

AMELIORATION DE LA PRODUCTIVITE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE PAR L'INTEGRATION D'UN CONDENSEUR TUBULAIRE EXTERNE

Fouzia KHEMMAR¹, Ahmed RAHMANI^{*2}, Amani KOUCHARI³, Ali FEHDI⁴

L'objectif de ce travail, est d'améliorer la productivité du distillateur solaire simple par l'intégration d'un Condenseur Tubulaire Externe (CTE). Deux distillateurs solaires de type bassin, avec et sans condenseur externe, ont été réalisés et testés sous les conditions du laboratoire. Les résultats du test ont montré que le condenseur externe a un effet positif sur les performances thermiques du distillateur. L'étude comparative entre le Distillateurs Solaire Simple (DSS) et le Distillateur Solaire à Condenseur Externe (DSCE) montre que l'intégration du CTE contribue à améliorer la production du distillateur solaire de 40% alors que le rendement thermique du distillateur a été amélioré d'environ 28.35%.

Mots clés: Distillation solaire, Condenseur externe, Etude expérimentale.

1. Introduction

La demande mondiale en eau est en augmentation continue suite à la croissance démographique et le développement industriel et agricole. Le manque d'eau potable et la rareté des ressources naturelles, deviennent un problème majeur qui menace la vie des populations dans plusieurs régions du monde. Les pays nord-africains font partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées. Cependant, elle dispose un gisement solaire très important. Ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique.

L'utilisation de l'énergie solaire pour la distillation des eaux saumâtres ou des eaux de mer s'avère l'une des solutions préconisées pour l'approvisionnement de l'eau potable dans les régions éloignées arides ou isolées. Elle représente une technique respectueuse à l'environnement qui introduit de nouvelles sources d'eau et contribue efficacement au développement socio-économique [1]. La distillation

¹ Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, e-mail: k.fouzia@hotmail.fr.

² Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, e-mail: mag_phy@yahoo.fr.

³ Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, e-mail: voodoo dolls21@gmail.com

⁴ Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, e-mail: l_lawliet34@hotmail.com

solaire a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques et demeure l'un des domaines de recherche privilégiés [2]. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre; ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, et moins coûteux. Ils présentent néanmoins le gros inconvénient d'une production très faible [3].

L'amélioration de la productivité du distillateur solaire a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et reste un défi pour les scientifiques. Cette amélioration peut être obtenue par des modifications appropriées au niveau de la conception du distillateur et son mode de fonctionnement. L'amélioration de la productivité est obtenue généralement par l'amélioration de l'évaporation, la condensation, le stockage thermique ainsi que la réduction des pertes thermiques vers l'atmosphère [1].

Dans certaines conditions, la vitre du distillateur devient incapable de condenser toute la vapeur générée au sein du distillateur. C'est le cas lorsque la température de la vitre est trop élevée à cause d'une température ambiante élevée et un rayonnement solaire intense. Alors, l'écart de température entre l'eau et la vitre diminue, la pression interne (air-humide) augmente et le distillateur se trouve saturé. Sous ces conditions, le taux d'évaporation diminue et la productivité du distillateur baisse malgré le flux solaire élevé.

L'intégration d'un condenseur externe est l'une des solutions adoptées pour améliorer les performances thermiques du Distillateur Solaire Simple (DSS) [4,5]. Le condenseur externe représente une surface d'échange additionnelle à la vitre du distillateur qui s'avère très utile surtout lors des journées chaudes. L'amélioration est obtenue grâce à l'écart de température entre l'eau et la paroi métallique du condenseur, qui favorise le transfert de la vapeur générée vers le condenseur. La pression à l'intérieur du distillateur est maintenue à un niveau bas ce qui permet d'avoir un taux d'évaporation plus élevé [6].

D'après la littérature, l'intégration d'un condenseur externe peut augmenter la productivité du DSS d'environ 25-75% [7,8]. Le transfert de la vapeur du distillateur vers le condenseur peut se faire soit par diffusion (en raison de la différence la concentration de vapeur), soit par circulation naturelle (en raison de la différence de densité entre l'évaporateur et le condenseur) [9,10] ou bien par circulation forcée à l'aide d'un ventilateur d'extraction [11-13].

