

VALORISATION ENERGETIQUE DES RESIDUS AGRICOLES : I- SECHAGE CONVECTIF DES GRIGNONS D'OLIVE

A. IDLIMAM^a, M. ASBIK^b, B. SARH^c, B. IZRAR^c

- a. Equipe de l'Energie Solaire et Plantes Aromatiques et Médicinales, Ecole Normale Supérieure, UCAM, B.P 2400, Marrakech, Maroc
- b. Laboratoire de Physique des Matériaux et Modélisation des Systèmes, URAC08, Faculté des Sciences, UMI, BP11201, Zitoune, Meknès
- c. ICARE, CNRS - 1C avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex2

Résumé :

Le projet VERA concerne la valorisation énergétique de déchets agricoles et notamment des grignons d'olive de la région de Meknès au Maroc. Le procédé global comporte i) la phase de préparation des résidus pour la combustion ; ii) leur combustion dans un système approprié pour la production de la chaleur ; iii) l'utilisation de la chaleur pour la production de vapeur d'eau et éventuellement de l'électricité. Les grignons sont séchés dans un séchoir solaire à couche mince. Ce dispositif fonctionnant en convection forcée, est muni d'un appoint électrique. Pour un débit d'air asséchant $D_v = 0,056 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les résultats obtenus relatifs à chaque type de grignons, sont présentés sous forme de teneur en eau et de vitesse de séchage. L'analyse a montré l'existence des trois phases classiques de séchage. Les courbes caractéristiques des deux types de matériaux ainsi que des corrélations empiriques exprimant les vitesses de séchage, sont également présentées. L'influence de la température de l'air asséchant sur les résultats obtenus est mise en évidence.

Abstract

VERA project concerns energy valorization of agricultural wastes in particular pomace olives residue which come from region of Meknes in Morocco. The overall process comprises i) the preparation stage for the combustion residues, ii) combusting them suitable for the production of the heat system, and iii) the use of heat for the production of steam and optionally electricity. The residue is dried in a thin film solar drier. This experimental device operating in forced convection is equipped with an additional electric heater. For the flow rate of drying $D_v = 0.056 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the experimental results are mainly presented in the form of water content and the speed drying. The analysis of these results showed the existence of the three conventional drying phases. The characteristic curves of the two types of materials as well as empirical correlations expressing the drying rates are also presented. The influence of the drying air temperature on the obtained results is highlighted

Mots clés : Grignons d'olives, Séchoir solaire, Valorisation des résidus agricoles, Vitesse de séchage

Nomenclature

MS matière sèche	D_v	débit de l'air asséchant, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
M_h masse humide, g	$X = (M_h - M_s) / M_s$	teneur en eau du produit, g eau. $(\text{g MS})^{-1}$
M_s masse sèche, g	X_{eq}	teneur en eau d'équilibre, g eau. $(\text{g MS})^{-1}$
t temps de séchage, min	X_{in}	teneur en eau initiale, g eau. $(\text{g MS})^{-1}$
θ température de l'air, °C	X^*	teneur en eau réduite
f vitesse normée	$-dX/dt$	vitesse de séchage, g eau. $(\text{g MS})^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
	$(-dX/dt)_i$	vitesse initiale de séchage, g eau. $(\text{g MS})^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

1. Introduction

Le projet VERA a pour ambition d'optimiser et de valider par des tests un procédé intégré de valorisation énergétique de déchets agricoles et notamment des grignons d'olive. Le procédé global comporte i) la phase

de préparation des résidus pour la combustion, et notamment de séchage des grignons en utilisant l'énergie solaire thermique ; ii) leur combustion dans un système approprié pour la production de la chaleur ; iii) l'utilisation de la chaleur pour la production de vapeur d'eau et éventuellement de l'électricité. Les deux premières phases de ce procédé seront étudiées dans le présent projet ; pour la dernière phase, seules des études d'optimisation seront effectuées pour déterminer les conditions optimales de valorisation énergétique de la chaleur de combustion, notamment pour sa transformation en électricité. Le travail soumis reprend les résultats préliminaires de la première tâche qui consiste à sécher les grignons d'olives en utilisant un dispositif expérimental constitué d'une cellule de séchage par énergie solaire.

