données expérimentales de manière à pouvoir le mettre sous forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même mais aussi pour l'ensemble de la communauté scientifique [8].

Le principe de la méthode développée par Van Meel [9] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(\frac{-dX}{dt}\right)$ à la vitesse de première

phase $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1$, dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite $\frac{X(t)-X_{eq}}{X_{cri}-X_{eq}}$.

Etant donné que la première phase est absente dans notre cas, alors on prend $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1 = \left(\frac{-dX}{dt}\right)_0$ et

$X_{cri} = X_0$. Ainsi, la forme générale de l'équation de la courbe caractéristique de séchage est donnée par $f=f(X^*)$:

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{crit} - X_{eq}} = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

$$\text{Ordonnée : } f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1} = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0}$$

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Comportement hygroscopique des deux plantes médicinales

Les isothermes de désorption et d'adsorption expérimentales sont présentées dans les figures 3 et 4 [10, 11]. Celles de l'armoise blanche a une allure sigmoïdale de type II, et celles de *la plante guérisseuse* sont de type V selon la classification de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC) [12]. Cependant, les deux plantes sont différentes vis-à-vis de la propriété dynamique d'hystérésis. Ce phénomène, qui montre l'effet de mémoire des produits végétaux et agroalimentaires sur leurs propriétés hygroscopiques, est remarqué pour l'armoise blanche et sans observation notable pour *la plante guérisseuse*.

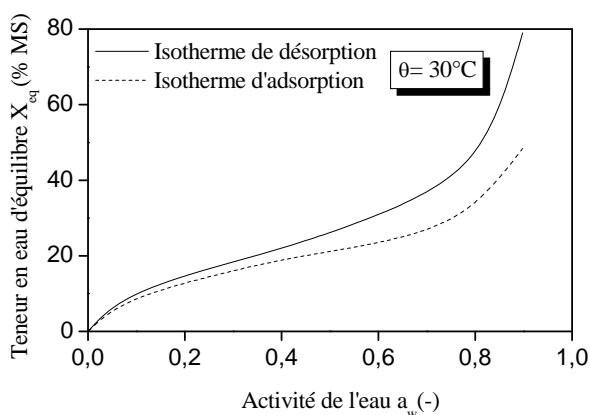


Figure 3 : Isothermes de désorption et d'adsorption de l'armoise blanche (*artemisia herba-alba*) montrant l'effet d'hystérésis.

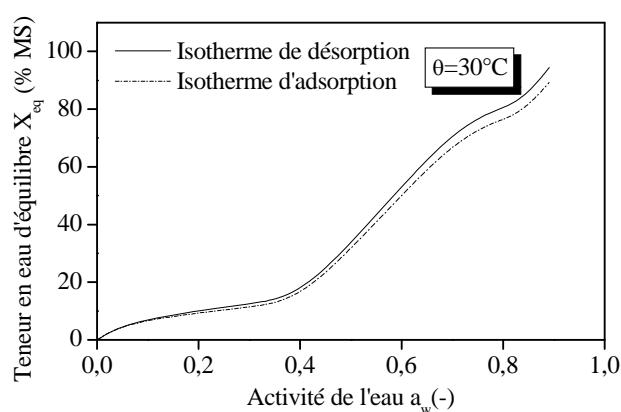


Figure 4 : Isothermes de désorption et d'adsorption de la plante guérisseuse (*zygophyllum gaetulum*).

4.2 Conditions optimales de conservation

Le procédé de calcul pour déterminer l'activité optimale de conservation consiste à faire une décomposition polynomiale de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} , pour l'ensemble des résultats expérimentaux, de chaque produit en fonction de l'activité de l'eau. Ceci permet de calculer la valeur pour laquelle la dérivée seconde de X_{eq} s'annule (point d'inflexion) et par suite les activités de l'eau optimales de conservation cohérentes avec les références de teneurs en eau (figures 5 et 6).