Husham [5] a étudié les modes de transfert de la vapeur vers le condenseur externe par diffusion et par circulation naturelle. Trois distillateurs solaires simples ont été conçus et testés sous les mêmes conditions. Le premier distillateur a été utilisé comme référence et les deux autres étaient reliés à des condenseurs cylindriques placés au côté arrière des distillateurs avec deux manières différentes. L'un des deux est connecté seulement au niveau de sa partie supérieure, tandis que l'autre était connecté à sa partie supérieure et inférieure à la fois. Les résultats expérimentaux montrent que le distillateur connecté avec un condenseur à travers

une seule connexion produit 2.67 L/jour, soit une augmentation de 15.08%. L'autre distillateur, qui est intégré au condenseur par ces deux extrémités, donne 3.1 L/jour, avec une amélioration de 33.6% par rapport au DSS.

Dans le cadre de ce travail, une étude expérimentale est effectuée afin de voir l'effet du condenseur externe sur le comportement thermique du distillateur. En effet, deux distillateurs simples de type bassin ont été réalisés, l'un des deux est muni d'un condenseur externe et l'autre est considéré comme témoin. Les deux distillateurs sont testés sous les mêmes conditions du laboratoire. Les résultats expérimentaux montrent que l'intégration d'un condenseur externe contribue à améliorer les performances thermiques du distillateur solaire.

2. Conception et principe de fonctionnement

La figure 1 montre un schéma simplifié du Distillateur Solaire à Condenseur Externe (DSCE) proposé dans le cadre de cette étude. Il est constitué principalement d'un distillateur type bassin, simple vitrage, interconnecté à un Condenseur Tubulaire Externe (CTE) attaché au mur arrière du distillateur. Afin de minimiser les pertes thermiques vers l'atmosphère, le boîtier du distillateur solaire est formé par la mise en parallèle de deux couches de PVC séparées par une feuille de polystyrène de 2 cm. Notons que, l'utilisation du PVC au lieu du bois permet d'avoir un distillateur plus léger. Le bassin absorbeur est construit en tôle galvanisée de 0.35 m² (0.5x0.7 m) et de 1 mm d'épaisseur. Il est recouvert d'une mince couche de peinture noire pour absorber le maximum de flux radiatif incident. Au-dessous de l'absorbeur une couche de polystyrène de 10 cm d'épaisseur est placée afin de réduire les pertes thermiques vers le bas. Un tube en PVC de 15 mm est connecté à sa base inférieure permettant le remplissage et le vidange d'eau.

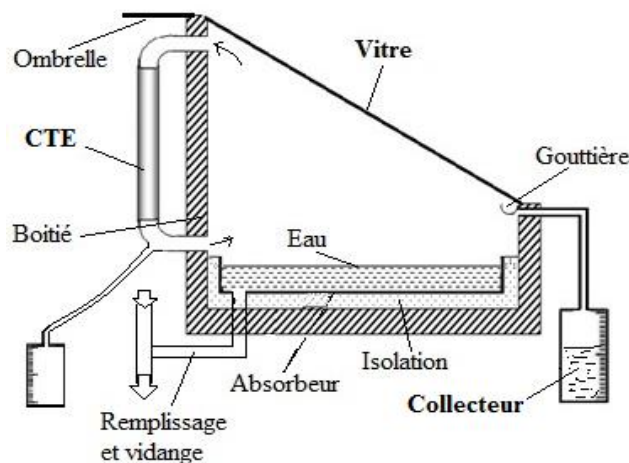


Fig. 1. Schéma du distillateur solaire amélioré par un condenseur tubulaire externe.

