



Étude expérimentale de la performance d'un capteur solaire plan à air avec MCP

Aymen EL KHADRAOUI*, Salwa BOUADILA, Sami KOOLI, Abdelhamid FARHAT, Amenallah GUIZANI,

Laboratoire des Procédés Thermiques, Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie, B.P.95
Hammam-Lif, 2050 Tunisie
elkhadraoui1987@gmail.com

Résumé : Le présent travail est une étude comparative entre un nouveau capteur solaire à air avec stockage thermique latent (CS_{STL}) et un capteur solaire à air classique (CS_C) (capteur témoin). Une cavité métallique pleine de paraffine (MCP) est utilisée comme unité de stockage thermique. Les deux capteurs solaires à air sont réalisés et testés dans le centre de recherche et des technologies de l'Énergie (CRTE) de Borj Cedria (nord de la Tunisie) : Latitude $36^{\circ}43'N$ and Longitude $10^{\circ}25'E$. Les résultats expérimentaux montrent que la présence d'une unité de stockage thermique permet de maintenir la température à la sortie de capteur CS_{STL} plus élevée que la température de sortie de capteur CS_C durant tout la nuit avec un écart moyen de $5^{\circ}C$. Le rendement énergétique journalier de capteur solaire à air avec stockage thermique latent est d'environ 42,5 %.

Mots clés : Stockage thermique latent, Capteur solaire, MCP, Rendement énergétique.

1. Introduction

Les capteurs solaires à air présentent plusieurs avantages par rapport au capteur à eau. L'utilisation directe de l'air pour le chauffage permet de faire des économies d'énergie. Le principal inconvénient de ces capteurs vient de leurs faibles inerties.

Plusieurs travaux de recherches sont menés sur la performance des capteurs solaires à air. L'amélioration des performances de ces capteurs solaires peut être réalisée en augmentant leurs faibles inerties thermiques par l'intégration d'unités de stockage de l'énergie solaire. Ainsi, un certain nombre de travaux ont été faits sur les capteurs solaires à air avec stockage thermique avec le but d'améliorer leur efficacité. La performance d'un capteur solaire à air, avec simple vitrage, en convection naturelle avec une unité de stockage latent a été évaluée par Enibe (2002 et 2003) [1, 2]. Le MCP est arrangé dans des modules placés à des distances équidistantes de l'absorbeur. Une étude théorique et expérimentale a été menée par Summers et al. (2012) [3] sur un capteur solaire avec un système de stockage intégré sous l'absorbeur (paraffine dont la température de fusion est $58^{\circ}C$). Bouadila et al. (2013) [4], ont développé un nouveau capteur solaire à air avec MCP. L'énergie solaire est stockée dans l'absorbeur formé par un ensemble des nodules.

Le présent travail porte sur l'étude thermique d'un nouveau capteur solaire à air avec présence d'une source de stockage thermique latent.

2. Matériel et méthode

Les deux capteurs solaires (CS_C et CS_{STL}) sont réalisés et installés au Laboratoire des Procédés Thermique (LPT) du centre de Recherche et des Technologies de l'Énergie (CRTE) de Borj Cedria, Tunisie. La Figure 1 montre une photo réelle du dispositif expérimental.

Le capteur sans MCP (CS_C) : c'est un capteur solaire classique est un capteur plan à air à simple circulation et à simple vitrage. Les dimensions de ce capteur sont $2,04\text{ m} \times 1,04\text{ m} \times 0,1\text{ m}$. Il est constitué d'un absorbeur en aluminium d'épaisseur $0,002\text{ m}$ peint en noir. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre d'épaisseur $0,004\text{ m}$. Les côtés latéraux et les parties inférieures sont isolées thermiquement avec le polyuréthane ($0,04\text{ m}$). L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur ($0,4\text{ m}$ épaisseur de la lame d'air).

- Le capteur avec MCP (CS_{STL}) : c'est un capteur solaire à air avec stockage thermique latent ($2,04\text{ m} \times 1,04\text{ m} \times 0,16$). Il est constitué, d'un isolant, d'une cavité métallique pleine de paraffine ($1,9\text{ m} \times 0,9\text{ m} \times 0,06\text{ m}$) et d'une

couverture transparente. La partie supérieure de la cavité avec MCP, peinte en noir joue le rôle d'un absorbeur. Les caractéristiques thermo-physiques du MCP utilisé sont données par le Tableau 1.

