

SECHOIRS SOLAIRES. ETUDE COMPARATIVE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES DANS DES MODELES DE TYPE DIRECT ET INDIRECT

Ryad BENKHELFELLAH*, Sofiane El MOKRETAR**, Rachid MIRI* et Maïouf BELHAMEI**

*Fac. de Génie Mécanique et Génie des Procédés, USTHB, 16111 BEZ El Alia Alger.

**CDER, Route de l'Observatoire, BP N°62, Bouzaréah, 16006 Alger

E-mail : mirirachid@yahoo.fr

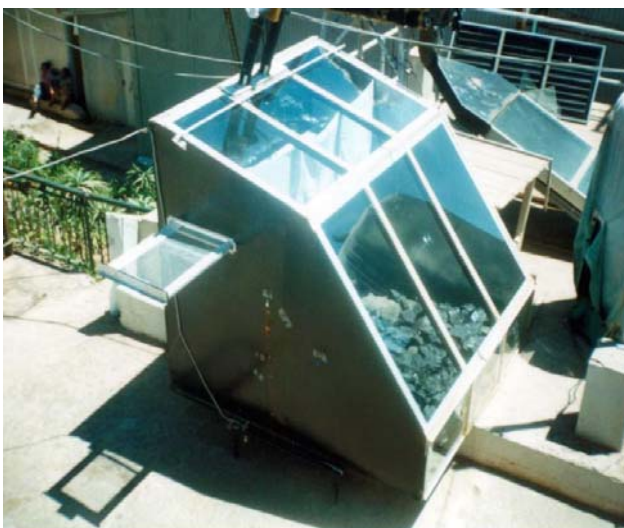
1. INTRODUCTION

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé à la fois dans le monde rural dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire, le textile...etc. Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection naturelle. Evidemment la quantité de soleil et d'humidité affectera les performances du séchoir. Les séchoirs solaires se divisent en deux modèles, de type directs et indirects. Aussi, ces systèmes peuvent être actifs ou passifs. tous les avis examinés s'accordent sur des températures de séchage comprises entre 35° et 82°C et de 43.5 à 60°C sont les plus communes. Dans ce travail, nous entreprenons l'étude du bilan d'énergie de modèles expérimentaux de séchoir solaire de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agro alimentaires, compte tenu des conditions ambiantes du site donné.

MATERIEL ET METHODE

Les dispositifs expérimentaux de séchoirs solaires de produits agroalimentaires, de type direct et indirect sont présentés sur les figures 1.a et 1.b. Ils ont été conçus et réalisés au C.D.E.R de Bouzaréah (Alger). Le séchoir solaire de type direct (**fig. 1.a**) s'apparente à une serre solaire: Le grand axe du dispositif est parallèle à la direction Est-Ouest. La couverture du modèle exposé au sud géographique et composée en verre ordinaire d'épaisseur 4mm, comprend deux parties : Un vitrage fortement incliné (55°) et un vitrage faiblement incliné (15°). Les parois latérales et verticales ainsi que le plancher sont isolés thermiquement. Il comprend, en

outre, un système de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux (granite) peints en noir. Le séchoir solaire de type indirect (**fig. 1.b**) sans recyclage d'air et sans système d'appoint se compose d'un capteur à air et d'une chambre de séchage. Le capteur solaire plan permet de chauffer l'air dans la partie comprise entre la vitre et la plaque absorbante jusqu'à des températures avoisinant les 90°C. Il a une longueur de 2m, une largeur de 0.94m et une hauteur de 0.12m. La partie arrière et les parois latérales sont isolées thermiquement. Notre chambre de séchage est une boîte en bois de forme cubique dont la partie supérieure est surmontée d'une toiture en forme de 'V'. Elle est isolée thermiquement. En outre elle est munie d'une cheminée sur le toit ainsi que d'une ouverture sur sa base pour l'admission de l'air chaud provenant du capteur. Les quatre faces latérales ont une surface de 1m² chacune. L'une d'elle est munie d'une porte à doubles battants. la boîte de séchage est entièrement recouverte d'un plastique de couleur noire pour assurer une parfaite étanchéité les jours de pluie et un maximum d'apport thermique par rayonnement solaire. Notre chambre de séchage est posée sur un support métallique à une hauteur de 2.20m du sol. Les produits sont disposés à l'intérieur de la boîte sur trois (3) claies de forme carrée composées chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage galvanisé, pour permettre le passage de l'air. Les claies sont distantes, les unes des autres, de 20 centimètres. Les mesures de l'humidité de l'air, du rayonnement et de la température nous sont communiquées par un enregistreur automatique de données. Nous utilisons, en outre, une balance de précision pour la pesée systématique des produits séchés.



