

ETUDE EXPERIMENTALE DU SECHAGE CONVECTIF DES FEUILLES DE MARJOLAINE DANS UN SECHOIR SOLAIRE MUNI D'UN APPOINT ELECTRIQUE

A. BENHAMOU^{1*}, A. IDLIMAM², M. KOUHILA², B. BENYOUCEF³, ZEGHMATI Belkacem⁴

¹Laboratoire de Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique, Université M'Hammed Bouguerra, Boumerdès, Algérie

²Groupe de Recherche en Ingénierie de Séchage des Plantes Aromatiques et Médicinales, École Normale Supérieure, BP 2400, Marrakech, Maroc Fax : 024 34 22 87

³Unité de Recherche en Matériaux et Energies Renouvelables ; Université de Tlemcen, Algérie

⁴Laboratoire de Mathématiques et Physique des systèmes (LA.M.P.S.-G.M.E.), Université de Perpignan

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

RESUME

L'opération de séchage, doit réaliser un compromis entre la préservation de la qualité du produit séché et l'énergie à faible coût. La particularité du séchoir solaire installé au Laboratoire d'Energétique Solaire de L'école Normale Supérieure de Marrakech est l'utilisation partielle ou totale de l'énergie thermique en provenance du soleil, ce qui permet d'assurer un fonctionnement continu toute l'année.

Ce travail vise à présenter une approche expérimentale de la cinétique de séchage en couche mince des feuilles de marjolaine. Pour cela, nous avons étudié le comportement de ce produit en faisant varier les températures (40, 50 et 60°C) et les débits de l'air asséchant, (0,028 et 0,056 m³.s⁻¹). Les résultats expérimentaux peuvent être exploités pour établir une courbe caractéristique de séchage (C.C.S) et par la suite l'équation caractéristique de séchage (E.C.S) de ce produit.

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres aérothermiques sur le processus de séchage et d'établir des corrélations mathématiques empiriques décrivant leurs caractéristiques.

1. INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie solaire comme source de chauffage naturelle est un moyen rentable pour la déshydratation des produits à basses températures. Elle constitue une solution possible pour les pays non pourvus de richesses énergétiques conventionnelles.

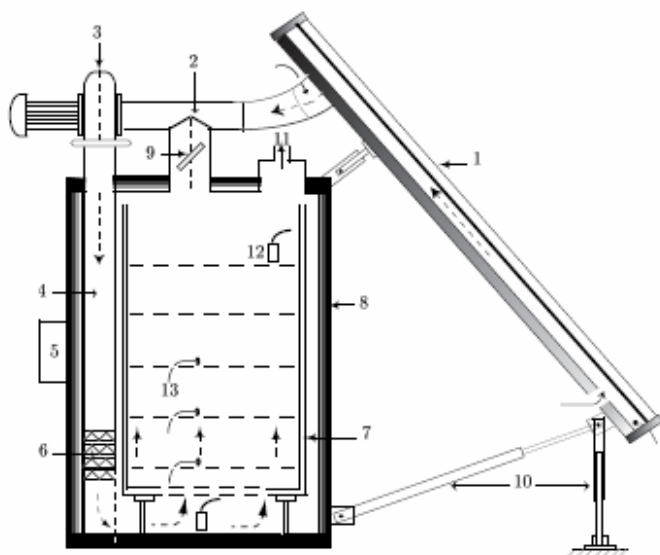
Le présent travail présente les résultats d'une étude expérimentale de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine, dans un séchoir indirect fonctionnant par convection forcée et à chauffage partiellement solaire [1]. Les expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques réelles (Mois d'Octobre 2008). Les scénarios expérimentaux envisagés visent à déterminer les courbes de perte de masse du produit en fixant sa masse initiale, sa teneur en eau initiale, la température de séchage, le débit d'air asséchant et la fraction d'air recyclé. Il s'agit d'étudier l'influence de ces paramètres aérothermiques sur la durée de séchage de la marjolaine.

