

Etude expérimental d'un nouveau procédé de séchage solaire destiné pour le séchage de la pâte de tomate

D. Mennouche*, A. Khenblouche, A. Boubekri, B. Bouchekima, S. Boughali, M.Lati

Université Kasdi Merbah Ouargla, Laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides et Sahariennes Ouargla 30000, Algeria.

*Corresponding Author: mennouche.dj@univ-ouargla.dz
Tel: +213664709444, Fax: +21329715205

Résumé: Ce travail représente une étude expérimentale de séchage de la pâte de tomate par le procédé de séchage solaire direct à convection naturelle. Pour assurer un séchage continu et améliorer la qualité de produit séché, un système menu d'appoint énergétique à été intégré au séchoir. Ce système présente une combinaison d'un échangeur de chaleur Eau/Air et d'un chauffe-eau solaire. Les résultats ont montré que la durée de séchage d'une couche de la pâte de tomate d'épaisseur 0.5 cm est d'environ 16 h. La variation de température de séchage (période sans appoint) est atteinte des températures comprises entre 39 et 55°C, et de l'ordre de 30 à 37°C pendant la période de fonctionnement avec appoint énergétique

Mot clé : Séchage solaire ; Pâte de tomate ; Echangeur ; Chauffe-eau solaire

I INTRODUCTION

L'énergie solaire présente une source d'énergie renouvelable. Elle est gratuite, inépuisable, non polluante et disponible en abondance dans la plupart des endroits du monde [1-3]. L'utilisation de l'énergie solaire pour des applications thermiques, tel que le chauffage, la distillation de l'eau et le séchage a augmenté en raison des fluctuations du prix des combustibles fossiles et le déséquilibre écologique [4,5].

Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement [6]. Pendant le séchage par cette méthode, des problèmes liés à la contamination et des pertes considérables se produisent en raison de diverses influences telles que les oiseaux, les insectes, les micro-organismes, les poussières, les pluies etc. En plus la qualité des produits alimentaires peuvent être sérieusement dégradées [6-10]. Afin de réduire les pertes et améliorer la qualité des produits séchés, le séchage direct au soleil devrait être remplacé par le séchage en utilisant des séchoirs solaires [11].

La tomate (*Lycopersicon esculentum*) est une source importante de lycopène, ce qui contribue à la prévention de nombreuses maladies chroniques comme le cancer et les maladies cardiovasculaires [12]. Elle contient aussi diverses sources nutritionnelles (vitamines A, C et E, des minéraux et des fibres alimentaires) [13-14].

La teneur en eau de la tomate est très élevée (environ 90%), ce qui favorise sa dégradation à l'état frais et sa détérioration physico-chimique et microbiologique.

La production mondiale de la tomate, selon les données fournies par la FAO pour l'année 2013, est de 123 millions de tonnes, l'Algérie en produit 975075 tonnes.

Le séchage présente un procédé approprié pour minimiser la perte et l'amortissement du caractère saisonnier de la tomate. De nombreuses études ont été rapportées sur le séchage à air chaud de la tomate à des températures différentes [15-16]. Grâce à la teneur en eau très élevée de ce fruit, cette méthode de séchage est considérée comme coûteuse [17-20]. Afin de minimiser le coût du processus de séchage, plusieurs auteurs ont étudié le séchage de la tomate en utilisant des séchoirs solaires [13,18].

Nombreuses études montrent que la tomate peut être séchée en moitiés, en tranches et en quartiers [13,17-18]. Le séchage de la tomate sous forme pâte, en utilisant des différents séchoirs solaires, a été étudié par Mennouche et al. [19-21]. Cependant, aucune étude n'a été trouvée sur le séchage de la pâte tomate, en intégrant un système d'appoint énergétique dans un séchoir solaire direct à convection naturelle.

Le séchage solaire avec appoint présente une technique importante pour assurer un séchage continu de la pâte de tomate et améliorer la qualité du produit séché, en évitant tous les risques des moisissures durant le stockage du produit pendant la nuit (la teneur < 0.13 kg eau/kg m.s). La technique utilisée pour l'appoint énergétique est basée sur l'utilisation d'un échangeur réalisé au laboratoire, alimenté à un chauffe-eau solaire.

