



Etude de l'effet de l'intégration d'une couche MCP sur les performances d'un séchoir solaire direct

Messaoud Sandali^{*1,2}, Abdelghani Boubekri^{1,2}, Said Mansouri¹, Bachir Zengui¹, Belkhir Settou¹ et Djamel Mennouche²

¹Department de Génie Mécanique, Université Kasdi Merbah Ouargla

²Université Kasdi Merbah Ouargla, Laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (LENREZA), Ouargla 30000, Algeria

*sandalimessaoud@gmail.com

Abstract— Ce travail présente une contribution, par le moyen de simulation numérique, à l'amélioration des performances thermiques du séchoir solaire direct par la prolongation de la durée de fonctionnement journalière. La présente étude a porté sur la simulation d'un séchoir solaire direct sans et avec intégration d'une couche plate d'un matériau à changement de phase, dans l'objectif de stocker partiellement l'énergie thermique par chaleur latente. Plusieurs calculs ont été menés, moyennant la méthode des volumes finis utilisant un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent. Les résultats obtenus dans cette étude, dans le cas d'absence de MCP, ont montré la fiabilité de notre modèle de simulation adopté par comparaison avec les résultats de l'expérience. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. Pendant les heures non ensoleillées, le MCP à l'état liquide fournira la chaleur à l'absorbeur ; c'est la chaleur utile du fluide caloporteur en circulation. Par conséquent, Le fluide caloporteur fournit encore de la chaleur après le coucher de soleil. Le MCP se comporte comme une source de chaleur. En effet parmi les épaisseurs testées, la valeur de 4cm donnait un meilleur apport thermique pour quatre heures après le coucher de soleil, tandis que le MCP à température de fusion à 326.5K se montrait meilleur parmi les autres matériaux testés. L'étude a aussi montré que l'utilisation de MCP n'est pas efficace dans les jours à faible rayonnement solaire.

Keywords— Stockage d'énergie, Chaleur latente, Matériaux à changement de phase, MCP, Séchoir solaire direct, Energie solaire.

I. INTRODUCTION

L'énergie est l'élément principal des sociétés civilisées, un moyen dont tous les secteurs technologiques, industriels et sociaux a besoin, car ils sont nombreux et variés, notamment l'énergie solaire, l'énergie thermique et l'électricité.

L'énergie qui nous vient du soleil est l'une des énergies les plus importantes sur laquelle l'homme dépend de sa vie quotidienne pour l'exploiter comme source. C'est une énergie permanente et ne produit pas de gaz nocifs pour l'environnement par rapport aux autres énergies. L'énergie

solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [1-2]. Le séchage solaire est l'un des processus les plus importantes dans la production agricole [3-4-5]. Il a été utilisé depuis les temps immémoriaux pour préserver les produits agroalimentaires [6-7].

Plusieurs travaux ont été effectués pour améliorer les performances thermiques des séchoirs solaires, le matériau à changement de phase a été placé dans une unité de stockage pour stocker l'énergie solaire et de l'utiliser après le coucher de soleil. Il a été trouvé qu'avec l'utilisation des MCP, la température de l'air de séchage est plus élevée que la température ambiante avec 2.5-7.5°C après le coucher de soleil pour cinq heures [8-9]. S.M. Shalaby et al, ont fait une étude bibliographique sur les systèmes de séchage solaire lesquelles ont utilisé les matériaux à changement de phase comme un milieu de stockage solaire. Les résultats obtenus montrent que le PCM permet de diminuer les pertes thermiques et par conséquent l'amélioration des performances thermiques [10]. Lalit M. Ball et al, ont présenté une étude des séchoirs solaire avec systèmes de stockage d'énergie thermique destinés pour le séchage des produits agroalimentaire. Les résultats montrent que l'utilisation de ces systèmes de stockage, les produits agroalimentaires peuvent être sécher après le coucher de soleil, tandis que l'opération de séchage n'est pas possible après le coucher de soleil dans le cas des séchoirs solaire sans appoint de chaleur. En conséquences, séchoirs solaire avec unité de stockage est très



bienfaisant pour l'humain et pour la conversion d'énergie [11-12]. Alejandro Reyes et al, ont étudié la réhydrations des champignons par l'utilisation d'un séchoir solaire hybride avec MCP. Ils ont trouvé que l'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer la consommation de l'énergie électrique, le MCP incorporés mené à l'amélioration de l'efficacité thermique du système. Cette dernière peut être augmentée par l'augmentation de la masse de MCP utilisé [13-14].