Si l'on se réfère à de nombreux travaux [1, 7, 8] sur le séchage des produits biologiques, on constate qu'il est difficile de mettre en équation l'évolution de ces produits au cours du séchage. Seule une étude expérimentale permet de déterminer leur cinétique de séchage. Il semble donc utile d'étudier la variation de la teneur en eau et de la vitesse de séchage en fonction du temps pour différents paramètres aérothermiques contrôlables à l'aide d'un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée. L'ensemble des résultats, pour un produit, peut être regroupé en une seule courbe appelée : *courbe caractéristique de séchage (C.C.S)* dont l'intérêt pratique est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir le mettre sous forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique.

L'objectif visé dans ce travail est l'étude expérimentale de la cinétique de séchage de deux types de grignons d'olives, en l'occurrence les résidus pressés et bruts. Les deux types de grignons sont séchés en couches minces dans des conditions aérothermiques contrôlées. Les essais expérimentaux consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, vitesse et humidité de l'air sec) sur la vitesse de séchage. On cherche par la suite des corrélations, déduites d'une approche empirique de cette cinétique de séchage, qui peuvent servir au dimensionnement et à la modélisation des séchoirs solaires.

2. Procédure expérimentale

La figure 1 montre le dispositif expérimental utilisé, dont la description est détaillée dans la référence [3]. Les échantillons des deux types de grignons utilisés dans les expériences de séchage proviennent de la région de Meknès, réputée par ses unités de trituration d'olives tant conventionnelles que modernes. La masse initiale des deux types de grignons est de $(100 \pm 0,1)$ g. Les échantillons sont répartis en couches minces sur la première claie du séchoir après une demi-heure de fonctionnement du système de séchage (FIG.1). La durée de la préparation du produit, du chargement du séchoir et de la mise en route du système de mesures sont réduits au minimum. La température de séchage est réglée à l'aide d'un appoint électrique; le débit d'air est contrôlé par un ventilateur à trois niveaux de débit ($100, 200$ et $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); l'humidité relative de l'air asséchant est mesurée à l'entrée de l'armoire de séchage pour chaque essai à l'aide d'un hygromètre de sensibilité $\pm 2\%$ sur l'humidité relative. La variation de la masse humide du produit $M_h(t)$ en fonction du temps est déterminé en faisant des pesées statiques d'une durée de 30 s, au moyen d'une balance de précision $\pm 0.001\text{g}$. Le pas de temps varie de 10 min au début des essais jusqu'à 30 min vers la fin de l'expérience. À la fin de chaque expérience, on procède à l'étuvage du produit séché à 105°C pendant 24 h pour déterminer sa masse sèche M_s .

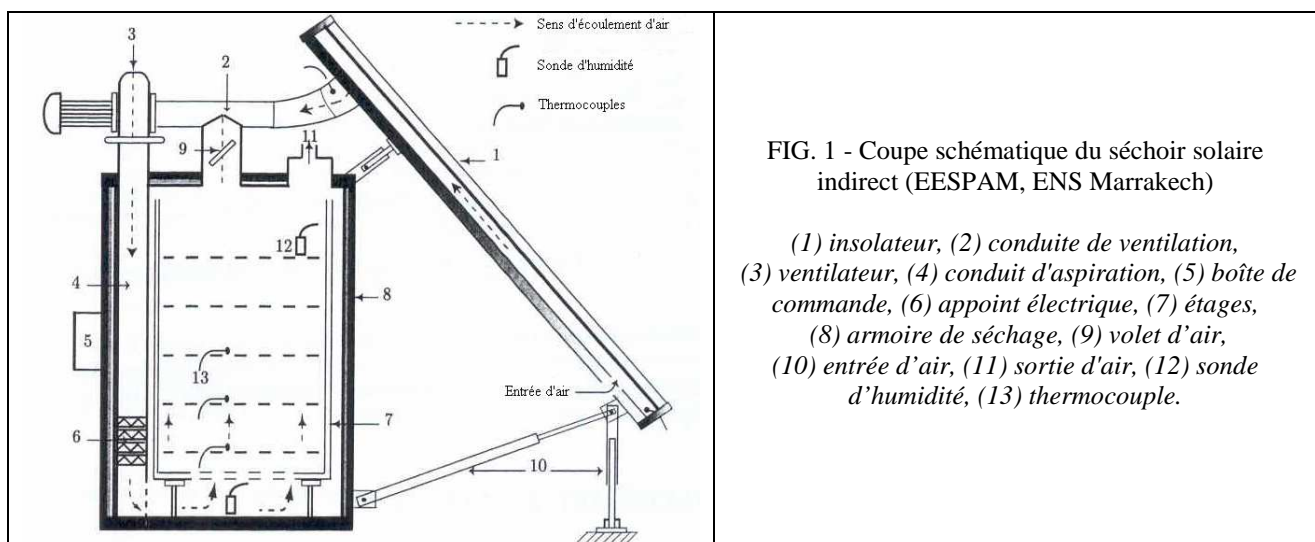


FIG. 1 - Coupe schématique du séchoir solaire indirect (EESPAM, ENS Marrakech)

(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.