L'objectif de ce présent travail est de valoriser un produit agro-alimentaire (la tomate), sous forme pâte, par

l'intégration d'un système d'appoint énergétique dans un séchoir direct à convection naturelle.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Description du système de séchage

Dans cette étude nous avons utilisé un séchoir solaire direct à convection naturelle (figure1) conçu et réalisé par l'équipe de conversion d'énergie du laboratoire LENREZA [22], auquel nous avons intégré un système muni d'appoint énergétique pour le fonctionnement de séchoir pendant la nuit ou les journées nuageuses.

Description de l'installation de l'appoint énergétique

Cette installation est pour but d'assurer la continuité de l'opération de séchage pendant la nuit, ou pendant les journées nuageuses. C'est une combinaison d'un dispositif de chauffe-eau solaire et un échangeur de chaleur Eau/Air. Afin d'assurer un transfert de chaleur (Eau/Air) important, on a réalisé un circuit fermé en utilisant une pompe de type CA-ST8 et de débit de 4,3 l/min. Le circuit de procédé est schématisé sur la figure(2)

a- Le chauffe-eau solaire

Il s'agit d'un chauffe-eau solaire de type monobloc (le capteur plan et le ballon sont assemblés en un seul composant). Où le ballon est placé plus haut que le capteur.

b- L'échangeur de chaleur :

C'est le dispositif qui permet de transférer l'énergie thermique de l'eau vers la claie par conduction et vers l'air de séchage par convection. Il s'agit d'un échangeur de chaleur tubulaire construit à partir d'un tube de cuivre de diamètre (9 mm/10 mm) et de longueur totale de 18 m, les parois extérieures de l'échangeur sont peintes en noir et elles sont considérées comme absorbeur. Cet échangeur est placé sur l'absorbeur dans la chambre de séchage du séchoir solaire, il est lié au chauffe-eau solaire par des tuyaux thermiquement isolés.

L'eau chaude utilisée pendant la nuit a été chauffée grâce à un chauffe-eau solaire monobloc avec un débit bien déterminé qui était 0.47 l/min. la durée du fonctionnement du chauffe-eau solaire était 7 heures.

Fonctionnement du système de séchage :

a. Pendant la journée :

Les rayons solaires frappent directement le produit. L'air frais arrivé de l'extérieur passe par les trous perforés du séchoir solaire, il traverse la surface de la plaque noire, sa température augmente sous l'effet de serre, puis il continue son chemin et

lèche la surface du produit, enfin l'air de séchage chargé par la vapeur d'eau est évacué à l'extérieur à travers la cheminée.

b. Pendant la nuit:

Généralement on fait circuler l'eau chaude à travers l'installation lorsque la température dans la chambre de séchage est inférieure à celle de l'eau chaude qui est stockée dans le ballon.

Au cours de l'écoulement de l'eau chaude dans l'échangeur, un transfert de chaleur se produit à travers les parois de ce dernier, on distingue deux types de transfert thermique :

- Transfert par conduction : entre l'échangeur et la claie de séchage.

- Transfert par convection : entre les tubes de l'échangeur et l'air frais arrivé de l'extérieur par les trous perforés du séchoir solaire, la température de l'air augmente sous l'effet de ce contact, puis elle continue son chemin et lèche la surface du produit, enfin l'air de séchage chargé par la vapeur d'eau est évacué à l'extérieur à travers la cheminée

Préparation du produit

La préparation du produit s'effectue selon les étapes suivantes :

Le lavage de la tomate : Pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations.

L'épluchage et l'enlèvement des graines : Pour assurer une couche de pâte homogène, et faciliter l'opération de séchage.

Le broyage : Le broyage des tomates s'effectue dans un broyeur destiné pour les légumes.

L'égouttage : L'égouttage de la tomate broyée est effectué dans un sac perméable pendant quelques heures.

Mise en place du produit : Une masse de la pâte de tomate égouttée est étalée sur une claie (surface de 1240 cm²) en couche d'épaisseur de 0.5 cm. Enfin le produit est introduit dans la chambre de séchage.