2. APPAREILLAGE ET METHODE DE MESURE

Dans cette étude, on s'intéresse tout particulièrement au séchage des feuilles de marjolaine dans un séchoir solaire muni d'un appoint électrique et fonctionnant par convection forcée. L'expérience consiste à suivre le comportement thermique et massique du produit durant le séchage et d'évaluer les bilans énergétiques (radiatifs, convectifs,...) de ce procédé afin de prévoir l'influence de certains paramètres de l'air asséchant sur la cinétique de séchage du produit [2].

2.1 Description du séchoir solaire

Le système étudié présenté sur la figure 1 est un séchoir indirect modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire. Il est constitué des éléments suivants :



(1) insolateur, (2) conduite de ventilation, (3) ventilateur, (4) conduit d'aspiration, (5) boîte de commande, (6) appoint électrique, (7) étages, (8) armoire de séchage, (9) volet d'air, (10) entrée d'air, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité, (13) thermocouple.

Figure 1 : Coupe schématique du séchoir solaire indirect (LESPAM, ENS Marrakech)

- **une unité de production d'air chaud** constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, de surface $2,5 \text{ m}^2$, incliné de 31° (latitude de la ville de Marrakech) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur, en tôle galvanisée, est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 50 mm, est en polyuréthane et le vitrage est en verre ordinaire.

- **un conduit d'aspiration aérodynamique** constitué d'un tunnel de section parallélépipédique et conique dans le sens de sa hauteur.

- **une chambre de séchage** de hauteur 1,40 m, de profondeur 0,90 m et de largeur 0,50 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polyuréthane de 50 mm d'épaisseur. A l'intérieur de cette enceinte, on dispose d'un chariot mobile sur des rails et contenant dix claies en plastique (étagères) sur lesquelles on étale le produit à sécher.

- **une armoire de commande qui régit un système électrique comprenant :**

- un ventilateur centrifuge de marque SP et de type GO T 60 avec un débit d'air réglable à l'aide d'une vanne allant de 50 à $300 \text{ m}^3 / \text{h}$.
- un thermostat digital de gamme $0-99^\circ\text{C}$ relié à une sonde de platine PT 100 de classe A et de précision $0,33^\circ\text{C}$.
- des résistances électriques de puissance 1 kW.

- **une unité de production d'énergie d'appoint** constituée de résistances électriques à ailettes pilotées par un thermostat et un relais statique de puissance. Cette source de chaleur est placée dans un coffre collé au bas du caisson, en aval du ventilateur et au niveau de l'ouverture par où entre l'air caloporteur dans le conduit de séchage. Cette unité assure un chauffage d'appoint en cas d'insuffisance de l'apport solaire.

2.2 Principe de fonctionnement

L'air préalablement chauffé dans un capteur solaire plan à simple circulation est aspiré par l'intermédiaire d'un ventilateur centrifuge à travers le conduit aérodynamique qui le propulse à travers une enceinte de séchage dans laquelle sont disposés les produits à sécher. Dans cette enceinte, l'air traverse les claies suivant une direction normale à leur surface. Un appoint en énergie électrique est mis à l'entrée de l'enceinte de séchage afin d'assurer une température de consigne constante. A la sortie du séchoir, l'air est soit évacué vers l'extérieur, soit recyclé à travers le conduit d'aspiration.

2.3 Mesures effectuées

On se fixe la masse du produit à sécher par claie. On règle la température de séchage à l'aide du thermostat. On fixe un débit d'air asséchant à l'aide d'un vélocimètre muni d'un tube de Pitot. On règle le volet de recyclage à

l'aide d'une vanne pour se fixer la fraction d'air recyclé. On pèse le produit de chaque claie toutes les 10 mn jusqu'à l'atteinte de la teneur en eau souhaitée (teneur en eau finale du produit).

