

Réalisation et expérimentation d'un cuiseur solaire boîte à surface réceptrice inclinée muni d'un réflecteur plan

F. Yettou^{1*}, B. Azoui², A. Malek³, A. Gama¹,
M.A. Rouissa⁴ et O. Benzeggouta⁴

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
47133, Ghardaïa, Algeria

² Laboratoire de Recherche LEB, Département d'Electrotechnique
Université Hadj Lakhdar, Rue Boukhrouf Med El Hadi, Batna, Algérie

³ Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, 16340, Algiers, Algeria

⁴ Département de Génie Mécanique, Université Mentouri
Rue Salah Bey, Constantine, Algeria

(reçu le 07 Août 2013 – accepté le 30 Décembre 2013)

Résumé – Après une simulation de la répartition des rayons solaires incidents sur l'absorbeur d'un cuiseur type boîte à surface inclinée en milieux arides durant l'année, on présentera, dans cet article, le premier cuiseur solaire réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, ce dernier est équipé d'un réflecteur à concentration pour permettre de collecter un maximum d'énergie. Une conception mécanique, ainsi qu'une simulation optique du cuiseur durant le mois du test sont nécessaires. Les tests ont été effectués sous ensoleillement direct de Ghardaïa (Latitude 32.48°N) durant le mois d'Avril. Différents thermocouples ont été implantés sur divers endroits du cuiseur, les mesures de températures issues de ces capteurs ont été prélevées chaque une minute de temps. Le test présenté dans cet article concerne la préparation d'un café presse pendant deux moments différents de la journée. La température de l'absorbeur avait dépassée les 100 °C, ce qui a permis la préparation du café en un temps de 45 min le matin et en seulement 30 min l'après midi. Les résultats obtenus pour ces premiers tests sont satisfaisants et très encourageants. Le cuiseur réalisé permet d'atteindre des températures suffisantes pour une cuisson saine des aliments. L'énergie de sortie journalière moyenne délivrée par le cuiseur est estimée à 3.83 kJ/jour et le rendement énergétique journalier est compris entre 0.15 - 17.75 %.

Abstract – After simulation of incident solar radiation distribution on the plate absorber of a box solar cooker with inclined aperture area, during the year in arid regions, in this paper; an attempt has been made to realize the first box solar cooker in Applied Research Unit on Renewable Energies; which is equipped with a reflector (booster mirror) for maximum energy collection. Mechanical design and optical simulation of the cooker during the test month are necessary. The tests were carried out under direct solar radiation in Ghardaïa site's (Latitude 32.48 °N) during April month. Different thermocouples have been implemented in various parts of the cooker, temperature measurements from these sensors were collected every one minute of time. The test presented in this paper concerns the preparation of a coffee press for two different moments of the day. The absorber plate temperature has exceeded 100 °C, which allowed the preparation of coffee in a time of 45 minutes in the morning and only 30 minutes in the afternoon. The results obtained for these first tests are satisfactory and very

* yettou.t@gmail.com

encouraging. The realized cooker achieves sufficient temperatures for healthy cooking. The average daily energy output of the solar box cooker was 3.83 kJ/day. The energy efficiency of the box cooker varied in the range of 0.15 – 17.75 % during the experimental period.

Mots clés: Energie solaire - Cuiseur solaire - Simulation optique - Conception mécanique - Réalisation expérimentale.

1. INTRODUCTION

Les cuissons traditionnelles sont néfastes pour l'environnement et participent à l'aggravation de la pollution et le réchauffement de la planète. Elles utilisent souvent des énergies fossiles, dont les stocks ne sont pas illimités, les cuissons au bois contribuent à la déforestation dans certaines régions.

La moitié de la population mondiale cuisine à l'aide du feu de bois et vit dans des régions favorables à l'exploitation de l'énergie solaire. Selon l'ONU, deux tiers de la population mondiale, c'est-à-dire deux milliards de personnes, souffrent du manque de bois [1]. Dans les zones menacées par la déforestation, les efforts de protection échouent quand les gens n'ont pas d'alternative à la cuisson au feu de bois.

En Algérie, pour les citoyens qui sont installés dans plusieurs régions isolées du pays, la cuisson des aliments revient très onéreuse. Quand on exploite les sources énergétiques conventionnelles et induit des conséquences désastreuses sur l'écosystème en exploitant le bois des quelques arbustes restants dans ces régions [2].

La cuisson solaire est l'une des applications possibles de l'énergie solaire. Cette application constitue une réelle solution pour limiter la déforestation et l'utilisation abusive des énergies fossiles qui contribue à l'aggravation des problèmes des émissions des gaz à effet de serre. Chaque cuiseur solaire peut sauver une tonne de bois par an dans les régions ensoleillées, mais arides et peut donc à cet effet éviter le dégagement d'une grande quantité de gaz à effet de serre [3].

C'est pourquoi l'utilisation d'un cuiseur solaire peut s'avérer être la solution la plus écologique pour la cuisson des aliments. Un cuiseur solaire est composé d'une boîte isolée, d'une vitre et d'un réflecteur, ce qui permet de poursuivre les variations saisonnières de la position du soleil.