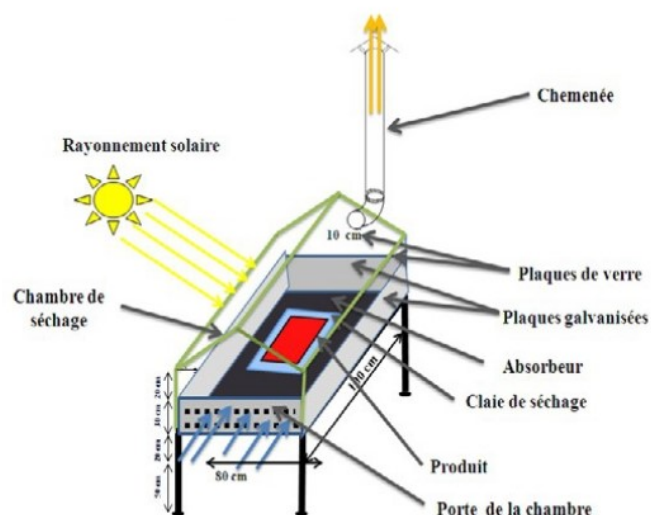


Figure 1 : schéma descriptif du système de séchage

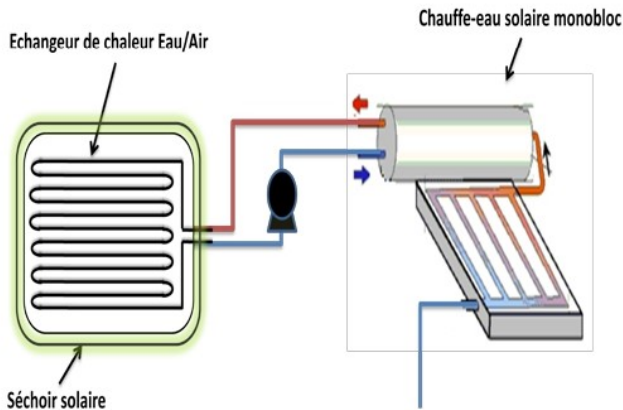


Figure 2: Représentation de l'installation de l'appoint énergétique.

Protocole expérimental

Pour suivre la perte de masse du produit au cours du séchage, nous avons effectué des mesures de poids chaque 30 minutes à l'aide d'une balance de précision 0.01g. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre une teneur en eau finale souhaitée. Les mesures de température du rayonnement solaire de l'humidité relative de l'air sont également effectuées chaque 30 minutes.

Détermination de la masse sèche du produit :

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité (type Sartorius MA 18), selon les étapes suivantes :

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 105°C.
- Introduction d'une masse initiale de la pâte de tomate (3g) dans la chambre de l'analyseur.
- Démarrage de l'analyseur en choisissant le programme convenable de chauffage.
- Arrêt automatique de l'appareil après que la masse de l'échantillon devienne constante.

Mesures effectuées

L'étude expérimentale, entreprise sur ce séchoir, consiste en la mesure systématique de :

- Rayonnement global reçu sur le plan du capteur à l'aide d'un polarimètre (Kipp et Zonen, modèle CMP 3);
- Température (avant et après claie, Produit, absorbeur, ambiant, entrée et sortie séchoir) à l'aide des thermocouples (Type K) reliés à une acquisition de température (Kheitley).
- Humidité relative de l'air (avant et après claie et le milieu externe) à l'aide de deux trois sondes thermo-hygromètre (Testo modèle 645, précision : 1°C, 1%);

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Variation des températures d'entrée et de sortie du capteur solaire:

La figure 3 représente la variation des températures d'entrée et de sortie du capteur solaire pour la période de 10h:00 jusqu'à 17h:00. On remarque que la température de sortie (T_{SCS}) est importante et atteint des valeurs maximales de l'ordre de 48°C entre 12h et 13h, ceci est dû à l'effet du rayonnement solaire qui atteint ses valeurs maximales à cette période. On observe aussi que la température d'entrée (T_{ECS}) varie entre 27°C et 29°C.

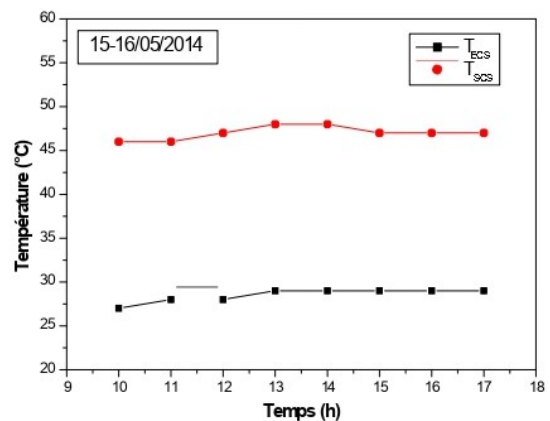


Figure 3 : La variation des températures d'entrée et de sortie du capteur solaire.

Variation du rayonnement global:

La figure 4 permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période de séchage de la pâte de tomate (16 heures). Pendant la journée jusqu'à 20h00, on remarque que la courbe est une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ 844 (W/m^2) à 13:00.