Le distillateur est enfermé par une vitre en verre transparente de 0.43 m^2 ($62 \times 70 \text{ cm}$) et de 3 mm d'épaisseur à travers laquelle, les rayons peuvent être pénétrés vers l'absorbeur. La vitre est inclinée à l'horizon d'un angle de 36° . A la partie inférieure de la vitre une gouttière en PVC est placée pour la collecte du condensat et l'envoyer vers la bouteille de collection. Le CTE prend la forme d'un échangeur tubulaire verticale constitué de trois tubes en aluminium identiques, séparés et parallèles. Chaque tube est de 21 cm de longueur et un diamètre externe de 50 mm. La liaison entre le CTE et le distillateur est réalisé au niveau du mur arrière du distillateur à travers six trous de 50 mm de diamètre afin de connecter les trois échangeurs tubulaires représentant le CTE. Cette connexion est assurée à l'aide des coudes en PVC. L'aluminium est choisi pour sa conductivité élevée et sa légèreté. La surface d'échange du CTE avec l'ambiante est de 0.1 m^2 ce qui représente 18.7% de surface de condensation additionnelle au distillateur. Les tubes du CTE sont placés verticalement pour faciliter l'écoulement du condensat et pour déclencher le phénomène de la circulation naturelle de l'air humide entre le CTE et le distillateur.

Une boucle à circulation naturelle est donc établie dans le distillateur solaire, produite par la différence de masse volumique entre l'air relativement froid sortant de la partie inférieure des tubes du CTE et l'air chaud riche en humidité qui se trouve à la partie supérieure du distillateur (au voisinage de la vitre), qui entre à travers les trous de la partie supérieure de CTE. La vapeur d'eau, séparée de l'air, forme des gouttelettes liquides qui descendent sous l'effet de gravité et s'écoulent pour être recueillies dans la bouteille de collection.

L'utilisation d'un CTE contribue donc à réduire la concentration des gouttelettes d'eau sur la face interne de la vitre. Ceci contribue davantage à améliorer la transmissivité de la vitre et accroître le flux radiatif reçu par le bassin.

3. Montage expérimental et instruments de mesures

Le bassin de chaque distillateur a été rempli de 3.5 kg de l'eau pour avoir 1 cm de profondeur. Les mesures expérimentales concernent les principales températures des deux distillateurs (bassin absorbeur, eau du bassin et la surface interne de la vitre en verre) ainsi que la quantité du distillat collecté auprès de chaque distillateur. Le relevé des paramètres est effectué chaque 5 minutes durant 3.5 heures. La mesure des températures est effectuée par des thermomètres digitaux du type TP2 d'une gamme de mesure de -50 à 300°C et une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$. La quantité du distillat produit au niveau de chaque distillateur est estimée à l'aide des bouteilles en verre, transparentes et graduées de 1.5 litres, utilisée pour la collecte de l'eau distillée.

L'effet du condenseur sur les performances thermiques du distillateur solaire a été étudié à travers une étude comparative entre deux distillateurs

solaires, avec et sans condenseur externe. Les deux distillateurs sont instrumentés pour la mesure des températures ; du bassin, de l'eau et de la vitre ainsi que la quantité du distillat recueillie pour chaque distillateur. Le flux solaire est remplacé par un système d'éclairage, équipé par un ensemble de projecteurs, placés devant les deux distillateurs de manière qu'ils reçoivent le même flux radial. Ces projecteurs sont des lampes halogènes de type IP55 et d'une puissance de 1000 W. La mesure de flux radiatif est effectuée à l'aide d'un pyranomètre type CMP-3.



Fig. 2. Photographie du dispositif expérimental adopté

La température ambiante (T_a) est mesurée à l'intérieur du laboratoire à l'aide d'un thermomètre digital du type WT-2. Il faut noter que la température ambiante augmente légèrement durant le test suite à l'échauffement engendré par les projecteurs.

Le vent joue un rôle très important dans le refroidissement de la vitre du distillateur. Cette dernière représente la surface de condensation du distillateur et qui doit être toujours maintenue à une température inférieure à celle de l'eau du bassin. Sachant que le taux d'évaporation dans ce type de distillateurs est proportionnel à l'écart de température entre la vitre et l'eau ($T_w - T_v$) [14]. Un ventilateur électrique est placé face aux distillateurs pour simuler le vent (Fig. 2). La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre digital à fil chaud type AMI 300. Les conditions aux limites imposées, à savoir : la vitesse du vent (V_v), la température ambiante (T_a) et le flux radiatif (Φ) sont maintenues constants durant le test:

- Flux radiatif $\Phi = 981.63 \text{ W/m}^2$
- Température ambiante $T_a = 20\text{-}24^\circ\text{C}$
- La vitesse du vent $V_v = 2.5 \text{ m/s}$

3. Résultats et discussions

Les résultats expérimentaux montrent que l'évolution des paramètres thermo-hydrauliques du système est distinguée par deux régimes différents. Le régime transitoire au démarrage de l'expérience, ou bien période d'échauffement, durant laquelle les températures du système évoluent et le régime stationnaire caractérisé par l'homogénéité des températures jusqu'à la fin de l'expérience.