Dans ce travail, une étude numérique dans le but d'évaluer les performances thermiques d'un séchoir solaire direct, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase a été fait. Les calculs de simulation ont été conduits moyennant la méthode des volumes finis mise en œuvre sur le code de calcul CFD "Fluent" et utilisant un modèle en régime instationnaire permettant d'approcher au mieux le cas réel. A cet effet le MCP, avec différentes propriétés thermo-physiques, a été placé en-dessous de la plaque absorbante pour stocker l'énergie solaire afin de l'utiliser dans les heures peu ou non ensoleillées.

II. MODELES ET APPROXIMATION

A. Modèle physique

La géométrie du problème considéré est présentée dans la Fig. 1. Il s'agit d'un séchoir solaire direct avec intégration d'une couche de matériaux à changement de phase (MCP) au dessous de la plaque absorbante. Ce prototype a été réalisé au niveau de laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zone arides (LENREZA, université d'Ouargla, Algérie),

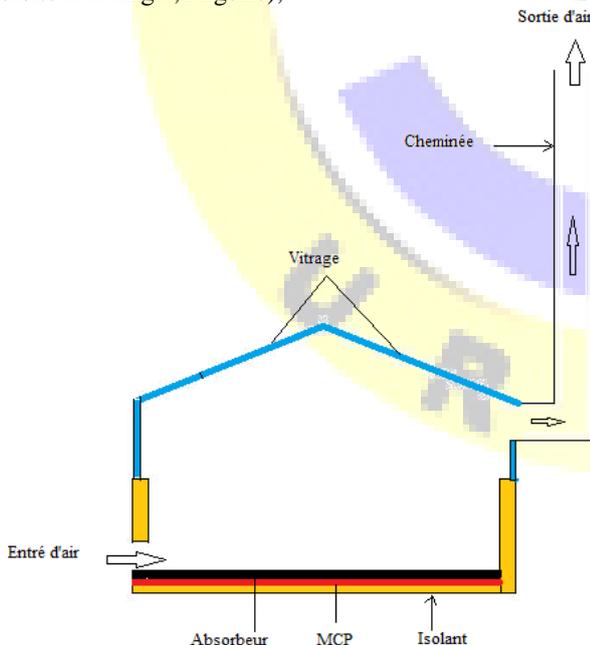


Fig. 1 Schéma du séchoir solaire direct avec MCP.

B. Modèle d'écoulement

Les équations de la conservation suivantes décrivent le transfert thermo-convectif forcé à l'intérieur du séchoir solaire sont :

Dans l'air :

1) de la masse:

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \quad (1)$$

2) de la quantité de mouvement selon x et selon y :

$$(\partial(\rho u)) / \partial t + \text{div}(\rho U u) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \partial P / \partial x \quad (2)$$

$$(\partial(\rho v)) / \partial t + \text{div}(\rho U v) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} v) - \partial P / \partial y \quad (3)$$

3) de l'énergie:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$U = (u, v)$ représente le vecteur vitesse, ρ la densité, P la pression, μ la viscosité dynamique du fluide.

TABLE I
PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE
UTILISENT DANS LA SIMULATION NUMERIQUE

MCP	Les propriétés Thermo-physiques				
	Température de fusion [K]	Chaleur Latente [KJ/Kg]	Masse volumique [Kg/m3]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur spécifique [j/kg.K]
Paraffine	309.7	247	778	0.15	2210
Paraffine	30	244	774	0.15	2160
Paraffine	326,5	266	780	0.21	2500
Paraffine	307	150	1850	0.47	2350

I. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Evolution de l'intensité solaire en fonction du temps