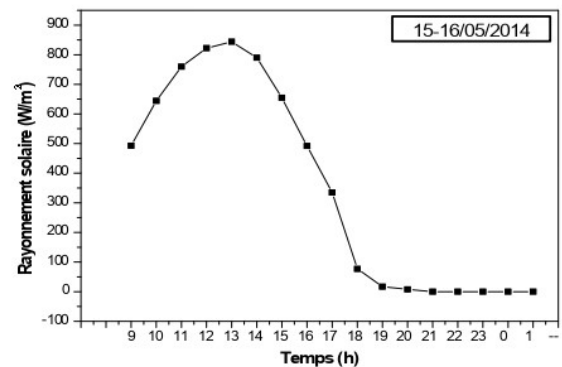


Figure 4: Variation du Rayonnement global en fonction du temps.

Etude de la teneur en eau :

La figure 5 représente la variation de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps. On remarque sur cette figure que la durée de séchage ; pour avoir une teneur en eau finale de 0.13Kg eau/Kg Ms ; est de 16 heures. Nous pouvons voir aussi sur la figure ci-dessus que pendant le fonctionnement du système de séchage sans appoint (à partir de 9h jusqu'à 18h) la teneur en eau présente une diminution importante (de 7,53 jusqu'à 0,40kg eau/kg m_s), ceci est expliqué par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant qui est due à l'effet de la température élevée pendant la journée (l'effet du rayonnement solaire). Pendant le fonctionnement du système de séchage avec appoint (à partir de 18h jusqu'à 1h) la teneur en eau présente une diminution moins importante (de 0,40 jusqu'à 0,13 Kg eau/kg m_s).

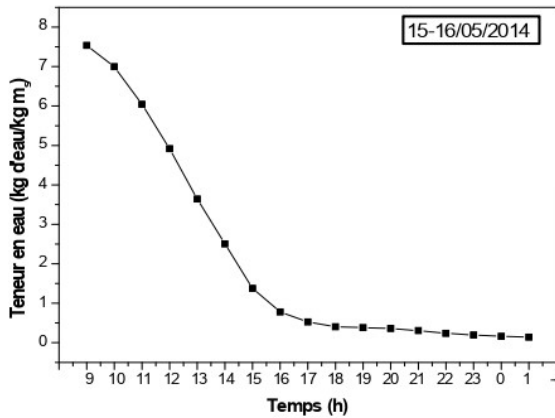


Figure 5 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

Variation des températures :

La figure 6 présente la variation de la température (T_{pr} , T_{abs} , T_{env} , T_{ava} , T_{apr}) en fonction du temps. Nous avons observé que la température de l'air ambiante varie (T_{env}) entre 25 et 34°C pour la journée et entre 25 et 26°C pendant la nuit. La température de l'air augmente lorsque l'air arrive au niveau de la claie de séchage (T_{ava}), et atteint des températures comprises entre 39 et 55°C pour le système sans appoint, et entre 30 et 37,3°C pendant le fonctionnement du système avec appoint. L'augmentation de la température (T_{ava}) pendant la journée est due aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température (T_{abs}) varie entre 39 et 70°C. On observe aussi sur la figure que la température du produit (T_{pr}) atteint des valeurs maximales de l'ordre de 48°C pour la journée (système sans appoint), ceci est expliqué par l'effet direct du rayonnement solaire sur le produit. Concernant la période avec appoint, on remarque que la température du produit varie entre 30°C et 34°C.

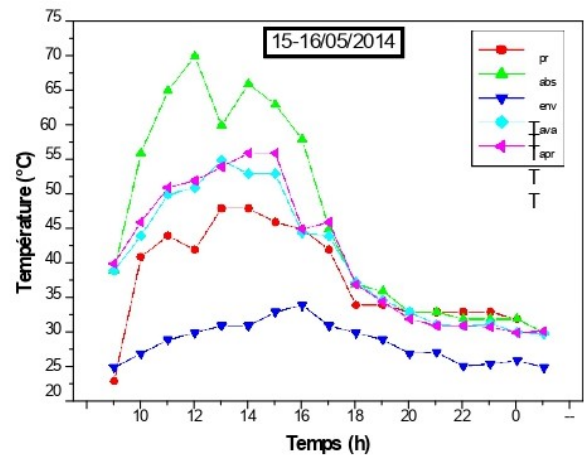


Figure 6 : Variation de la température en fonction du temps

Variations des humidités relatives

La figure 7 présente la variation d'humidité relative de l'air ambiante, avant et après la claie de séchage en fonction du temps. On voit sur cette figure que l'humidité ambiante (Hr_{env}) varie entre 16 et 26,3 % pour la période de séchage. L'avancement de l'air vers la claie de séchage provoque une diminution de son humidité Hr_{ava} , et atteint des valeurs minimales de l'ordre de 24,5%. Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température sous l'effet du rayonnement solaire pendant la journée et de l'effet de l'échangeur pendant la période avec appoint. L'évaporation de l'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse créer une augmentation d'humidité Hr_{apr} (par rapport à Hr_{ava}), et varie dans l'intervalle de 7 à 19,5 % pendant la période de séchage.