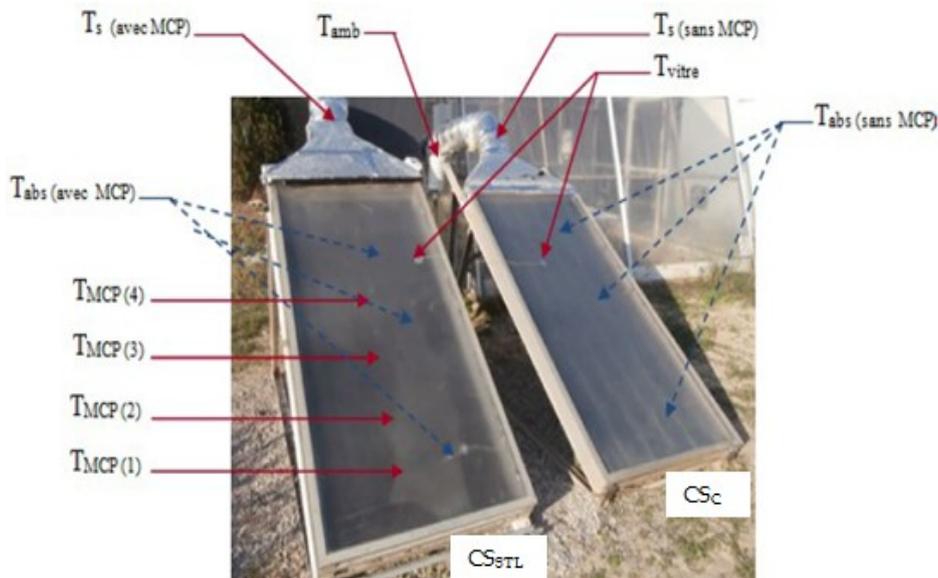


Figure 1 : Dispositif expérimental avec emplacement des thermocouples.

Afin de déterminer les performances du capteur solaire CS_{STL} , une première campagne de mesure a été effectuée pendant le mois d'Aout 2015. L'étude expérimentale du capteur solaire CS_{STL} est caractérisée par deux phases :

- une phase de charge qui s'étale de 6 h du matin à 18 h. Au cours de cette période les ouvertures d'admission et d'extraction de l'air sont fermées alors que le capteur reçoit l'ensoleillement et stocke de l'énergie.
- une phase de décharge qui commence à 18 h. Après chaque phase de fonctionnement diurne (fusion du MCP), on mit en marche le ventilateur et on ouvre les ouvertures d'admission et d'extraction de l'air afin d'extraire l'énergie déjà stockée (phase de charge).

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques du MCP (Paraffine).

Matériaux	Température de fusion ($^{\circ}C$)	Chaleur latente ($kJ.kg^{-1}$)	Conductivité thermique ($W/m^{\circ}C$)	Chaleur spécifique ($kJ/kg^{\circ}C$)		Masse volumique (kg/m^3)	
				liquide	solide	liquide	solide
MCP	56	189	0,21	3,89	2,94	775	850

3. Étude thermodynamique : Bilans Énergétique

Le bilan énergétique pendant la phase de charge et la phase de décharge est [5] :

$$Q_a = Q_u + Q_{st} + Q_{pert} \quad (1)$$

Où, Q_a , Q_u , Q_{st} , Q_{pert} sont la puissance solaire absorbée (W), puissance utile (W), puissance stockée (W), et la puissance correspondant aux pertes thermiques (W), respectivement.

La puissance absorbée est formulée comme suit :

$$Q_a = A_{abs} \alpha_{abs} \tau_{cov} I_T \quad (2)$$

Où A_{abs} , I_T , α_{abs} , τ_{cov} sont la surface de l'absorbeur (m^2), radiation solaire totale (W/m^2), coefficient d'absorption de l'absorbeur et la valeur de coefficient de transmission de la vitre, respectivement.