Figure. 2 présente la variation de la l'intensité solaire en fonction du temps pour une journée bien éclairée. Cette



variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante [15]:

$$G_{sun}(\tau) = \hat{G}_{sun} \sin\left(\frac{\tau-a}{b-a} \pi\right), \quad a < \tau < b \quad (5)$$

G_{sun} : L'irradiation solaire maximale = 995 w/m2

τ : Le temps en heure, $a < \tau < b$

a : Heure de lever de soleil : 06h20

b : Heure de coucher de soleil : 19h00

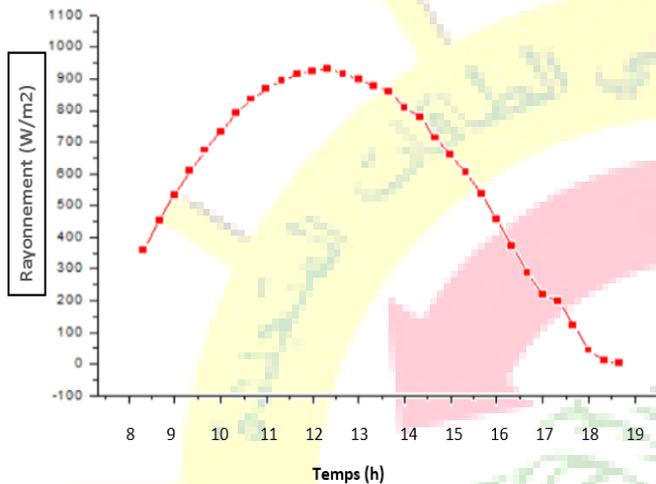


Fig.2 Variation de l'intensité solaire en fonction du temps.

B. Evolution de la température ambiante en fonction du temps

Figure. 3 présente la variation de la température ambiante en fonction du temps pour une journée bien éclairée. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante [15]:

$$T_{ao}(\tau) = \bar{T}_{ao} + \bar{T}_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 13)\right) \quad (6)$$

\bar{T}_{ao} : température ambiante moyenne

\bar{T}_{ar} : amplitude de température

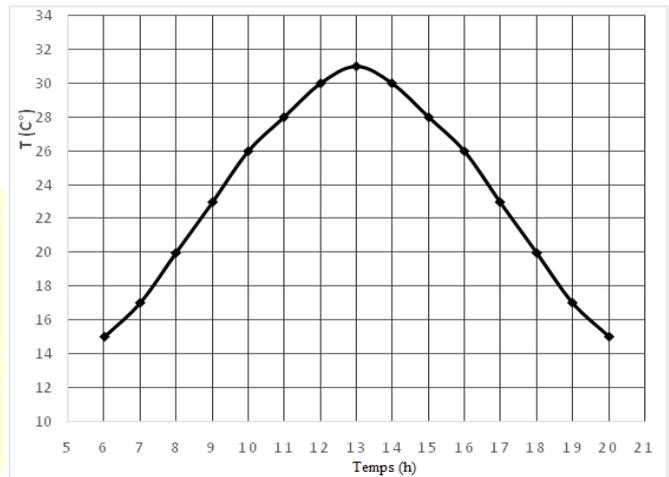


Fig.3 Variation de la température ambiante en fonction du temps

C. Comparaison entre les résultats de simulation et de l'expérimentale

Afin de permettre une comparaison logique nous avons procédé à un essai de simulation permettant de relever à chaque fois la valeur ponctuelle de la température de l'air au milieu du séchoir solaire. Cette valeur pour des intervalles de temps réguliers a été comparée à la valeur mesurée expérimentalement pour les mêmes intervalles de temps. L'ensemble de ces valeurs simulées et calculées sont présentées sur la Fig. 4. Il est clair, tenant compte du phénomène étudié, que les valeurs calculées et mesurées sont en bonne cohérence avec un écart maximal de presque 5°C. Cet écart observé peut être expliqué par la différence entre les conditions climatiques réelles (fluctuations du rayonnement solaire et de la vitesse du vent dans la journée) et celles utilisées par le logiciel de calcul, basées sur une évolution typique régulière.