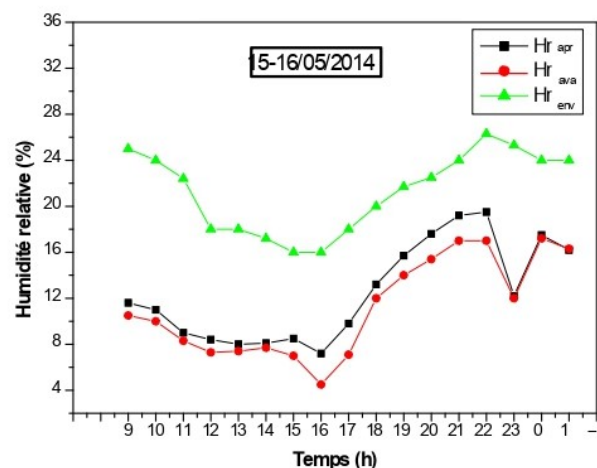


Figure 7 : Variation de l'humidité relative en fonction du temps.

Variation de vitesse de l'air à la sortie de cheminée :

La figure 8 présente la variation de la vitesse de l'air de séchage à la sortie de cheminée en fonction de temps, on remarque sur cette figure que la vitesse de l'air est instable pendant l'opération de séchage et représente des fluctuations de l'ordre de 0,6 à 1,2 m/s.

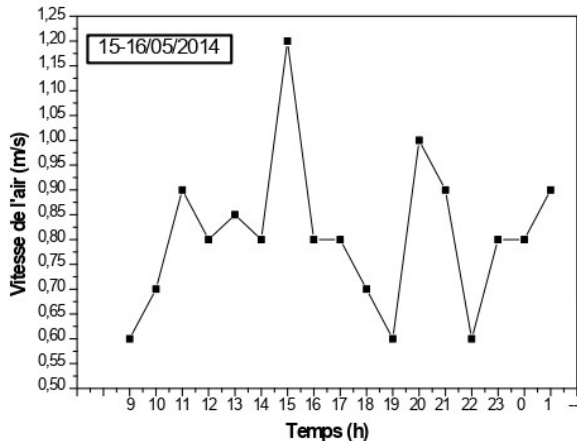


Figure 8 : Variation de la vitesse de l'air à la sortie de cheminée.

Variation de la température de l'eau chaude :

Le débit de circulation de l'eau est 4,3 l/min, c'est le débit maximal atteint par la pompe. La variation de la température de l'eau circulée avant et après l'échangeur de chaleur est représentée dans la figure 9, on remarque sur cette figure que la différence entre la température d'entrée (T_{EEC}) et celle de sortie (T_{SEG}) est de l'ordre de 1°C.

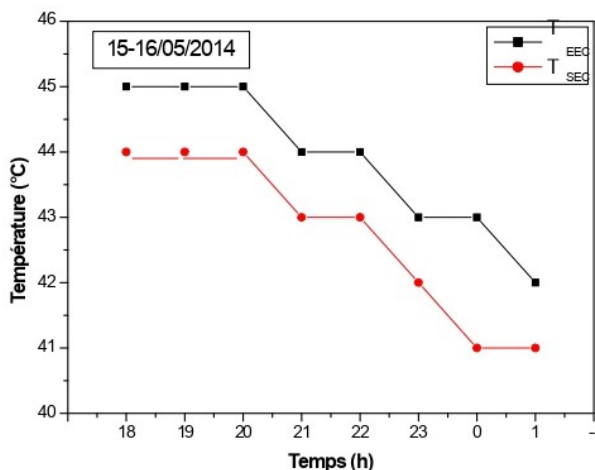


Figure 9: Variation de la température de l'eau circulée avant et après l'échangeur.