La puissance utile est exprimée par :

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (3)$$

Où \dot{m} , C_p , T_e , T_s sont le débit massique de l'air (kg/s), la chaleur massique de l'air ($J/kg K$), la température à l'entrée du capteur (K) et la température à la sortie du capteur (K), respectivement.

La quantité de l'énergie emmagasinée ou stockée dans la cavité du MCP pendant la phase de charge est donnée par la relation suivante :

$$Q_{ch} = \frac{1}{\Delta t_{ch}} \left[m_{MCP} C_{p,sd} (T_F - \bar{T}_{in_ch,MCP}) + m_{MCP} L_F + m_{MCP} C_{p,lq} (\bar{T}_{fin_ch,MCP} - T_F) \right] \quad (4)$$

La quantité d'énergie restituée pendant la décharge peut se calculer par la relation suivante :

$$Q_{déch} = \frac{1}{\Delta t_{déch}} \left[m_{MCP} C_{p,lq} (T_F - \bar{T}_{fin_déch,MCP}) + m_{MCP} L_F + m_{MCP} C_{p,sd} (\bar{T}_{in_déch,MCP} - T_F) \right] \quad (5)$$

où

L_F : chaleur latente de fusion du MCP (J/kg),

m_{MCP} : masse du MCP (kg),

T_F : Température de fusion du MCP (K),

T_{MCP} : température du MCP (K).

$C_{p,sd}$ et $C_{p,lq}$: chaleur massique du MCP à l'état solide et à l'état liquide (J/kgK),

$\bar{T}_{in_ch,MCP}$ et $\bar{T}_{fin_ch,MCP}$: température moyenne de début et de fin de la charge (K),

$\bar{T}_{in_déch,MCP}$ et $\bar{T}_{fin_déch,MCP}$: température moyenne de début et de fin de la décharge (K).

Le rendement moyen du capteur solaire avec MCP (CS_{STL}) sur une journée est égal au rapport de la quantité de chaleur réellement extraite de ce capteur pendant la phase de décharge, sur l'énergie thermique effectivement captée par le système solaire pendant la phase de charge. Le rendement journalier est donné par la relation suivante [6] :

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{t_{ini_déch}}^{t_{fin_déch}} Q_u}{A_{abs} \sum_{t_{ini_ch}}^{t_{fin_ch}} I} \quad (6)$$

Le rendement instantané du capteur solaire avec MCP (CS_{STL}) est donné par la formule suivante :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_{abs} I_T} \quad (7)$$

4. Résultats et discussion

La Figure 2 présente l'évolution temporelle de l'ensoleillement, la température ambiante et la température à la sortie du capteur solaire avec MCP (CS_{STL}) durant 30 août 2015. Le rayonnement solaire reçu atteint un maximum de $859 W/m^2$. Pendant le jour, la température ambiante et celle de l'air à la sortie du capteur solaire (CS_{STL}) augmentent progressivement avec la radiation solaire : la température à la sortie de capteur avec MCP atteint un maximum de $59.7^\circ C$ alors que celle de l'air ambiante ne dépasse pas $35^\circ C$. Tandis que pendant tout la nuit, les deux températures diminuent progressivement avec un écart moyen de l'ordre de $8^\circ C$.

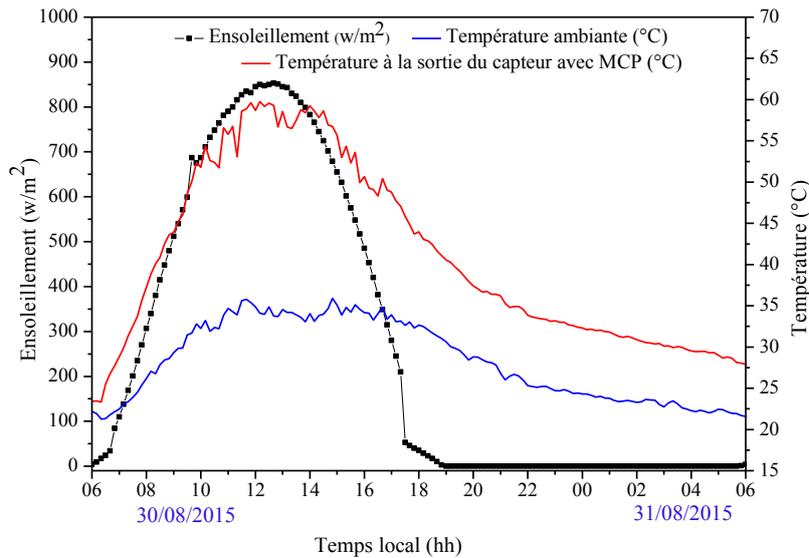


Figure 2 : Variation temporelle de l'ensoleillement, de température ambiante et de la température de sortie du capteur avec Cavité de MCP, $\dot{m} = 0,018 \text{ kg/s}$.