En tenant compte des résultats obtenus de la simulation optique et de l'énergie solaire concentrée reçue par un cuiseur type boîte à surface réceptrice inclinée, muni de réflecteurs additionnels [4, 5], un premier prototype de cuiseur boîte a été développé et réalisé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa.

On présentera dans cet article les premiers résultats obtenus des tests expérimentaux effectués sur ce dispositif, réalisés au mois d'Avril sous ensoleillement direct de Ghardaïa. L'énergie de sortie délivrée par le cuiseur et son rendement énergétique sont aussi calculés.

2. ETUDE THEORIQUE

Pour faire la conception mécanique et la simulation optique du cuiseur, nous avons besoin de définir quelques paramètres essentiels, tels que la position angulaire du soleil,

le rayonnement solaire direct incident sur l'absorbeur du cuiseur et l'angle d'inclinaison du réflecteur, selon le mois du test considéré.

La position du soleil en coordonnées horizontales est déterminée par deux paramètres: la hauteur du soleil, γ_s , et l'azimut solaire, χ . Pour calculer la hauteur du soleil, γ_s , on utilise l'équation (1) en fonction de la déclinaison solaire, δ , de l'angle horaire ω et de la latitude du lieu, φ , [6]. L'azimut du soleil, γ_s , est représenté en fonction de la latitude du lieu, δ , de la déclinaison solaire, δ , de l'angle horaire, ω , et de la hauteur du soleil, γ_s , comme l'indique l'équation (2):

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (1)$$

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (2)$$

Pour calculer l'éclairement direct horizontal, I_B , [7] incident sur le plan de l'absorbeur d'un cuiseur solaire sans réflexion, on donne l'équation (3), fonction du rayonnement extraterrestre, G_0 , de la masse d'air, m_A , de l'épaisseur de l'atmosphère, δ_R , de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble de Linke, T_L , [8, 9]:

$$I_B = G_0 \times \sin(\gamma_s) \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (3)$$

Afin de collecter un maximum d'énergie, un cuiseur doit être muni des réflecteurs additionnels (un ou deux). Les angles d'inclinaison de ces réflecteurs doivent être optimums au maximum. L'angle θ , que font les rayons solaires avec le plan vertical, est donné par [10, 11]:

$$\theta = \varphi \pm \delta \quad (4)$$

L'angle d'inclinaison du réflecteur est calculé à partir de:

$$\alpha = \frac{1}{3} \times \left(2\theta + \beta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

Pour calculer le rendement énergétique du cuiseur η , l'équation (6) est utilisée [12], où E_i est la quantité d'énergie reçue par le cuiseur, E_0 , la quantité d'énergie délivrée par le cuiseur à la sortie, m_w , la masse d'eau, C_{pw} , le pouvoir calorifique de l'eau, Δt , l'intervalle de temps, A_{sc} , la surface d'interception du cuiseur, I_s étant le rayonnement solaire incident sur un plan horizontal. T_{fw} et T_{iw} sont respectivement la température finale et initiale de l'eau. La figure 1 montre le schéma complet d'un cuiseur solaire à surface d'ouverture inclinée, muni de réflecteurs additionnels.

$$\eta = \frac{E_0}{E_i} = \frac{m_w \times C_{pw} \times (T_{fw} - T_{iw}) / \Delta t}{I_s \times A_{sc}} \quad (6)$$

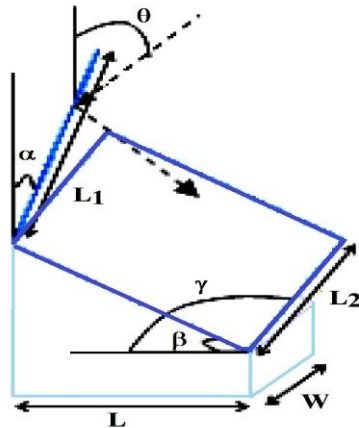


Fig. 1: Schéma d'un cuiseur solaire type boîte à surface réceptrice inclinée muni de réflecteurs additionnels

3. CONCEPTION MECANIQUE

Avant de faire la simulation optique, nous avons besoin de réaliser un design du cuiseur à simuler. Pour cela, le logiciel Solid Works a été utilisé [13].

Les dimensions du cuiseur à surface réceptrice inclinée choisies sont les suivantes: 500 mm × 400 mm × 445 mm × 125 mm.

La conception finale du cuiseur à surface réceptrice inclinée est illustrée sur la figure (2) suivante:

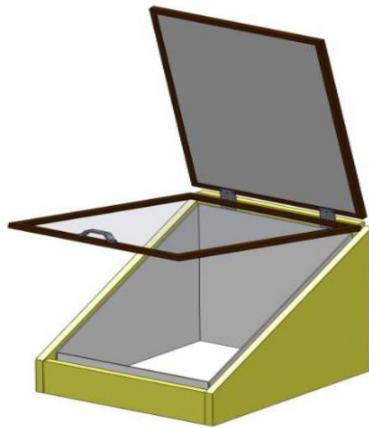


Fig. 2: Conception du cuiseur boîte sous Solid Works

4. SIMULATION OPTIQUE

En premier lieu, on procède à la simulation du cuiseur de type boîte à surface réceptrice, avec un réflecteur additionnel, la simulation est effectuée pour le mois le plus défavorable (Décembre) et le mois le plus ensoleillé (Juin) à Ghardaïa.