La variation des principales températures (paroi, eau et vitre) du DSS et le DSCE en fonction du temps est illustrée dans les figures 3 et 4. Au démarrage de l'expérience, la vitre s'échauffe rapidement où sa température dépasse celles de l'eau et du bassin. Ce phénomène est observé pour les deux distillateurs. Ceci est expliqué par la nature du spectre du rayonnement émis par les projecteurs. Ce phénomène disparaît avec l'établissement de l'état stationnaire lorsque les températures du bassin et de l'eau dépassent celle de la vitre. Notons ici, que la vitesse du vent et la température ambiante influent directement sur l'évolution de la température de la vitre.

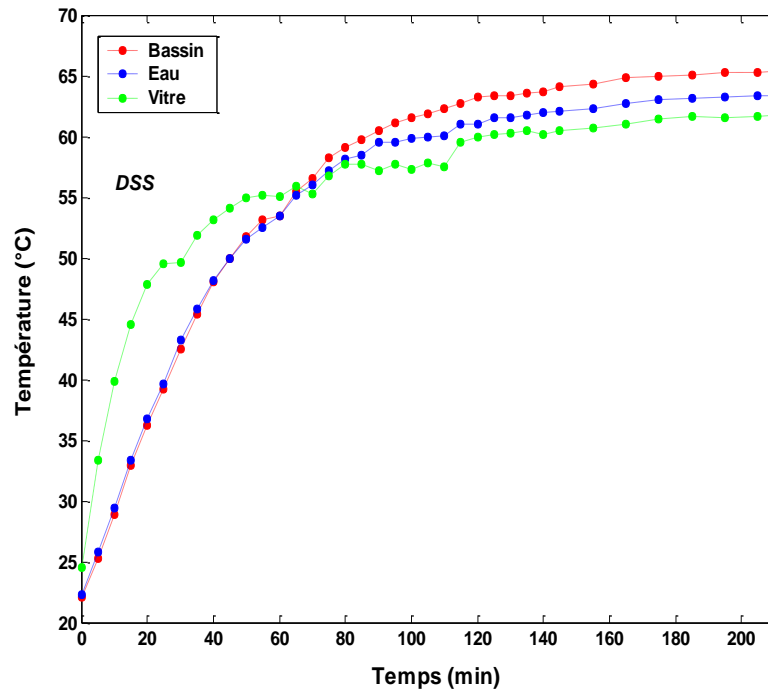


Fig. 3. Variation des principales températures du distillateur solaire simple

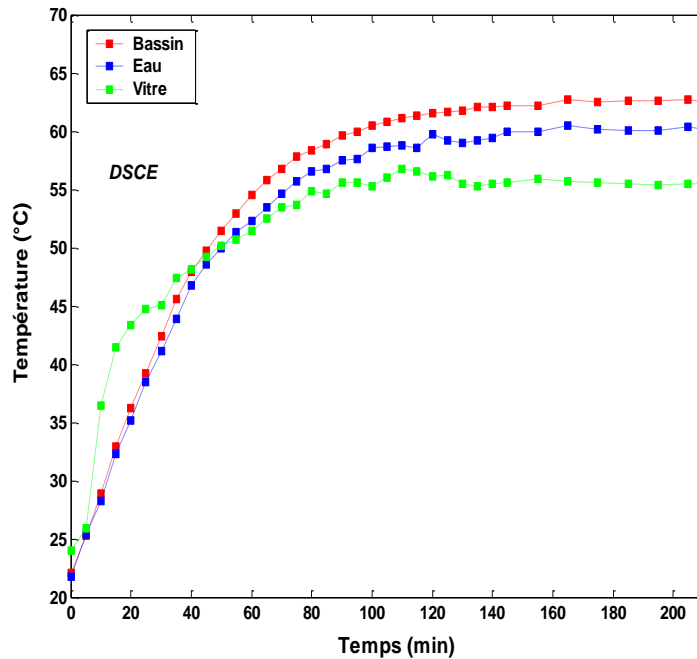


Fig. 4. Variation des principales températures du distillateur solaire simple

La comparaison entre les températures (bassin, eau et vitre) des deux distillateurs est illustrée dans les figures 5-7. En premier lieu, on constate que les températures du DSCE sont plus faibles que celles du DSS. C-à-d, le DSCE fonctionne sous une pression de saturation de vapeur inférieure à celle du DSS. Notons que la réduction de la pression interne du distillateur favorise le processus d'évaporation et contribue à l'augmentation de la production du distillat [15]. Cette constatation est justifiée par l'écart observé lors de la comparaison de la productivité des deux distillateurs (Fig. 8).