3. Présentation des résultats

3.1. Etude de la cinétique de séchage

Les figures 2 et 3 représentent respectivement les courbes de séchage des grignons pressés et bruts (Voir photos sur les figures 4a et 4b). Il ressort de ces présentations que la température de l'air asséchant influe énormément sur la cinétique de séchage des grignons d'olives. Ainsi, nous retenons principalement que :

- Les courbes expérimentales décrivant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps (figures 2b-c) et la teneur en eau présentent les trois phases classiques de séchage : phase de mise en température, phase de séchage à allure constante et phase de séchage à allure décroissante.
- La transition de la phase I à la phase II est peu nette dans le cas des grignons d'olives pressés.

Ce résultat apparaît généralement pour les produits agroalimentaires présentant, en plus d'une teneur en eau élevée, des teneurs en huiles importantes [2, 3]. Ceci peut avoir une liaison directe avec les phénomènes de gonflement des pores d'adsorption des produits gras [4].

3.2. Influence de la température de l'air asséchant

Pour les deux types de grignons d'olives, la teneur en eau suit une allure décroissante au fur et à mesure que la température de l'air augmente (figures 2 et 3). En revanche, le principal facteur qui influe les cinétiques de séchage des deux produits est la température de l'air asséchant. Cependant on note un chevauchement des courbes de vitesse des deux produits pour des températures de l'air asséchant élevées (60°C et 80°C), probablement dû à la mise en équilibre des produits lipidiques présents au début de séchage. On constate un parfait accord avec d'autres travaux [5]. Au niveau de toute la phase de ralentissement, pour les grignons bruts et pressés, les conditions aérothermiques ont une influence qui diminue jusqu'à devenir faible à la fin du séchage.