● **Préparation du produit :**

Les feuilles de marjolaine sont soigneusement préparées et étalées sur la première claie de l'armoire de séchage. La masse initiale du produit à sécher est de 20g pour tous les scénarios expérimentaux envisagés.

● **Mesure des températures :**

On sélectionne une section de l'armoire de séchage première claie au niveau de laquelle on installe une prise de température (thermocouple en miniature) pour suivre l'évolution de la température du produit sur la claie (ou étagère). A l'aide de thermocouples de type K (chromel-alumel) de diamètre $d=1\text{mm}$ et de précision $0,5^\circ\text{C}$, on mesure les températures à l'entrée et à la sortie du capteur, à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage et sur la surface du produit. L'ensemble des thermocouples est connecté à un enregistreur thermométrique à 30 voies.

● **Mesure de la masse humide du produit (Mh) :**

Pour pouvoir suivre d'une manière continue la diminution de masse au cours du processus de séchage des feuilles de marjolaine, on pèse le produit à sécher toutes les 10 mn environ.

● **Mesure de la masse sèche du produit (Ms) :**

Afin de déterminer la masse sèche du produit M_s , les feuilles de marjolaine séchées dans le séchoir solaire sont ensuite placées dans une étuve réglée à 105°C durant 6 à 7 heures. A l'aide d'une balance de précision $0,001\text{g}$, le produit est pesé toutes les heures jusqu'à déshydratation totale.

2.4 Protocole expérimental

Dans le conduit de séchage, nous avons sélectionné la première claie sur laquelle on a déposé le panier supportant les feuilles de marjolaine en couches minces. La claie contient une masse initiale de 20g. Pour suivre la variation de la température de la plante médicinale disposée sur la claie au cours du séchage, nous avons choisi deux sections au niveau desquelles nous avons installé deux thermocouples. Il faut noter que notre expérience est basée sur un chauffage partiellement solaire, et les conditions climatiques sont aléatoires et non contrôlées. Tous les scénarios expérimentaux sont réalisés pour deux débits d'air asséchant ($0,028$ et $0,056 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) [3].

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Cinétique de séchage de la sauge

La courbe de séchage représente la variation de la teneur en eau $X = (M_h - M_s) / M_s$ en fonction du temps (figure 2). Pour l'obtenir, nous avons suivi l'évolution la masse humide du produit M_h en cours de séchage en faisant des pesées des feuilles de marjolaine toutes les dix minutes jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée. Ce sont des abaques indispensables pour l'industrie agro-alimentaire surtout pour les opérations de stockage et de conservation [4, 5, 6]. La figure 3 illustre la variation de la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction du temps. L'obtention de cette courbe, se fait par dérivée de l'équation de lissage de la courbe $X=f(\text{temps})$.

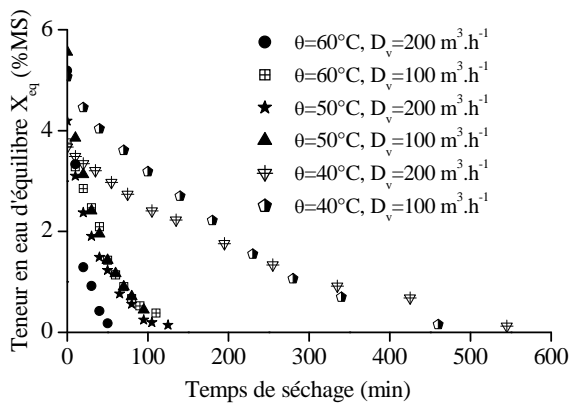


Figure 2 : Évolution de la teneur en eau des feuilles de marjolaine en fonction du temps de séchage pour