IV. CONCLUSION

Le séchage solaire de la pâte de tomate par l'intégration d'un système, muni d'un appoint énergétique, dans un séchoir solaire direct à convection naturelle a été présenté. Ce nouveau procédé de séchage continu ; dans les zones arides ; où le rayonnement solaire est important durant l'année, présente un grand intérêt économique et industriel, il permet de préserver la qualité des produits séchés, assurer un traitement thermique avec un coût énergétique très faible et éviter le stockage de produit pendant la nuit.

RÉFÉRENCES:

- [1] S, Panna Lal, Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer, *Journal of Applied Energy*, 88, 1720-1726, 2011
- [2] A, Sreekumar, P,E, Manikantan, K,P,Vijayakumar, Performance of indirect solar cabinet dryer, *Energy Conversion and Management* 49, 1388-1395, 2008,
- [3] M,A, Basunia, T, Abe, Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection, *Journal of Food Engineering* 47, 295-301, 2001,
- [4] D,R, Pangavhane, R,L, Sawhney, Review of research and development work on solar dryers for grape drying, *Journal of Energy Conversion and Management* 43, 45-61, 2002,
- [5] K, Fudholi, A, Sopian, M,H, Ruslan, M,A, Alghoul, M,Y, Sulaiman, Review of solar dryers for agricultural and marine products, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1-30, 2010,
- [6] S, Lahsasni, M, Kouhila, M, Mahrouz, A, Idlimam, A, Jamali, Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly peel (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Energy* 29, 211-224, 2004,
- [7] J, Prasad, V,K, Vijay, G,N, Tiwari, V,P,S, Sorayan,, Study of performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale, *Journal of Food Engineering* 75, 497-502, 2006
- [8] M, B, Lalit, S, Sanatoch, S,N, Naik, Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2298-2314, 2010,
- [9] M, Aghbashlo, M,H, Kianmehr, A, Arabhosseini, Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer, *Journal of Food Engineering* 91, 99-108, 2009,
- [10] R,K, Goyal, G,N,Tiwari, Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer : A new concept, *Solar energy* 60, 41-48, 1997,
- [11] C, Ertekin, O,Yaldiz, Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering* 63, 349-359, 2004,
- [12] C, Chawla, D, Kaur, D,P,S,Oberoi, D,S, Sogi, Drying characteristics, sorption isotherms, and lycopene retention of tomato pulp, *Drying Technology* 26, 1257,1264, 2008.
- [13] Drying kinetics of tomato slices in vacuum assisted solar and open sun drying methods, *Drying Technology* 25, 1349-1357, 2007,
- [14] J, N, Davies, G, E, Hobson, The constituents of tomato fruit, The influence of environment, nutrition, and genotype, *CRC Crit. Rev. in Food Sci, Nutri* 15, 205-280, 1981,
- [15] I, Doymaz, Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food*.
- [16] P, Lewicki, H, Vu Le, W,Pomarańska-Lazuka, Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes, *Journal of Food Engineering* 54, 141-146, 2002,
- [17] M,N,A Hawlader, M,S, Uddin, J,C, Ho, A,B,W, Teng, Drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering* 14, 259-268, 1991, [18] S, Boughali, H, Benmoussa, B, Bouchekima, D, Mennouche, H, Bouguettaia, D,Bechki, Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara, *Solar Energy* 83(12), 2223-2232, 2009,
- [19] D, Mennouche, B, Bouchekima, A, Boubekri, S, Boughali, H, Bouguettaia, D, Bechki, Etude expérimentale du séchage solaire de la pâte de tomate dans un séchoir direct, Séminaire maghrébin sur les sciences et les technologies de séchage SMSTS 2010 - Marrakech - Maroc,
- [20] D, Mennouche, B, Bouchekima, A, Boubekri, S, Boughali, K, Karoumi, S, Choucha, Valorisation de la pâte de tomate par le procédé de séchage

solaire indirect à convection naturelle, Journées Internationales de Thermique -JITH 2013-Marrakech- Maroc,

[21] D, Mennouche, B, Boucekima, A, Boubekri, S, Boughali, R, Rachdi, S, Chouicha, Valorization de la pâte de tomate par le procédé de séchage solaire indirect à convection forcée, Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies de Séchage SMSTS'2013-îles de Kerkennah au large de Sfax, Tunisie,

[22] D, Mennouche, B, Boucekima, A, Boubekri, S, Boughali, H, Bouguettaia, D, Bechki, Valorization of rehydrated Deglet-Nour dates by an experimental investigation of solar drying processing method, Energy Conversion and Management, 84, 481– 487, 2014