L'analyse montre que l'effet du CTE sur le comportement thermique du DSCE apparaît dès le début de l'expérience. Cela est justifié par l'écart de température des deux vitres (Fig. 7).

La variation de la production d'eau distillée des deux distillateurs (DSS et DSCE) est illustrée sur la figure 8. La comparaison montre que la production du DSCE commence à 30 min après le début de l'expérience, alors que pour le DSS, sa productivité commence après 80 min. A l'état stationnaire, on constate que le taux moyen de production du DSS est estimé à 3.5 mL/min alors que celle du DSCE il est de 5.0 mL/min. A la fin de l'expérience, (après 210 min.), le DSS produit 250 mL d'eau distillée alors que le DSCE et grâce au condenseur externe, sa production atteint 350 mL. Ceci représente une amélioration de 40% par rapport au DSS.

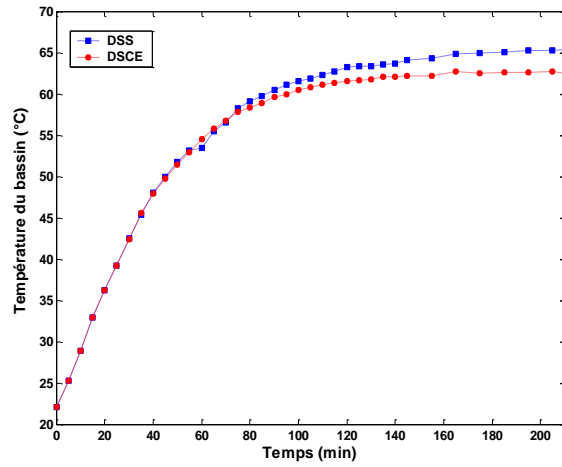


Fig. 5. Variation temporelle de la température du bassin des deux distillateurs

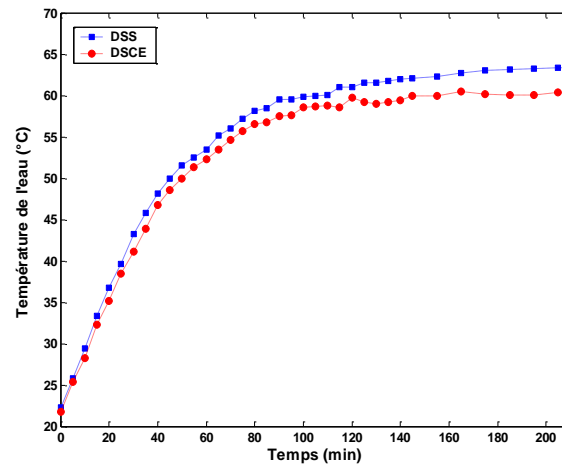


Fig. 6. Variation temporelle de la température de l'eau des deux distillateurs

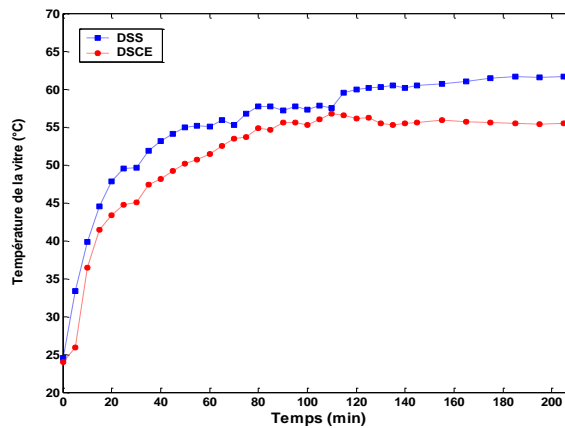


Fig. 7. Variation temporelle de la température de la vitre des deux distillateurs