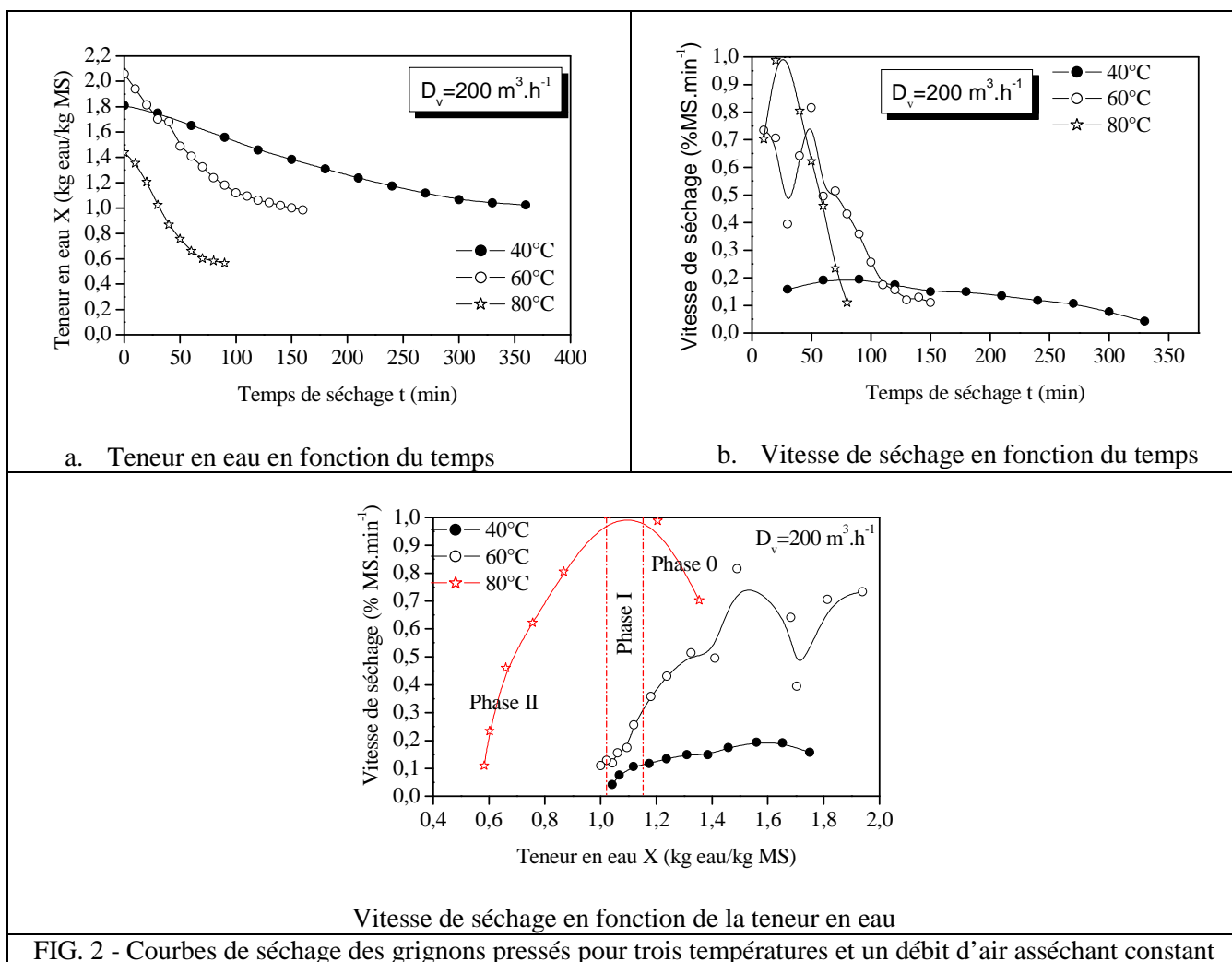


FIG. 2 - Courbes de séchage des grignons pressés pour trois températures et un débit d'air asséchant constant