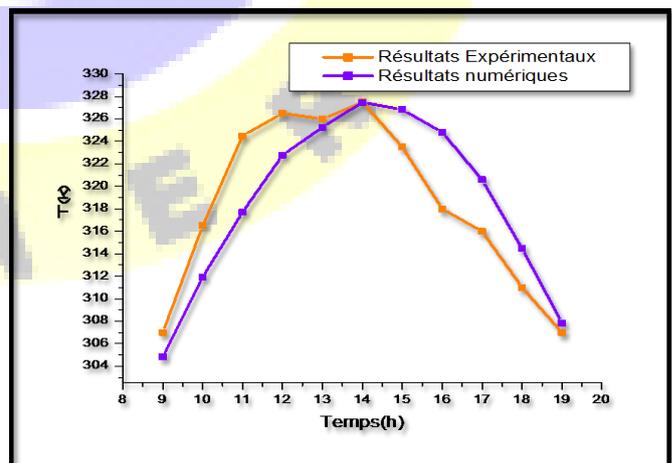


Fig. 4 Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire



Figure. 5 montre la distribution de la température dans le séchoir solaire direct sans intégration de MCP. Après le lever de soleil, à 09h00, le rayonnement solaire n'est pas encore plus élevé et l'absorbeur se commence à échauffer l'air circulant à l'intérieur du séchoir solaire où on remarque que le composant le plus chaud c'est bien l'absorbeur grâce à son grand coefficient d'absorption. L'absence de l'homogénéité à l'intérieur du séchoir solaire est dû au transfert thermique avec l'extérieur d'un côté, et d'un autre côté par ce que la température de l'absorbeur est encore très faible (325K) ce que influe sur le bon échauffement de l'air circulant.

À 12h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire est presque homogène surtout dans la chambre de séchage ce qui des bonnes résultats de séchage. On remarque aussi que la température de l'air de séchage atteint une valeur plus élevée et acceptable (324K) pour effectuer une opération de séchage.

À 17h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire est resté toujours homogène mais elle est un peu faible (315K) à cause de la diminution du rayonnement solaire. Le composant le plus chaud reste toujours l'absorbeur.

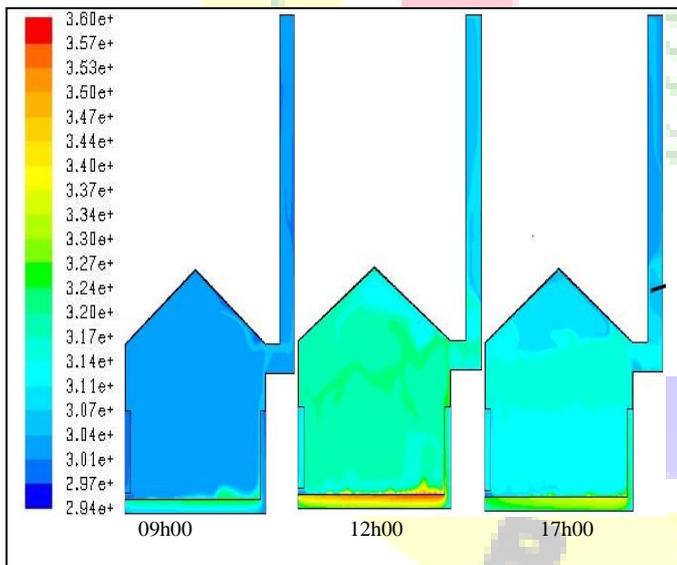


Fig. 5 Distribution de température dans le séchoir solaire directe sans MCP.

Dans la Fig. 6, à 09h00, on remarque que la température de l'air à l'intérieur de séchoir est entraine de s'élevée sous l'effet du rayonnement solaire. Avec le passage du temps et à 12h00, le rayonnement solaire devient plus élevé se qui permet d'augmenter la température de l'air et de générer une homogénéité à l'intérieur du séchoir solaire. On remarque aussi que la température de la couche MCP est plus élevée par comparaison avec celle à 09h00. Après le coucher de soleil, à

19h00, on remarque que la température de MCP la plus grande par rapport au autres composantes du séchoir se qui permet d'alimenter le séchoir par la chaleur et de chauffer l'air circulant. La température de l'air de séchage reste encore homogène et qu'elle est suffisante pour continue l'opération de séchage grâce l'effet de MCP. Pendant les heures non ensoleillée, le MCP à l'état liquide fournira la chaleur à l'absorbeur ; c'est la chaleur utile du fluide caloporteur en circulation. Par conséquent, Le fluide caloporteur fournit encore de la chaleur après le coucher de soleil. Le MCP se comporte comme une source de chaleur.