La Figure 3 illustre les variations de l'énergie absorbée, utile et stockée dans le CS_{STL} en fonction du temps. La puissance maximale de l'énergie solaire absorbée est de l'ordre de 1,23 kW, alors que celle stockée dans le MCP est de l'ordre de 0,55 kW. Par conséquent, on remarque que l'énergie solaire stockée présente 44,7 % de l'énergie solaire absorbée.

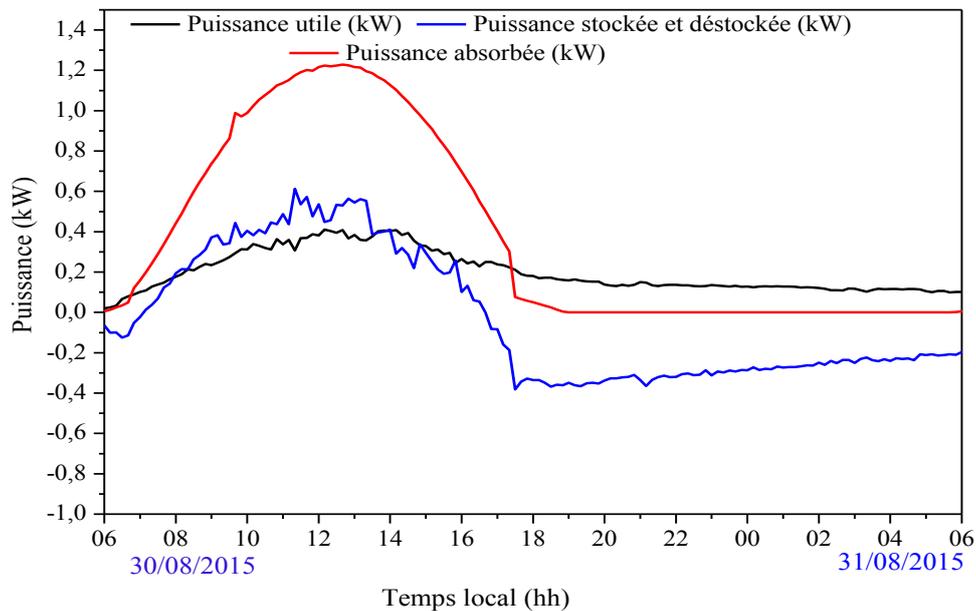


Figure 2 : Puissance absorbée, puissance utile et puissance stockée du CS_{STL} en fonction du temps $\dot{m} = 0,018 \text{ kg/s}$.

Sur la Figure 4, on présente une comparaison entre la température de l'air à la sortie du capteur solaire avec et sans MCP. Les conditions climatiques sont identiques pour les deux capteurs considérés. On observe que pendant les périodes les plus chaudes des journées, la température de l'air à la sortie du capteur avec MCP (CS_{STL}) atteint 63  C alors que celle du capteur sans MCP (CS_C) dépasse 75  C. Après 16 h 30, lorsque le rayonnement solaire commence à diminuer, nous constatons que la température enregistrée pour le système sans MCP a chuté plus rapidement que celle de système avec MCP. En effet, l'énergie thermique stockée dans le

MCP permet de maintenir l'air à la sortie de capteur solaire à des températures plus élevées par rapport à la température de l'air délivré par le capteur solaire sans MCP (CS_C), avec un écart varie de 3 à 7 °C. La comparaison entre la température de l'absorbeur du capteur avec MCP et sans MCP est présentée sur la Figure 4. On remarque que la température de l'absorbeur de CS_{STL} reste supérieure à celle de CS_C durant toute la nuit avec un écart moyen de 12,5 °C. L'inertie thermique de l'absorbeur avec MCP est supérieure à celle de l'absorbeur du capteur sans MCP.