(a)



(b)

Fig. 1. : Séchoirs solaires expérimentaux. -a- de type direct et -b- de type indirect

La modélisation mathématique consiste, quant à elle, à traduire les phénomènes physiques par une série d'équations mettant en évidence l'état énergétique des différents sous-systèmes constituant les modèles. Nous donnons à titre d'exemple (figure 2) les différents transferts de chaleur intervenant dans le séchoir serre. Les coefficients d'échange, par rayonnement et convection, sont déterminés en fonction du temps.

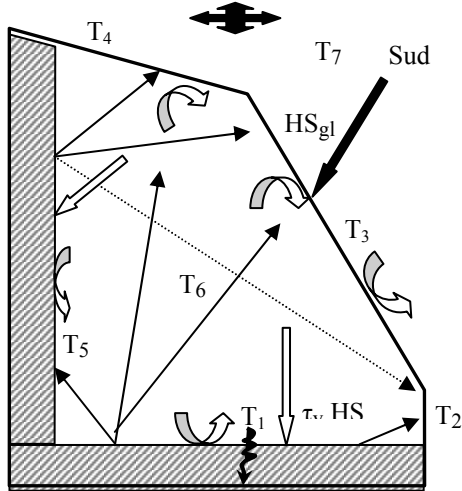


Fig. 2 : Echanges d'énergie dans le séchoir

Légende :

- Flux solaire global incident (HS_{global})
- Flux transmis à travers les vitres ($\tau_v \cdot HS_{gl}$)
- Rayonnement infrarouge
- Convection naturelle
- Conduction thermique dans les cailloux

Les systèmes d'équations différentielles, régissant le fonctionnement des différents éléments de nos modèles, sont résolus numériquement par la méthode de Runge-Kutta au 4^{ème} ordre [14, 15]. A partir de la valeur initiale $y(x_0) = y_0$ sont déduits, de pas en pas, $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$. L'erreur systématique de troncature est de l'ordre de h^5 , où h est le pas de calcul.

RESULTATS

Intensité du rayonnement solaire : La figure 3 illustre l'évolution théorique des composantes incidente, diffuse et globale du rayonnement solaire. L'intensité lumineuse incidente (directe) augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur théorique maximale de $780 \text{ (w/m}^2\text{)}$ pour un relevé expérimental de $818 \text{ (w/m}^2\text{)}$ à 12 TSV (13h locales), puis chute jusqu'à atteindre une valeur nulle aux environs de 19h locales. Pour ce qui est du rayonnement diffus, nous pouvons voir qu'il est régulièrement réparti autour de la valeur moyenne de 105 W/m^2 , soit 12% de l'éclairage énergétique total. Etant le résultat de la somme des rayonnements diffus et direct, la distribution du rayonnement global (figure 4) atteint une valeur théorique maximale de 884 W/m^2 tandis que le relevé expérimental indique, pour cet ensoleillement, une valeur maximale de 922 W/m^2 . Nous notons une similitude entre les courbes théoriques et expérimentales avec un écart max. inférieur à 10%.

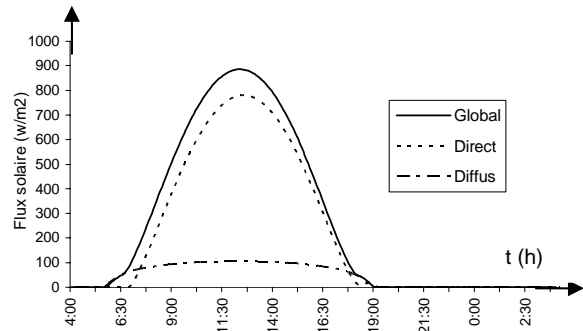


Fig. 3: Variation du rayonnement solaire théorique

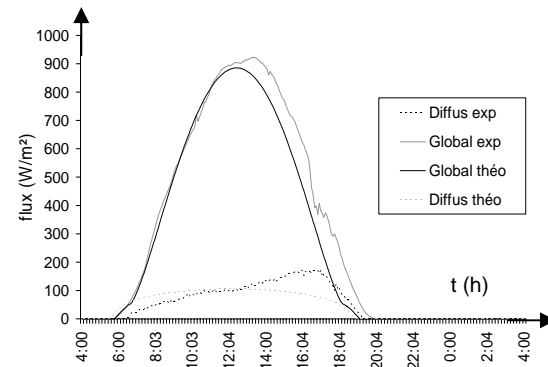


Fig. 4: Evolution théorique et expérimentale du rayonnement solaire (Flux global et diffus)