La figure 8 illustre l'évolution de la productivité de la vitre et du CTE du DSCE. Il est clair que le condenseur commence à produire le distillat 20 min avant la vitre. Ceci est dû à la conductivité thermique élevée de la paroi du CTE qui maintient sa température inférieure à celle de la vitre. Vers la fin du test, la vitre du DSCE produit 210 mL autant que le condenseur a accumulé 140 mL. Grâce à la surface importante de la vitre devant celle du CTE, 60% de l'eau douce était produite à travers la vitre tandis que 40% était collectée au niveau du CTE.

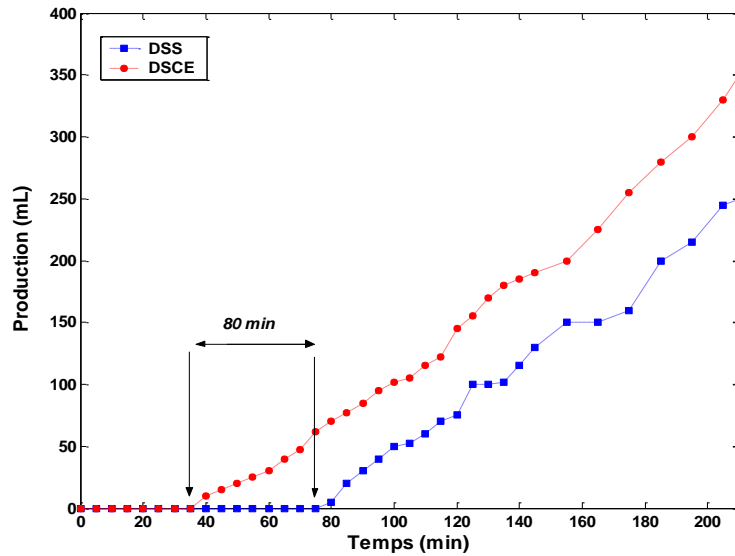


Fig. 8. Variation temporelle de la productivité des deux distillateurs (DSS & DSCE)

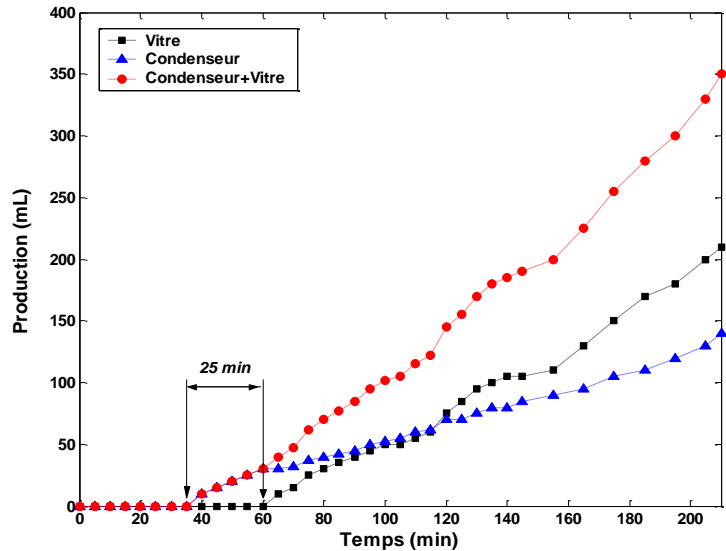


Fig. 9. Variation temporelle de la productivité du distillateur solaire à condenseur externe

Le rendement thermique est un paramètre clé dans la détermination des performances thermiques du distillateur solaire et qui définit la viabilité de la modification proposée [16]. Pour calculer rendement thermique du DSS et le DSCE, le débit massique du distillat produit (m_d) pour chaque prélèvement est multiplié par la chaleur latente d'évaporation (L_v) de l'eau, puis divisé par la puissance radiative reçue à travers la surface de la vitre (Φ) selon la formule suivante:

$$\eta = \frac{m_d \cdot L_v}{\phi \cdot A_v} \quad (1)$$

Avec :

$$L_v = 2.4935 \cdot 10^6 [1 - 9.478 \times 10^{-4} T_f + 1.313 \cdot 10^{-7} T_f^2 - 4.7974 \cdot 10^{-9} T_f^3] \quad (2)$$

T_f est la température moyenne de la cavité l'air humide, calculée entre l'eau et la vitre, $T_f = (T_w + T_v)/2$.