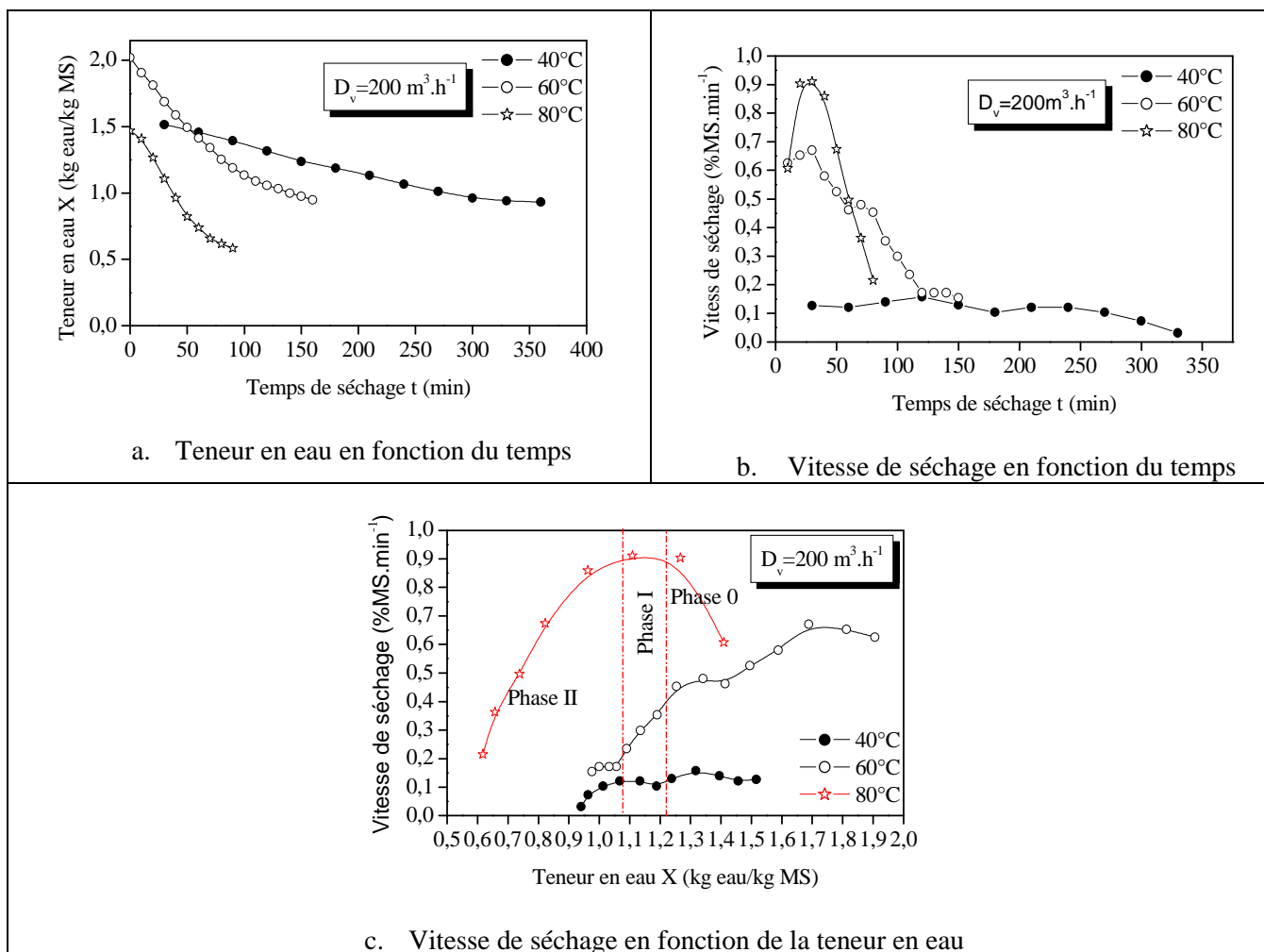


FIG. 3 - Courbes de séchage des grignons bruts pour trois températures et un débit d'air asséchant constant



FIG. 4a - Grignons d'olives bruts, séchés

FIG. 4b - Grignons d'olives pressés, séchés

3.3. Détermination des courbes caractéristiques de séchage

Le but de cette partie est de synthétiser les résultats obtenus en déterminant, à partir des essais réalisés, une courbe de base dite courbe caractéristique de séchage (C.C.S).

Le principe de la méthode développée par Van Meel [6] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t , $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_t$ à la vitesse de première phase $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_I$, dans les

mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite $\frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$. Ainsi, la forme générale de

l'équation de la courbe caractéristique de séchage est donnée par $f = f(X^*)$:

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1)$$

$$\text{Ordonnée : } f = \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_I} = \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_0} \quad (2)$$

Pour une gamme raisonnable de conditions expérimentales constantes durant le séchage (température, vitesse, humidité de l'air et dimensions du produit à sécher), la courbe caractéristique de séchage (CCS) vérifie les propriétés suivantes.

$$\begin{cases} f = 0 \text{ pour } X^* = 0 \\ 0 \leq f \leq 1 \text{ pour } 0 \leq X^* \leq 1 \\ f = 1 \text{ pour } X^* \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Les figures 5 et 6 représentent les C.C.S ainsi obtenues. L'intérêt de ces courbes est considérable. En effet, il suffit de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et celle d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air asséchant [7].

Un lissage des courbes caractéristiques de séchage des deux types de grignons d'olives, nous permet de déterminer leurs équations, sous forme de deux polynômes de degré 5, dont les expressions sont les suivantes :

$$\text{Grignons d'olives pressés} \quad f = -0,0089 + 1,9165 X^* - 1,3015 X^{*2} + 0,3532 X^{*3} \quad (4)$$

$$\text{Grignons d'olives bruts} \quad f = 0,0431 + 2,7749 X^* - 3,3720 X^{*2} + 1,5107 X^{*3} \quad (5)$$