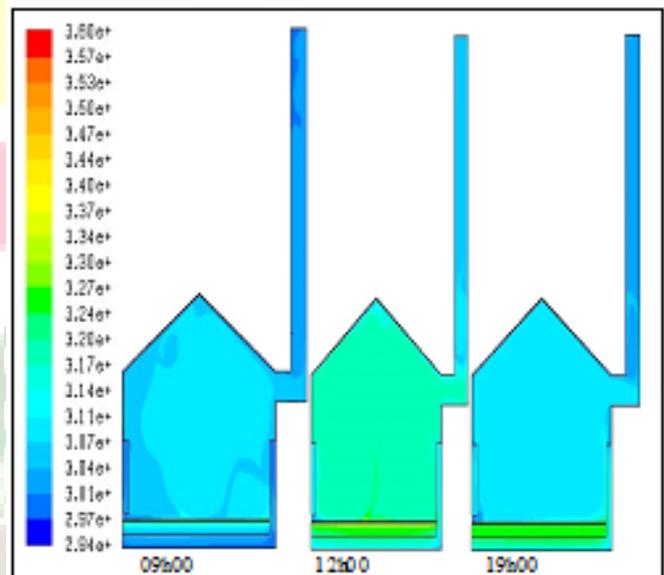


Fig. 6 Distribution de température dans le séchoir solaire directe avec MCP.

D. Effet de l'épaisseur de la couche MCP

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de la couche MCP, nous avons intégré différentes épaisseurs de la couche MCP au-dessous de la plaque absorbante dans le séchoir solaire direct. Le MCP utilisé dans ce cas c'est l'un avec la température de fusion 326.5K. Les épaisseurs utilisées dans ce cas sont 2cm, 4cm et 6cm. Dans le but d'étudier l'influence des quantités des MCP, les résultats obtenus sont comparées en référence au cas du séchoir solaire sans MCP. Pour cela nous avons choisi de tracer les courbes de température de la plaque absorbante en fonction du temps pour différentes épaisseurs.

La figure.7 représente la variation de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de temps, on remarque que la courbe subit une réfraction quand la température de l'absorbeur approche à la température de fusion de MCP (326.5 K). On remarque aussi qu'il y a un faible déphasage, notamment au point du moment de pic, entre les courbes



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018



quand on augmente l'épaisseur du MCP. La différence de température maximale de l'absorbeur entre la courbe de MCP et sans MCP augmente quand on augmente l'épaisseur du MCP. Il est très clair qu'à partir de 19h (coucher du soleil), les températures obtenues pour les différentes épaisseurs du MCP sont plus que celle du cas du séchoir sans MCP. On peut citer, à titre indicatif, qu'à 24h00 on observe un écart de température de 23°C entre le cas du séchoir sans MCP et le cas de 4 cm de l'épaisseur de MCP. La meilleure épaisseur de MCP qui donne le meilleur résultat c'est bien l'épaisseur de 4cm, il permet de garder la température de l'absorbeur plus élevée après le coucher de soleil environ de 316K à 24h00 et plus que celle de cas du séchoir sans MCP par 23°C se qui permet de prolonger le temps fonctionnement du séchoir solaire par plus de 4 heures après le coucher de soleil.