Température des différents éléments des séchoirs

Les températures des différents éléments du modèle direct sont successivement représentées sur la figures 5 (résultats théoriques) et sur la figure 6 (relevés expérimentaux). L'allure des courbes est la même pour chaque élément et suit d'une manière systématique l'évolution de l'énergie solaire globale. En période nocturne le lit de galets permet de maintenir l'air intérieur à des températures de valeurs supérieures à celle du milieu extérieur. La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales témoigne d'un accord satisfaisant avec un écart maximum de 10%. Les températures expérimentales du séchoir indirect sont représentées sur les figures 7 (capteur à air) et sur la figure 8 (chambre de séchage). Au niveau de l'absorbant, la température atteint des valeurs avoisinantes les 110°C tandis que l'air asséchant approche la valeur des valeurs de température de 90°C . Dans la chambre de séchage, la température au niveau des claies est pratiquement constante et sa valeur est égale à 45°C .

Cinétique de séchage de produits agro-alimentaires

Cette partie du travail est consacrée au séchage de différents produits agroalimentaires dans les séchoirs de type direct et indirect. Le but essentiel de cette partie expérimentale est de déterminer les courbes de perte d'humidité relative et de vitesse de séchage des produits suivants : Menthe verte, Verveine, Laurier, Raisin (dattier), Prune, Banane, Piment, Figue et datte. L'étude expérimentale s'est déroulée entre juillet et Septembre 2004. Les mêmes appareils que ceux décrits précédemment sont utilisés, en plus d'une balance de précision (0.1g) pour la pesée des produits à sécher. La vitesse de l'air à l'entrée de notre modèle, mesurée à l'aide

d'un anémomètre, est restée pratiquement constante tout le long de l'expérience. Sa valeur variant entre 1.2 et 2 m/s. Les valeurs moyennes de température et de rayonnement à l'intérieur de notre modèle sont respectivement: $T_m = 45^\circ\text{C}$ et $HS_\tau = 653 \text{ w/m}^2$. Après le traitement des produits à sécher (découpage, blanchiment ou sulfuration), vient l'opération du séchage qui consiste, au préalable, à les étaler sur la claie du séchoir. Les courbes de perte d'humidité relative présentées ci après, représentent l'évolution du pourcentage de la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à sa masse totale ou humide. L'humidité relative d'un produit W , est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{\text{Masse d'eau contenue dans le produit}}{\text{Masse totale du produit}} \left[\frac{\text{kg. eau}}{\text{kg. produit}} \right]$$

La vitesse de séchage V , déduite à partir des pertes d'humidité, est donnée par la relation suivante:

$$V = \frac{\Delta W}{\Delta t} \left[\frac{\text{kg. eau} / \text{kg. produit}}{\text{heure}} \right]$$

Présentation des résultats relatifs au séchage des produits : Sont représentées, sur les figures 10, 11, 12, les évolutions de perte de masse (ou de l'humidité relative) et sur les figures 13, 14, 15, les courbes de vitesse de séchage valables pour le modèle serre, d'échantillon de trois catégories de produits: la menthe (produit en feuille et à faible teneur en humidité), le raisin (produits gorgés d'eau) et la banane (produit à humidité profonde et à haute concentration de sucre). Pour la détermination des courbes de perte d'humidité, des pesées sont effectuées durant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits (fin de l'opération de séchage). L'humidité initiale est déduite à la fin de

l'opération de séchage, par la différence entre la masse initiale et finale du produit considéré. Il reste bien entendu que chaque produit gardera, après le séchage, un certain taux humidité évalué par étuvage.

CONCLUSION

L'étude théorique et expérimentale entreprise sur le séchage solaire de type direct et indirect, en convection naturelle et sans aucun apport d'énergie d'appoint, a consisté, en premier lieu, en la mesure et au relevé des composantes du rayonnement solaire, des températures et de l'humidité à l'intérieur de notre modèle et, en second lieu, en la détermination des courbes de perte d'humidité de chaque produit séché par des pesées successives pendant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits (tableau I-a et I-b. D'une manière générale, les produits sèchent 2 à 5 fois plus vite dans un séchoir solaire qu'à l'air libre. Parallèlement, un modèle numérique qui décrit le comportement thermique du séchoir est développé et permet de calculer et de tracer l'évolution des composantes rayonnement solaire et des températures des différents éléments du système. Un accord assez satisfaisant entre les résultats théoriques et expérimentaux avec un taux d'erreur inférieur à 10% est enregistré, ce qui paraît satisfaisant compte tenu de la difficulté de déterminer avec précision certains paramètres astronomiques ou atmosphériques et les coefficients d'échange basés, dans la plupart des cas, sur des relations empiriques. Les courbes de cinétique de séchage étant tracées, il reste à étudier les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse pour chaque produit. Aussi, il serait intéressant de tester nos modèles à plus grande échelle au niveau de sites bien ensoleillés où le taux d'humidité de l'air ambiant est nettement inférieur à celui des zones côtières.