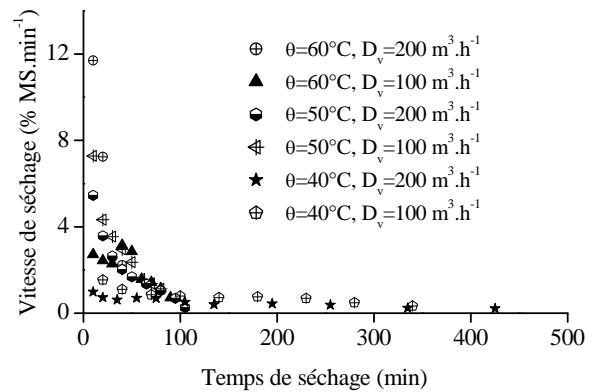


Figure 3 : Évolution de la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine en fonction du temps pour différentes

différentes conditions de l'air asséchant

conditions de l'air asséchant

3.2 Influence de la température et du débit d'air asséchant

La figure 4 représente les profils de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine pour trois températures de l'air asséchant. Ces cinétiques ne mettent pas en évidence les phases 0 et 1. Ce résultat est prévisible pour les produits biologiques qui sèchent à allure décroissante [7, 8]. En outre, ce type de séchage est souvent accompagné par des déformations du produit et par un dépôt de soluté, ce qui entraîne une réduction de la surface d'échange air-produit. La disponibilité de l'eau à diffuser et à évaporer se trouve ainsi réduite. La figure 4 montre qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la durée de séchage du produit.

Pour un même débit d'air asséchant, la vitesse de séchage augmente quand la température de l'air asséchant croît et par conséquent la teneur en eau des feuilles marjolaine diminue considérablement (Figure 4). L'influence du débit d'air asséchant (D_v) sur la vitesse de séchage des feuilles marjolaine est illustrée sur la figure 5. Nous constatons que pour une même température de l'air asséchant, une augmentation du débit d'air asséchant favorise l'accélération du processus de séchage en impliquant des échanges convectifs.

Il faut noter que pour une température de 70°C, la couleur des feuilles de marjolaine tendent vers un gris foncé. Son odeur n'est plus la même que celle de la plante fraîche. Pour des températures de 40°C, 50°C et 60°C, la plante garde plus ou moins sa couleur et son odeur.

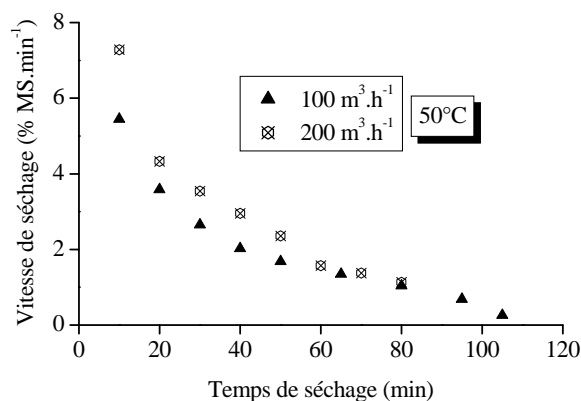
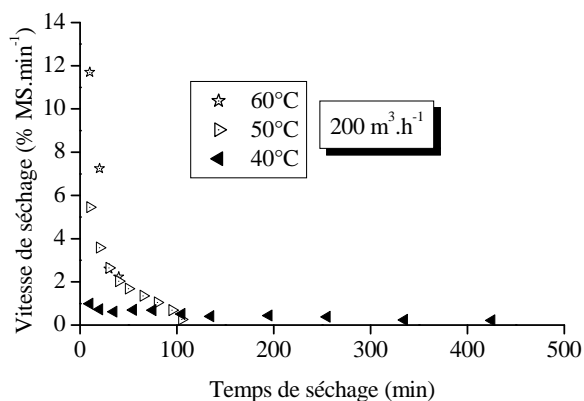


Figure 4 : Influence de la température sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

Figure 5 : Influence du débit d'air asséchant sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

À partir des six essais de séchage, nous avons établi la corrélation exprimant la vitesse de séchage normée des feuilles de marjolaine sous forme d'un polynôme d'ordre 4 en X^* (figure 6). Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire de Marquard-Levenberg en utilisant des logiciels appropriés et en traitant tous les points expérimentaux. Le meilleur lissage est obtenu en choisissant comme critère d'évaluation un coefficient de corrélation r élevé et une erreur systématique moyenne ESM minimale [9, 10].