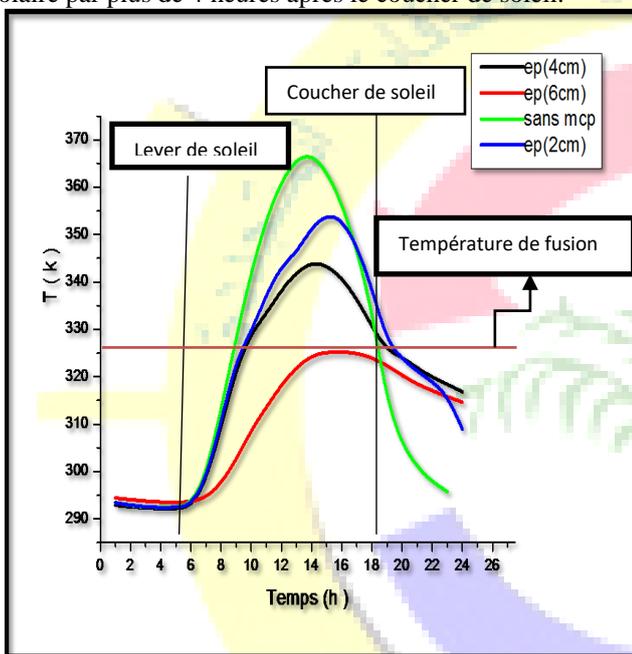


Fig.7 Evolution de la température de l'absorbeur du séchoir solaire direct avec différentes épaisseurs de MCP.

Figure. 8 montre l'évolution de la température de l'air de séchage au milieu du séchoir solaire direct avec intégration des différentes épaisseurs de MCP. On remarque que la température de l'air de séchage dans le cas du séchoir solaire sans MCP atteint la valeur maximale (327°C) à 14h00, puis elle se commence à diminuer avec le passage du temps jusqu'à devient égale à la température ambiante par le coucher de soleil. Dans le cas du séchoir solaire sans MCP, le processus de séchage s'arrête directement avec le coucher de soleil et le séchoir ne fonctionne plus.

Avec l'intégration des différentes épaisseurs de MCP, on remarque qu'avant le coucher de soleil, la température de l'air

de séchage et moins que celle du séchoir sans MCP, cette diminution est traduite par l'influence de l'addition de MCP au dessous de l'absorbeur. Le transfert conductif entre le MCP et l'absorbeur mené à la diminution de la température de l'absorbeur ce qui amené de diminuer la température de l'air avant le coucher de soleil.

Après le coucher de soleil, on remarque que la température de l'air de séchage dans le cas du séchoir avec MCP est élevée que celle dans le cas du séchoir sans MCP grâce à l'intégration du MCP au-dessous de la plaque absorbante. Le MCP stocke de la chaleur pendant les heures bien ensoleillées pour la fournir encore après le coucher de soleil. Le PCM se comporte comme une source de chaleur. En prend à titre d'exemple, à 22h00, la température de l'air de séchage dans le cas sans MCP est de l'ordre de 294K, et elle est 305K dans le cas du séchoir avec 4cm d'épaisseur de MCP. L'intégration d'une couche d'épaisseur 4cm de MCP permet d'augmenter la température de l'air de séchage par 11°C après le coucher de soleil.

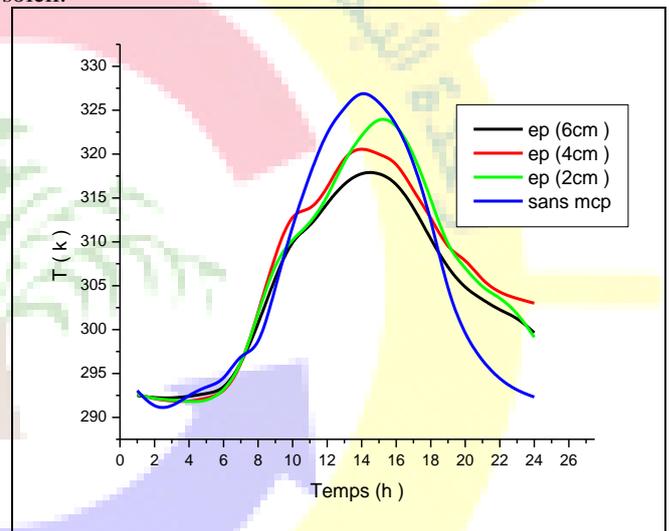


Fig.8 Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire direct avec différentes épaisseurs de MCP.