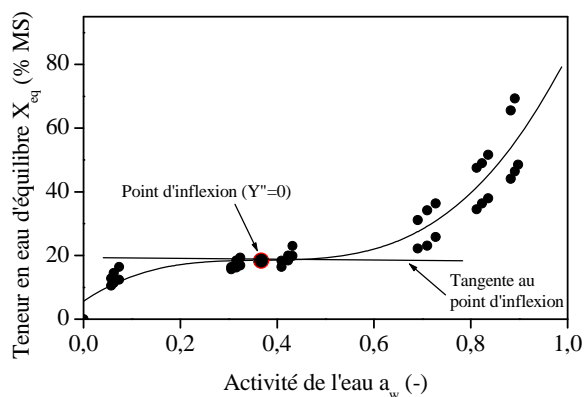


Figure 5 : Courbe donnant l'activité de l'eau optimale de conservation de l'armoise blanche

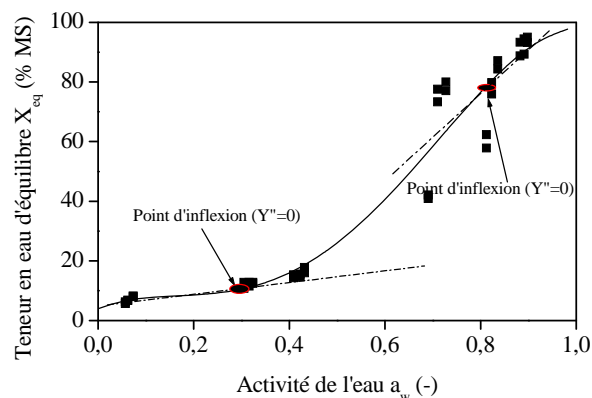


Figure 6 : Courbe donnant l'activité de l'eau optimale de conservation de la plante guérisseuse

Les résultats obtenus pour les activités de l'eau optimales de conservation cohérentes (tableau 1) sont en parfaite concordance avec les résultats obtenus par d'autres auteurs [13, 14]. La cohérence optimale des activités de l'eau est située généralement dans la gamme [0,3-0,4].

Pour la plante guérisseuse (allure sigmoïdale de type V), le fait d'avoir une activité de l'eau optimale cohérente hors la gamme de stabilité des produits agroalimentaires est dû à la teneur en eau à base humide très élevée (95%). *Zygophyllum gaetulum* est une plante grasse renfermant dans ses feuilles, composées de deux folioles, une réserve d'eau inépuisable même à des températures dépassant 80 °C en été [10].

Tableau 1 : Analyse polynomiale des courbes de sorption et activité de l'eau optimale des deux plantes étudiées

Produit	Equation polynomiale	$a_w(op)$
Armoise blanche	$X_{eq} = 5,9118 + 102,0842a_w - 277,2266a_w^2 + 252,139a_w^3$	0,3651
Plante guérisseuse	$X_{eq} = 4,2419 + 64,2361a_w - 382,1668a_w^2 + 948,2823a_w^3 - 537,7093a_w^4$	0,3 et 0,8

4.3 Cinétique de séchage solaire des deux plantes

Afin d'assurer une meilleure stabilité des conditions de séchage et une homogénéisation de la température à l'intérieur du séchoir, l'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction de la claie chargée dans la chambre de séchage.

Les expériences de séchage sont réalisées pour trois températures de l'air asséchant (50, 60 et 70 ± 0,1 °C) et pour deux débits d'air (0,028 et 0,056 ± 0,002 m³.s⁻¹).

Les courbes expérimentales décrivant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps sont présentées respectivement dans les figures 7 et 8. Une grande influence des conditions de l'air asséchant sur la vitesse de séchage est observée. On note également l'absence de la phase 0 (phase à allure croissante) et de la phase I (phase à allure constante) et la présence unique de la phase II (phase à allure décroissante) pour l'armoise. Cependant, dans le cas de la plante guérisseuse, les courbes expérimentales décrivant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps présentent les trois périodes de séchage décrites classiquement (période de mise en température, période de séchage à allure constante et période de séchage à allure décroissante). Toutefois, on note que la transition de la période I à la période II est peu nette.