La variation du rendement thermique des deux distillateurs avec et sans CTE est illustrée sur la figure 10. Il est clair que le DSCE est plus performant que le DSS. Le calcul de la valeur moyenne montre que le rendement du DSS atteint 12.63% alors que pour le DSCE, le rendement est amélioré d'environ 16.21% avec une augmentation de 28.35%.

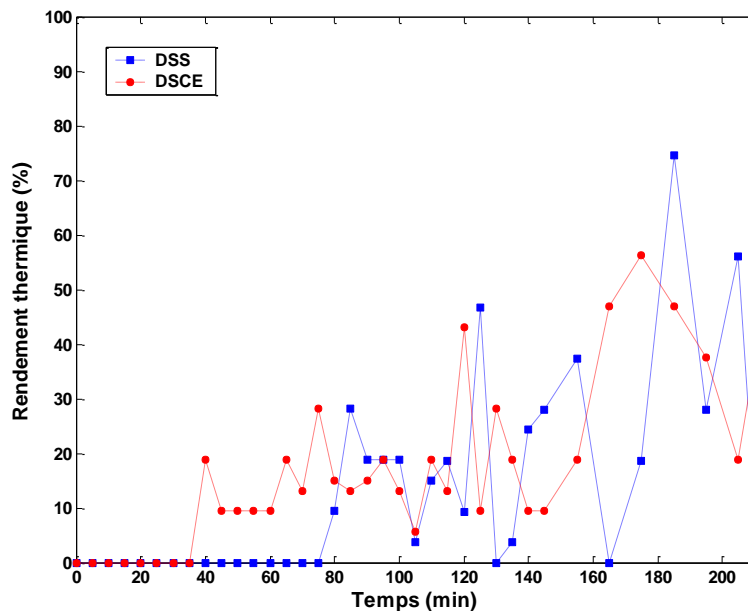


Fig. 10. Variation du rendement thermique des deux distillateurs en fonction du temps

4. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, une approche expérimentale est effectuée dans le but d'améliorer la productivité du distillateur solaire simple par l'intégration d'un condenseur externe. L'étude montre que le condenseur externe améliore nettement les performances thermiques du distillateur solaire. L'expérience a montré qu'une amélioration de 40% est obtenue dans la productivité du distillateur solaire. De même, le rendement thermique est amélioré de 28.35%. Cette amélioration est liée principalement aux points suivants:

- Le condenseur représente une surface d'échange supplémentaire au distillateur solaire et la conductivité thermique élevée de la paroi du condenseur, ce qui conduit à une production supplémentaire de distillat.
- L'écart de température entre l'eau et la surface du condenseur est important ce qui améliore de plus le taux d'évaporation ainsi que la productivité du distillateur solaire.
- La pression interne du système reste proche de la pression atmosphérique, ce qui favorise le processus d'évaporation de l'eau, inversement au distillateur solaire simple.
- L'immigration de la vapeur vers le condenseur externe contribue à réduire la concentration des gouttelettes sur la vitre, ce qui permet plus de rayonnement solaire transmis à travers la vitre vers le bassin.

Remerciements

Ce travail s'est déroulé au laboratoire de Mécanique Energétique à la faculté des sciences et Sciences Appliquées, Université d'Oum-El-Bouaghi, Algérie. Les auteurs remercient le Professeur Dib Abderrahmene, le Dr. Amar Hadeff et le Dr. Djeddou Messaoud pour leur aimable coopération. Par la même occasion j'adresse mes vifs remerciements aux ingénieurs de laboratoire de la faculté de nous avoir fourni le matériel nécessaire et qui ont permis de mener à bien cette étape de travail.