Dans l'objectif de vérifier le comportement du MCP en stockage et déstockage nous avons présenté sur la Fig. 9, la fraction liquide de MCP en fonction du temps pour différentes épaisseurs. On remarque que la fusion de MCP commence à 09h00 et la solidification à 18h00. Cette figure montre que la réfraction des courbes précédentes est dû à l'influence de changement de phase de MCP. Nous remarquons aussi, que pour toutes les épaisseurs étudiées, la totalité du volume du MCP participe au changement de phase dans ses deux directions ce qui indique que le maximum possible de chaleur a été extrait.

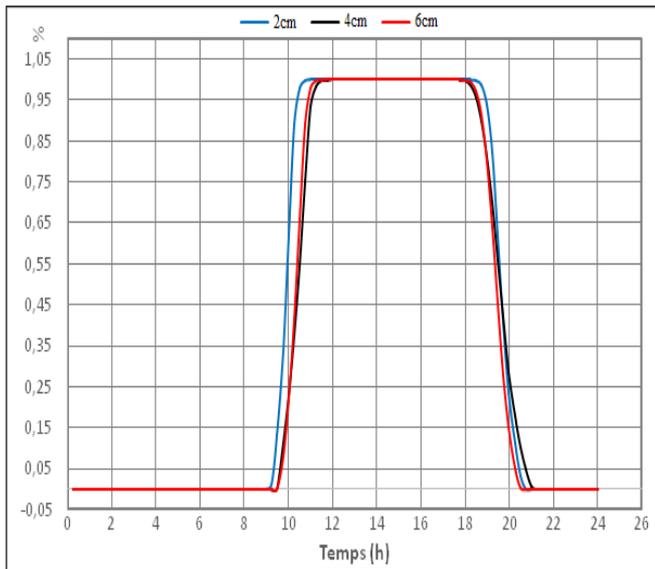


Fig.9 Fraction liquide du MCP en fonction de temps

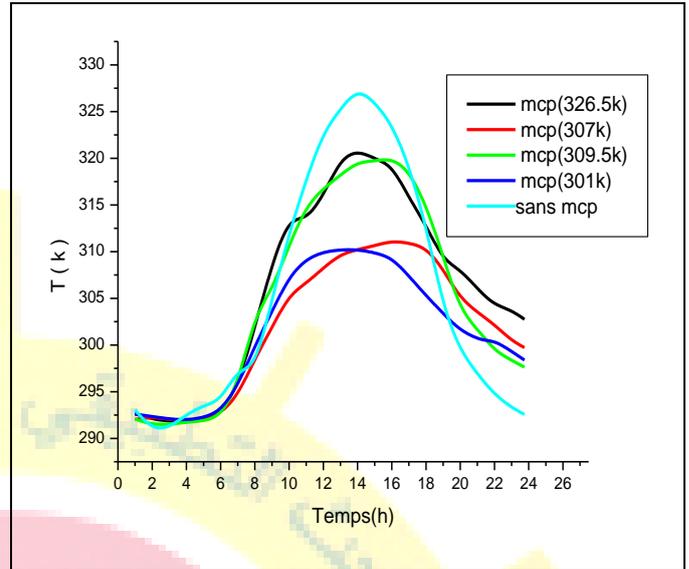


Fig. 10 Evolution de la température de l'air au milieu du séchoir solaire en fonction de temps pour différents types de MCP.

E. Effet de la nature du matériau à changement de phase

Dans la Fig. 10, on remarque que les courbes subissent des réfractations dans des températures différentes correspondant la température de fusion de chaque MCP, l'absorbeur est en contact direct avec le MCP donc pendant le temps de changement de phase l'absorbeur va donner une quantité d'énergie obtenue par rayonnement aux MCP qui utilisent cette dernière pour changer leurs phases. On remarque aussi que le déphasage, notamment au point du moment de pic, augmente quand on intègre des MCP avec des températures de fusion faibles, par contre il diminue quand on intègre des MCP avec une chaleur latente de fusion plus forte. Le meilleur MCP c'est l'un qui donne la plus grande valeur de température de l'air après le coucher de soleil. Dans notre cas, on remarque la plus grande température obtenue après le coucher de soleil est trouvée dans le cas de MCP avec la température de fusion 326.5K. On constate que le choix de meilleur MCP est dépend fondamentalement des deux paramètres suivants : la température de fusion et la chaleur latente du matériau. Le meilleur MCP c'est l'un qui a une grande chaleur latent avec prendre en considération sa température de fusion.