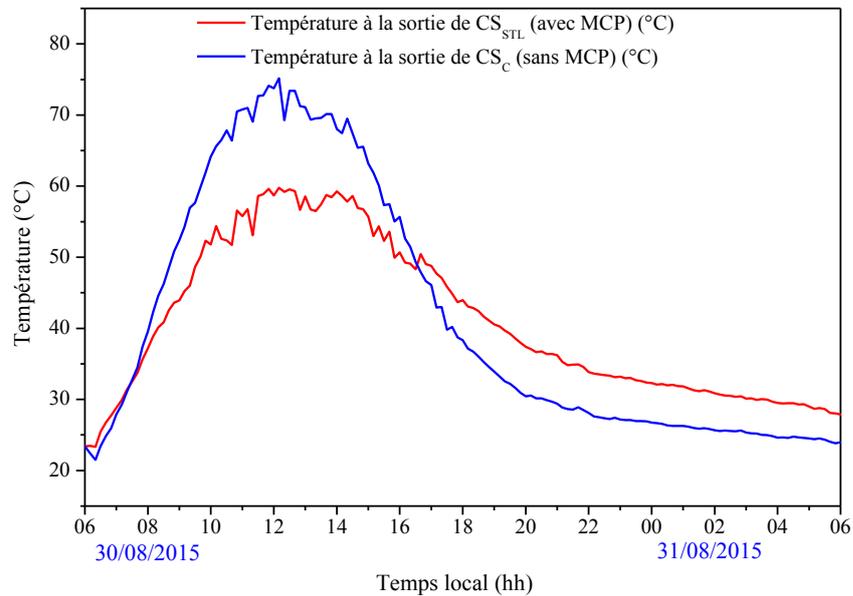


Figure 3 : Température à la sortie du capteur avec / sans MCP en fonction du temps, $\dot{m} = 0,018 \text{ kg/s}$.

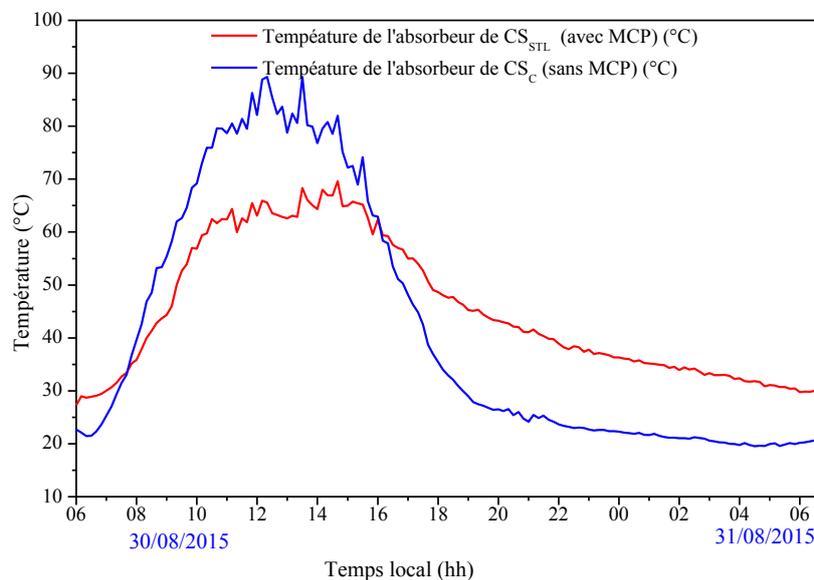


Figure 4 : Température de l'absorbeur du capteur avec / sans MCP en fonction du temps, $\dot{m} = 0,018 \text{ kg/s}$.

La Figure 5 présente la variation du rendement énergétique instantané du capteur solaire à air avec stockage thermique latent, et celui du capteur solaire à air classique (sans MCP). On constate que pendant la période la plus ensoleillée, le rendement énergétique instantané du capteur sans MCP est plus élevé que celui du capteur

avec MCP. Lorsque l'ensoleillement commence à diminuer, le rendement du capteur CS_{STL} augmente : il se rapproche de celui du CS_C et le dépasse vers 17 h.