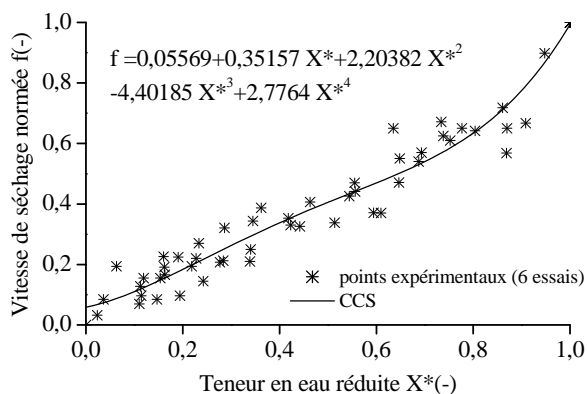


Figure 6 : Courbe caractéristique de séchage des feuilles de marjolaine

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons déterminé la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine à l'aide d'un séchoir à chauffage partiellement solaire. Une telle caractérisation est très intéressante du moment qu'elle permet d'approcher un facteur important qui est la vitesse de séchage. La détermination de la cinétique séchage est indispensable pour la bonne compréhension des mécanismes ayant lieu dans le produit étudié et pour le dimensionnement du séchoir utilisé.

Les expériences de séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de marjolaine sont effectuées pour trois températures (40, 50 et 60 °C) et pour deux débits d'air asséchant (0,0227 et 0,0556 m³.s⁻¹). Les courbes expérimentales obtenues ont montré une allure de séchage décroissante. Le principal facteur qui influe les cinétiques de séchage est la température de l'air asséchant. La courbe caractéristique de séchage est obtenue et l'équation de la vitesse de séchage est déterminée empiriquement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. M. Kouhila, Contribution à l'étude des performances thermiques et technico-économiques d'un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire : Application aux abricots, Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Ecole Normale Supérieure, Marrakech, Maroc, 1989.
2. B.C. Boutaleb, Etude expérimentale du séchage convectif des plantes médicinales : application à la sauge et à la verveine, Thèse de D.E.S, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 1997.
3. B.C. Boutaleb, A. Belghit, A. Bennis, M. Kouhila, R. Mokhlisse, S. Benet, Etude expérimentale du séchage par convection forcée de plantes médicinales : application à la sauge, Actes du 3ème Congrès de Mécanique, Vol. 2, pp. 545-550, Tétouan, Maroc, 1997.
4. Archimed G. & Solagro B. (1989). Le séchage des plantes aromatiques et médicinales, *Guide de conception et d'utilisation d'un séchoir*, Fondation de France et Direction de l'énergie de la Commission des communautés européennes, 80p.
5. Idlimam A. (2008). *Caractérisation thermophysique des plantes médicinales et de la poudre de lait par séchage solaire convectif en vue d'une meilleure conservation*, Thèse d'Habilitation Universitaire, Université My Ismail, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Maroc, 161p.
6. 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.
7. Camara, M. (1993). *Séchage solaire des plantes aromatiques*, Mémoire de fin d'études de 3ème cycle, IAV Hassan II, Rabat, 81 p.
8. Ait Mohamed, L., Kouhila, M., Jamali A., Lahsasni, S., Kechaou, N. Mahrouz, M. (2005c). Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection, *Energy conversion and Management*, vol. 46(9-10), pp. 1473-1483.
9. Kouhila M., Belghit A. & Daguinet M., (2001b). Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte, *Entropie*, vol. 37(233), pp. 20-31.
10. Lahsasni S., Kouhila M., Mahrouz M., Ait Mohamed L. & Agorram, B. (2004d). Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Process Engineering*, vol. 27(2), pp. 103- 117.