III. CONCLUSIONS

Ce travail concerne la contribution à l'étude d'amélioration des performances thermiques des séchoirs solaires particulièrement dans la période après le coucher de soleil. La présente étude a porté sur la simulation numérique du séchoir solaire direct sans et avec intégration d'une couche plate d'un matériau à changement de phase dans l'objectif de stocker partiellement l'énergie thermique par chaleur latent.

Les résultats obtenus dans cette étude, dans le cas d'absence de MCP, ont montré la fiabilité de notre modèle de simulation adopté par comparaison avec les résultats de l'expérience. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. Pendant les heures non ensoleillées, le MCP à l'état liquide fournira la chaleur à l'absorbeur ; c'est la chaleur utile du fluide caloporteur en circulation. Par conséquent, le fluide caloporteur fournit encore de la chaleur après le coucher de soleil et le MCP se comporte comme une source de chaleur. En effet parmi les épaisseurs testées, celui de 4cm donnait un meilleur apport thermique pour quatre heures après le coucher de soleil, tandis que le MCP à température de fusion à 326.5K se montrait meilleur parmi les autres matériaux testés. L'utilisation de MCP n'est pas efficace dans les jours à faible rayonnement solaire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs veulent remercier le laboratoire de LENREZA concernant les moyens fournis pour effectuer ce travail.



Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 5th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2018



REFERENCES

- [1] W. Muhlbauer, A. Esper, and J. Muller, "Solar energy in agriculture," In: Proceedings of ISES solar world congress, Budapest, pp.7–23, 1993
- [2] A. G. M. B. Mustayen, S. Mekhilef, and R. Saidur. "Performance study of different solar dryers: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34(2014) 463–470.
- [3] S. Chouicha, A. Boubekri, D. Mennouche, H. Bouguetaia, M. H. Berrbeuh., S. Bouhafis, and W. Rezzoug, "Valorization Study of Treated Deglet-Nour Dates By Solar Drying Using Three Different Solar Driers." *Energy Procedia* 50 (2014) 907 – 916.
- [4] A. Fudholi, K. Sopian, B. Bakhtyar, M. Gabbasa, M. Y. Othman, and M. H. Ruslan, "Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51(2015)1191–1204.
- [5] S. Chouicha, A. Boubekri, D. Mennouche, and M. H. Berrbeuh, "Solar drying of sliced potatoes. An experimental investigation." *Energy Procedia* 36 (2013) 1276 – 1285.
- [6] O. Prakash, and A. Kumar. "Solar greenhouse drying: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 905–910.
- [7] R. Lopez, M. Vaca, H. Terres, A. Lizardi, J. Morales, J. Flores, A. Lara and S. Chávez. "Kinetics modeling of the drying of chickpea (*Cicer arietinum*) with solar energy." *Energy Procedia* 57 (2014) 1447 – 1454.
- [8] S. M. Shalaby, M. A. Bek. "Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium." *Energy Conversion and Management* 83 (2014) 1–8.
- [9] D. Jain, and P. Tewari. "Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage." *Renewable Energy* 80 (2015) 244-250.
- [10] S. M. Shalaby, M. A. Bek, and A. A. El-Sebaei. "Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33(2014)110–116.
- [11] L. M. Bal, S. Satya, and S. N. Naik. "Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2298–2314.
- [12] L. M. Bal, S. Satya, S. N. Naik, and V. Meda. "Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 876–880.
- [13] A. Reyes, A. Mahn, and F. Vsquez. "Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change Material." *Energy Conversion and Management* 83 (2014) 241–248.
- [14] A. Agarwal, and R.M. Sarviya. " An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19 (2016) 619-631.
- [15] W. Chen and W. Liu, "Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber," *Applied Thermal Engineering*, vol 28, 2008, pp 1251–1258.