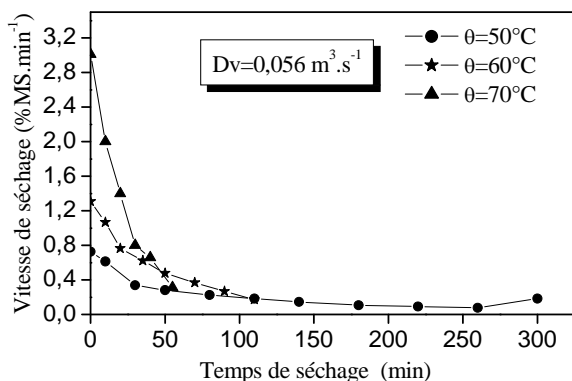


Figure 7 : Évolution de la vitesse de séchage de l'armoise blanche pour différentes conditions de l'air asséchant.

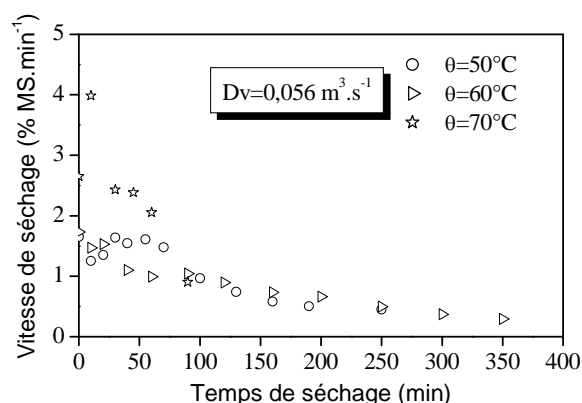


Figure 8 : Évolution de la vitesse de séchage de la plante guérissante pour différentes conditions de l'air asséchant.

4.4 Courbe caractéristique de séchage (CCS)

La CCS de l'armoise est présentée dans la figure 9. Cette figure montre qu'il y a un bon regroupement des courbes de séchage en dépit des variations des propriétés de l'air. La figure 10 représente l'image des courbes expérimentales de séchage de la plante guérissante (6 essais). Cette courbe montre une dispersion pour les moyennes humidités et un regroupement vers les fortes humidités.