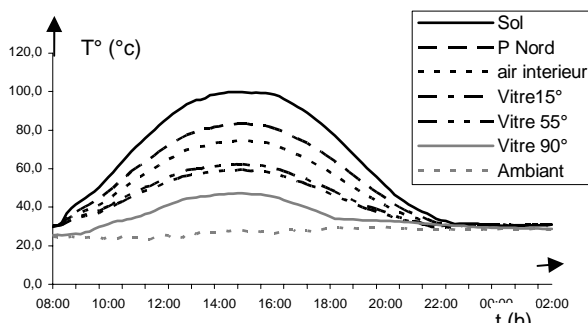


Fig. 5: Variation des températures théoriques (séchoir serre)

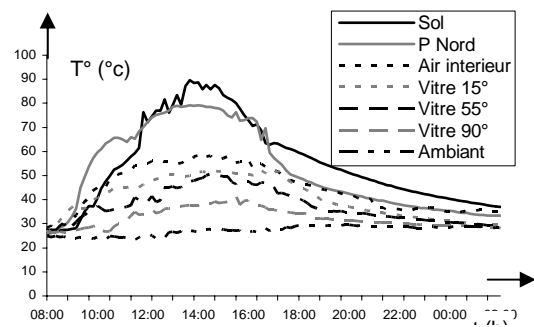


Fig. 6: Relevé des températures expérimentales (séchoir serre)

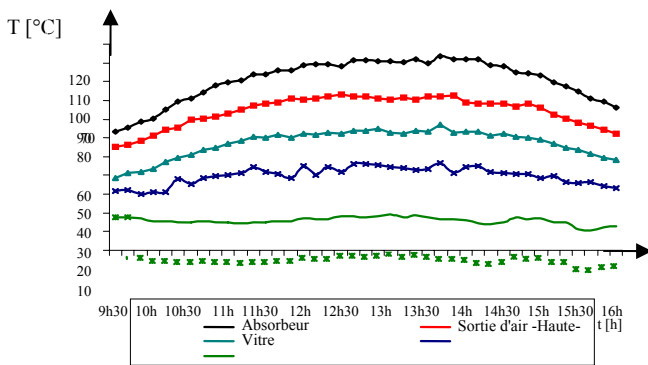


Fig. 7: Relevé des températures expérimentales dans le Capteur à air (séchoir indirect)

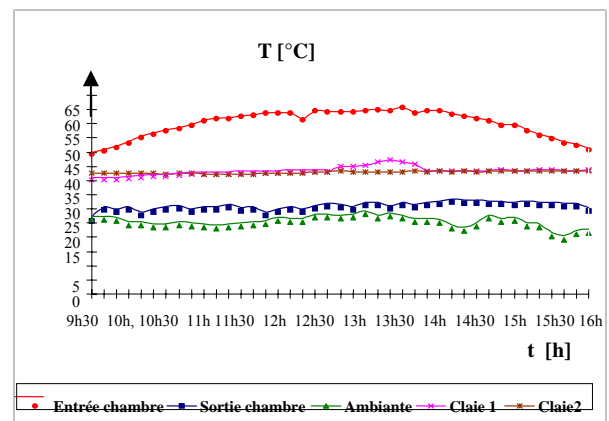


Fig. 8: Relevé des températures expérimentales dans la Chambre de séchage (séchoir indirect)