NOMENCLATURE

A	Surface [m^2]
I_o	Energie solaire incidente [W/m^2]
L_v	Chaleur latente de vaporisation [$J/kg.K$]
m_d	Débit du distillat [kg/s]
T_a	Température ambiante [$^{\circ}C$]
T_v	Température de la vitre [$^{\circ}C$]
T_w	Température de l'eau [$^{\circ}C$]
V_v	Vitesse du vent [m/s]

Symboles grecs

η	Rendement [-]
ϕ	Flux radiatif [W/m^2]

REFERENCES

- [1]. A. Boutreaa, A. Rahmani, "Thermal Modeling of a Basin Type Solar Still Enhanced by a Natural Circulation Loop", in *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 101, June 2017, pp. 31-43.
- [2]. A. E. Kabeel, Z. M. Omara, F. A. Essa, A. S. Abdullah, "Solar Still with Condenser–A Detailed Review", in *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, Vol. 59, June 2016, pp. 839–857.
- [3]. G. M. I Ayman, E. E. Salman, "Performance Study of a Modified Basin Type Solar Still", in *Solar Energy*, Vol. 118, August 2015, pp. 397-409.
- [4]. M. Faegh, M. M. B. Shafii, "Experimental Investigation of a Solar Still Equipped With an External Heat Storage System Using Phase Change Materials and Heat Pipes", in *Desalination*, Vol 409, no. May 2017, pp. 128-35.
- [5]. M. A. Husham, "Seasonal Performance Evaluation of Solar Stills Connected to Passive External Condensers", in *Sci. Res. Essays*, Vol. 7, no. 13, April 2012, pp. 1444-60.
- [6]. S. W. Sharshir, N. Yang, G. Peng, A. E. Kabeel, "Factors Effecting Solar Stills Productivity and Improvement Techniques: A Detailed Review", in *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 100, May 2016, pp. 267-284.
- [7]. H. Hassan, S. Abo Elfadl, "Effect of the Condenser Type and the Medium of Saline Water on the Performance of the Solar Still in Hot Climate Conditions", in *Desalination*, Vol. 117, September 2017, pp. 60-68.
- [8]. A. Madhlopa, C. Johnstone, "Numerical Study of a Passive Solar Still with Separate Condenser", in *Renew. Energy*, Vol. 34, no. 7, July 2009, pp. 1430-9.
- [9]. P. Refalo, R. Ghirlando and S. Abela, "The Use of a Solar Chimney and Condensers to Enhance the Productivity of a Solar Still", in *Desalin. Water Treat*", Vol. 57, no. 48-49, November 2015, pp. 23024-37.
- [10]. S. Al-Kharabsheh, D. Yogi Goswami, "Experimental Study of an Innovative Solar Water Desalination System Utilizing a Passive Vacuum Technique", in *Sol. Energy*, Vol. 75, no. 5, November 2003, pp. 395-402.
- [11]. P. Monowe, M. Masale, N. Nijegorodov, V. Vasilenko, "A portable Single-Basin Solar Still an External Reflecting Booster and Outside Condenser", in *Desalination*, Vol. 280, no. 1-3 October 2011, pp. 332-338.
- [12]. M. Abu-Qudais et al, "Experimental Study and Numerical Simulation of a Solar Still Using an External Condenser", in *Energy*, Vol. 21, no. 10, October 1996, pp. 851-855.
- [13]. A. El-Bahi, D. Inan, "A Solar Still With Minimum Inclination, Coupled to an Outside condenser", in *Desalination*, Vol. 123, no. 1, August 1999, pp. 79-83.
- [14]. S. Kumar, G. N. Tiwari, "Estimation of Convective Mass Transfer in Solar Distillation System", in *Sol. Energy*, Vol. 57, no. 6, December 1996, pp. 459–64.
- [15]. V. Sriram, R. H. Samuel, M. K. Kalidasa, "Experimental Study on a Low Pressure Solar Still", in *Appl. Sol. Energy*, Vol. 49, no.3, July 2013, pp. 137-141.
- [16]. Z. Haddad, A. Chaker, A. Rahmani, "Improving the Basin Type Solar Still Performances Using a Vertical Rotating Wick", in *Desalination*, Vol. 418, September 2017, pp. 71-78.