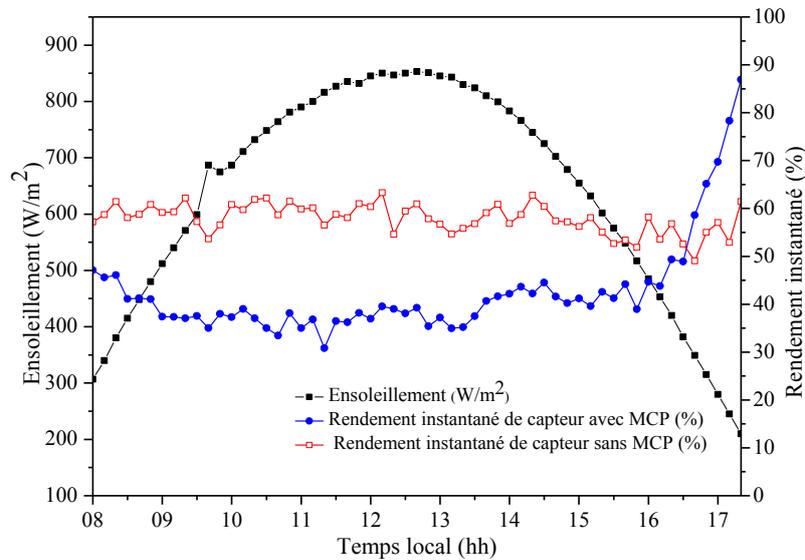


Figure 4 : Variation du rendement instantané du CS_{STL} et du CS_C en mode Stockage/Déstockage instantané et de l'ensoleillement en fonction du temps.

Le rendement énergétique journalier du capteur solaire à air avec stockage thermique latent, et celui du capteur solaire à air classique (sans MCP) sont 42,5 % et 57,8 %, respectivement.

Conclusion

Cet article présente une étude des performances thermiques du capteur solaire à air avec et sans MCP (stockage thermique latent). L'intégration d'une cavité métallique pleine de paraffine (MCP) permet maintenir la température à la sortie de capteur plus élevée que la température ambiante durant toute la journée. L'énergie thermique stockée dans le MCP permet de maintenir l'air à la sortie de capteur solaire à des températures plus élevées par rapport à la température de l'air délivré par le capteur solaire sans MCP (CS_C), avec un écart varie de 3 à 7 °C. La valeur du rendement énergétique journalier du capteur avec MCP est 43,4 %.

Nomenclature

Symbole

A surface, m^2

C_p chaleur massique, $J / kg K$

I_T irradiation total de l'ensoleillement, W / m^2

L_F chaleur latente de fusion, J / kg

T température, K

Q puissance, W

V vitesse, m / s

Symboles grecs

η rendement énergétique, %

η_0 rendement optique, %

α absorptivité

λ conductivité thermique, $W / m K$

Exposant, Indices

a absorbée

amb ambiant extérieur

abs absorbeur

c capteur

$déch$ phase de décharge

ch phase de charge

in_ch début de la phase de charge

fin_ch fin de la phase de charge

$fin_déch$ fin de la phase de décharge

$in_déch$ début de la phase de décharge

MCP matériaux à changement de phase

Références

- [1] S. O. Enibe, "Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage," *Renew. Energy*, vol. 27, pp. 69–86, 2002.
- [2] S. O. Enibe, "Thermal analysis of a natural circulation solar air heater with phase change material energy storage," *Renew. Energy*, vol. 28, pp. 2269–2299, 2003.
- [3] E. K. Summers, M. A. Antar, H. John, and V. Lienhard, "Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification–dehumidification desalination," *Sol. Energy*, vol. 86, pp. 3417–3429, 2012.
- [4] S. Bouadila, S. Kooli, M. Lazaar, S. Skouri, and A. Farhat, "Performance of a new solar air heater with packed-bed latent storage energy for nocturnal use," *Appl. Energy*, vol. 110, pp. 267–275, 2013.
- [5] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Process," *4nd Ed. John Wiley Sons. New York USA*, 2013..
- [6] H. Benli, "Experimentally derived efficiency and exergy analysis of a new solar air heater having different surface shapes," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 58–67, 2013.

25-27 Octobre 2017
Monastir - Tunisie