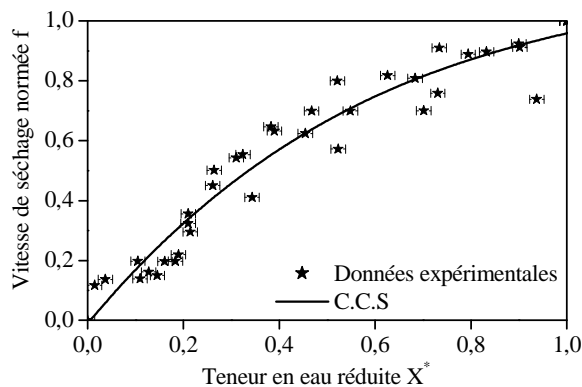


FIG. 5 - Courbe caractéristique de séchage des grignons d'olives pressés

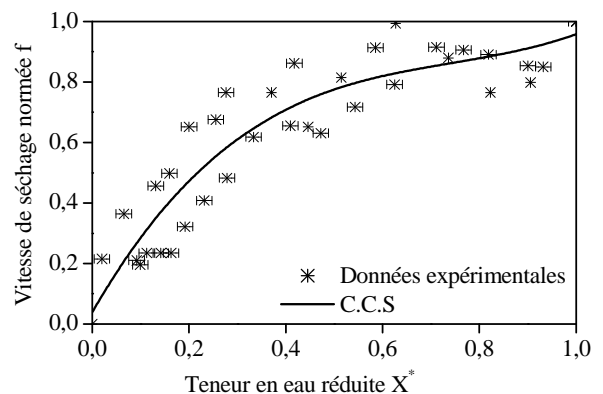


FIG. 6 - Courbe caractéristique de séchage des grignons d'olives bruts

Il semble donc intéressant de point de vue dimensionnement des séchoirs solaire de bien déterminer cette courbe considérée comme une approche simplifiée qui autorise des procédures systématiques de calcul et peut servir à l'analyse de plusieurs cas semblables [8].

4. Conclusion

Ce travail a permis d'exploiter les résultats expérimentaux obtenus, pour chacun des deux types de grignons, afin de déterminer une courbe de base qui est la courbe caractéristique de séchage (C.C.S). En dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique, nous avons pu déterminer une courbe caractéristique de séchage pour les grignons d'olives, bruts et pressés, de la région de Meknès au moyen d'une normalisation convenable des résultats pour l'intervalle des conditions d'air suivantes :

$$\begin{aligned} 40 &\leq \theta \leq 80 \text{ }^\circ\text{C} \\ 54 &\leq \text{HR} \leq 66 \% \\ D_v &= 0,056 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Ces corrélations sont indispensables pour le dimensionnement des séchoirs solaires et pour la simulation des phénomènes de transfert ayant lieu lors du processus de séchage. L'objectif est de cerner les facteurs aérothermiques qui influencent la durée de séchage des grignons d'olives dans un séchoir solaire convectif fonctionnant en situation réelle.

Ainsi, ces résultats nous amènent à envisager le séchage solaire des grignons d'olives en situation réelle dans un séchoir solaire indirect polyvalent en vue d'une valorisation de ses sous produits agricoles extraits en grande quantité dans la région de Meknès.

Il reste à déterminer les seuils de température maxima, les teneurs en eau finales et les isothermes de sorption afin d'éviter la dégradation de ces produits et permettre leur stockage après séchage. De tels paramètres sont utiles pour l'industrie agro-alimentaire. La connaissance de telles informations permet de sécher les deux types de grignons d'olives dans des conditions assurant leur conservation et leur valorisation à long terme.

Ce travail se poursuit par une modélisation couplée à des mesures expérimentales en vue de déterminer les conditions optimales d'utilisation des résidus d'extraction d'huile d'olive dans des brûleurs et chaudières spécifiques et surtout dans leur environnement humain. Le système retenu est un système à lit fluidisé pour la combustion de ces grignons. Il sera étudié les performances d'un tel système en fonction du degré de séchage.

5. Références

- [1] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B.-C Boutaleb, S. Benet, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, *Revue Générale de Thermique* 36 (1997) 837-850.
- [2] Idlimam A., Lamharrar A., Abdenouri N., Kane C.S. Ethmane, Akkad S., Jamali A., Kouhila M (2007). Thermodynamic Properties and Moisture Sorption Isotherms of *Argania spinosa* and *Zygophyllum gaetulum*, *Journal of Agronomy*, vol. 7(1), pp. 1-14.
- [3] A. Idlimam, 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, Faculté des Sciences d'Errachidia (03 mai 2008).
- [4] Aguerre R. J., Suarez C. & Viollaz P.E. (1986). Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. *Journal of Food Science*, vol. 51(6), pp. 1547-1549.
- [5] A. Voilley, C. Moyne, Le séchage, *Cahiers de l'ENSBANA*, Université de Dijon, France, (1990) 149-170.
- [6] Van Meel D.A. (1958). Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, vol. 9, pp. 36-44.
- [7] Kechaou, N. (2000). Étude théorique et expérimentale du processus de séchage des produits agro-alimentaires, Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p.
- [8] A. Belghit, M. Kouhila, B.-C Boutaleb, Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, *Energy Conversion and Management* 41 (12) (2000) 1303-1322.

Remerciements

Ce projet de recherche est financé par la Région Centre dans le cadre d'appel à projets 2012