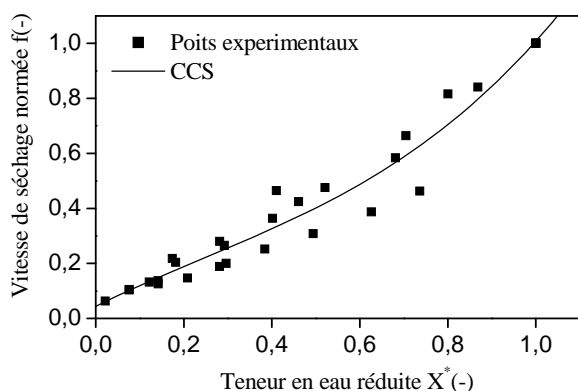


Figure 9 : Courbe caractéristique de séchage de l'armoise

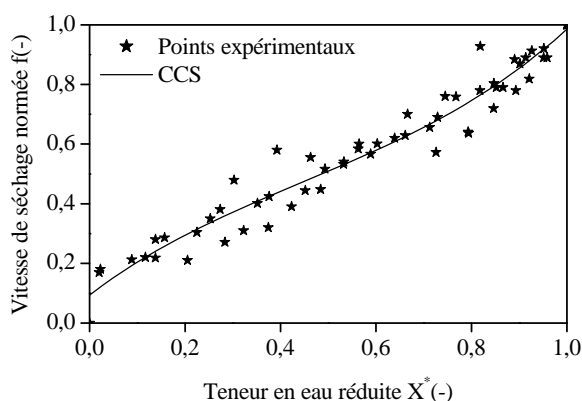


Figure 10 : Courbe caractéristique de séchage de la plante guérissante

$$f = 1,3911X^* - 2,7864X^{*2} + 3,9145X^{*3} - 1,5142X^{*4}$$

$$f = 0,9068 X^* + 0,1228 X^{*2} - 1,1846 X^{*3} + 0,9284 X^{*4}$$

5. CONCLUSION

Les isothermes de sorption des deux produits ont permis de déterminer les teneurs en eau finales qui servent à optimiser les conditions de séchage et de stockage de l'armoise blanche et de la plante guérissante de manière à assurer leur stabilité physico-chimique et microbiologique durant le stockage. Sur le plan théorique, si l'on connaît la teneur en eau et la température de la surface du produit, il sera possible, grâce à ces courbes, de connaître la valeur de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface et par conséquent de calculer l'allure de séchage dans le domaine hygroscopique. Les cinétiques de séchage que nous venons de réaliser consistent à déterminer une courbe caractéristique de séchage, et par suite une équation caractéristique de séchage, pour chaque produit, afin d'optimiser le fonctionnement d'une unité de séchage et réduire son coût énergétique.

La compréhension des phénomènes mis en jeu repose sur une bonne connaissance des équilibres entre l'air et le produit et sur la maîtrise des cinétiques de séchage et de transformation du produit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Jaouhari J.T., Lazrek H.B. & Jana M. (2000). The hypoglycemic activity of *Zygophyllum gaetulum* extracts in alloxan-induced hyperglycemic rats. *J Ethnopharmacol*, vol. 69(1), pp. 17-20.
2. Marrif, H.I., Ali. B.H. & Hassan, K.M. (1995). Some pharmacological studies on *Artemisia herba-alba* (Asso.) in rabbits and mice, *Journal of Ethnopharmacology*, 49, 51-55.
- Madamba P.S. Driscoll R.H. & Buckle K.A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of Food Engineering*, vol. 29, pp. 75-97.
3. Salido. S., Valenzuela. L.R., Altarejos. J., Nogueras. M., a, Sanchez. A., & Cano. E (2004). Composition and infraspecific variability of *Artemisia herba-alba* from southern Spain. *Biochemical Systematics and Ecology*, 32, 265-277.
4. Tahraoui, A., El-Hilaly. J., Israili. Z.H., & Lyoussi, B. (2007) Ethnopharmacological survey of plants used in the traditional treatment of hypertension and diabetes in south-eastern Morocco (Errachidia province) *Journal of Ethnopharmacology*, 110, 105-117.
5. Idlimam A., Kane C.S.E., Kouhila M (2007). Single layer drying behaviour of grenade peel in a forced convective solar dryer, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10(2), pp. 191-203.
6. Lahsasni S. (2004). Étude de la composition chimique et de la conservation par séchage solaire convectif d'un cactus inerme d'*Opuntia ficus indica* : impact du séchage sur la qualité des polysaccharides et des pigments, Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 189 p.
7. Kouhila M. (2001). Étude expérimentale et théorique de cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (menthe, verveine, sauge et eucalyptus) de la région de Marrakech, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 170 p.
8. Kechaou, N. (2000). *Étude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro-alimentaires*, Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p.
9. Van Meel D.A. (1958). Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, vol. 9, pp. 36-44.
10. Idlimam A., Lamharrar A., Abdenouri N., Kane C.S. Ethmane, Akkad S., Jamali A., Kouhila M (2008). Thermodynamic Properties and Moisture Sorption Isotherms of *Argania spinosa* and *Zygophyllum gaetulum*, *Journal of Agronomy*, vol. 7(1), pp. 1-14.
11. Lamharrar A., Idlimam A., Kouhila M (2007). Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of *Artemisia herba-alba*, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10(3), pp. 311- 320.
12. Rouquerol F., Rouquerol J. & Sing K. (1999). Adsorption by powders and porous solids. Principles. Methodology and Applications, Academic Press, London. pp. 773-782.
13. Jamali A. (2006). Étude des isothermes de sorption et des cinétiques de séchage solaire par convection forcée des feuilles d'ansérine (*Chenopodium ambrosioides*) et de mandarinier (*Citrus reticulata*) pour une meilleure conservation, Thèse d'Habilitation Universitaire, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 250p.
14. Le Meste M, Roudaut G, Chiotelli E, Simatos D, Colas B. (2001). Propriétés fonctionnelles de l'eau dans les aliments, *Industries Alimentaires et Agricoles*, vol 118(5), pp. 21-28.