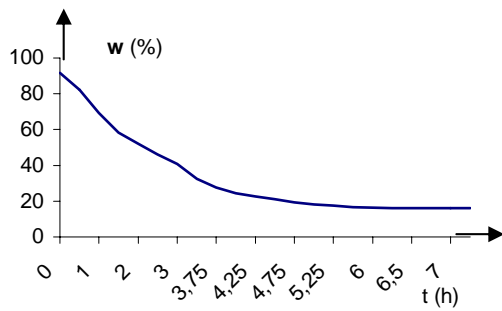


Fig. 10: Variation de l'humidité relative de la menthe

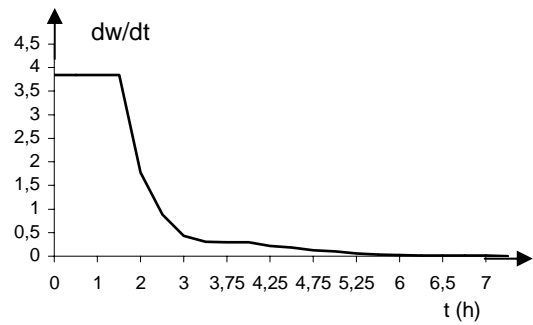


Fig. 13: Vitesse de séchage de la menthe

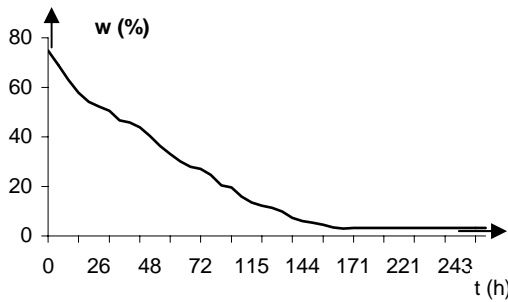


Fig. 11: Variation de l'humidité relative du raisin

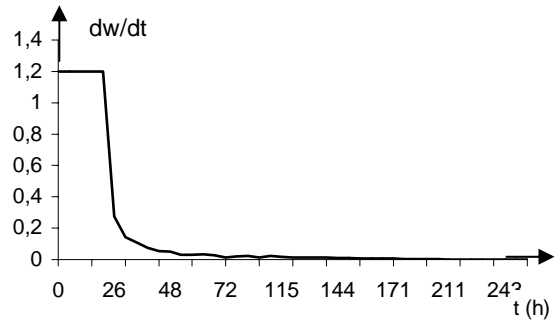


Fig. 14: Vitesse de séchage du raisin

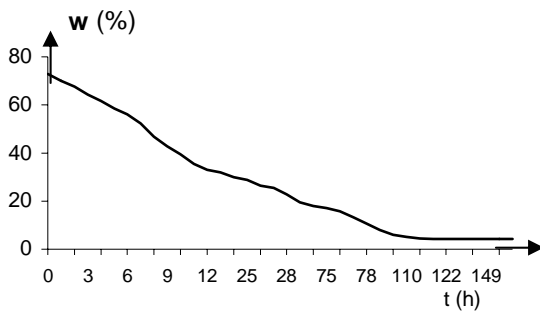


Fig. 12: Variation de l'humidité relative de la banane

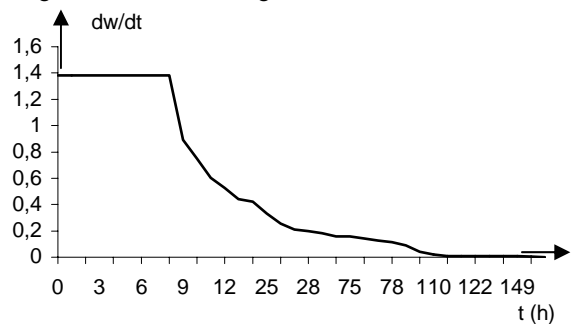


Fig. 15: Vitesse de séchage de la Banane

Tableau I: Pertes de masse et temps de séchage de produits agroalimentaires dans le modèle direct (a)- et indirect (b).

-a-

Produits	Masse Initiale (g)	Masse finale (g)	% d'humidité extraite	Temps de séchage (heures)
Menthe	1000	83	83%	8
Verveine	1000	430	67%	48
Laurier	1000	427	64%	28
Banane	1000	271	73%	144
Raisin	1000	251	75%	268
Prune	1000	277	72,3%	175
Piment	1000	307	70%	72
Figues	1000	205	77,2%	219
Datte	1000	846	15,4%	214

-b-

Produits	Masse initiale [g]	Masse finale [g]	% d'humidité extraite	Temps de séchage [heure]
Menthe	200	40	80	30
Verveine	300	75	75	30
Laurier	300	120	60	28
Piment	300	60	80	243
Raisin	500	150	70	318

[2] **M. Daguene**, «Les séchoirs solaires : Théorie et pratique» UNESCO (1985).

[3] **N.W. Desrosier**, «The technology of food preservation Westport», Connecticut: Avi. Publishing (1963).

[4] «Séchage solaire » (www.fao.org/X00184E/x00184e.htm).

[5] **F.A. Senhadji et al**, «Cinétique de séchage et qualité du produit séché». Science des aliments (1991).

REFERENCES

[1] **R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz**, «Le rayonnement solaire», Lavoisier (1980).