La figure 3 illustre la réception et la réflexion des rayons solaires par les parois du cuiseur pour les deux cas :

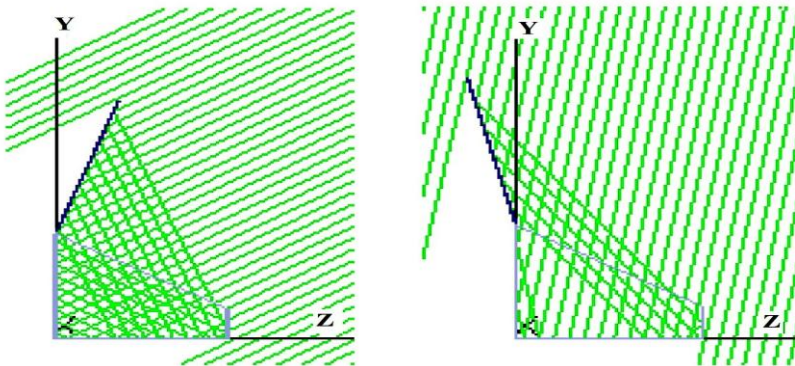


Fig. 3: Tracé des rayons solaires pour la simulation optique du cuiseur de type boîte avec un réflecteur additionnel pour le mois de Décembre et le mois de Juin

Les figures 4.a et 4.b représentent le comportement optique des rayons solaires reçus et réfléchis par le réflecteur et par les parois du cuiseur pour les mois de Décembre et Juin. On peut dire que le choix adéquat des angles d'inclinaison du réflecteur avoisinant, les 17° pour le mois de Décembre (en hiver, le soleil est bas) et d'environ les -14° pour le mois de Juin, permet de récupérer une quantité importante d'énergie dans les deux cas. Le facteur de concentration est augmenté à cet effet.

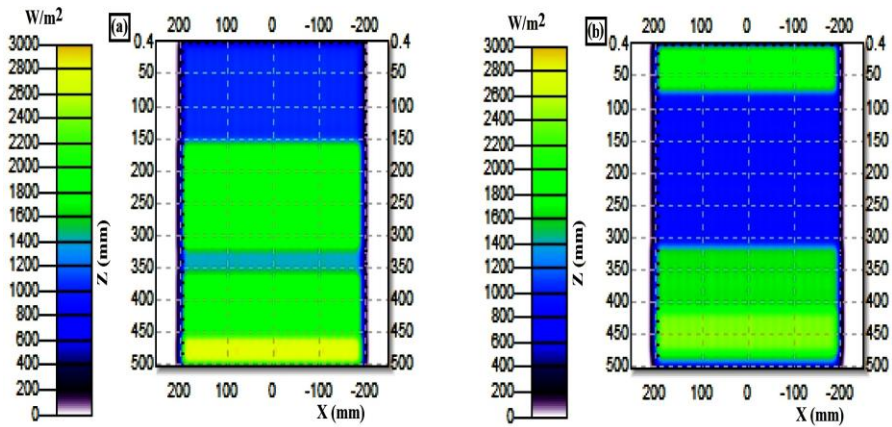


Fig. 4: Résultats de la simulation du cuiseur de type boîte à surface d'ouverture inclinée avec réflecteur additionnel (a) pour le mois de Décembre et (b) pour le mois de Juin

On réalise également la simulation du cuiseur de type boîte avec réflecteur additionnel durant le mois d'Avril, qui est le mois des tests. La figure 5 illustre donc la réception et la réflexion des rayons solaires par les parois du cuiseur pour le mois d'Avril.

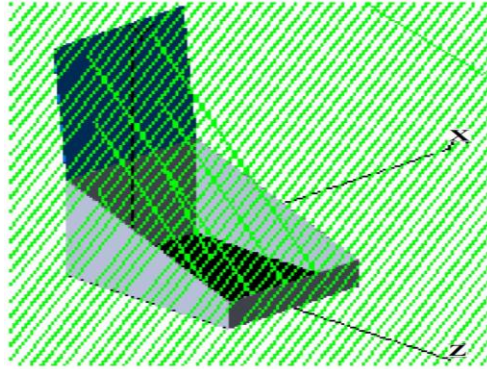


Fig. 5: Simulation optique du cuiseur avec un réflecteur additionnel pour le mois d'Avril

Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure 6. On peut facilement remarquer que la quasi-totalité de l'absorbeur est couverte par la réception et la réflexion des rayons solaires. Ceci permet de récupérer une quantité d'énergie plus grande par rapport au cas sans réflecteur.

L'angle d'inclinaison du réflecteur est égal à $\approx -5^\circ$ correspondant à une hauteur du soleil de 67° et un angle θ des rayons d'environ 23° . Le facteur de concentration atteint 1.8 sur la quasi-totalité de l'absorbeur comme le montre la figure 6.

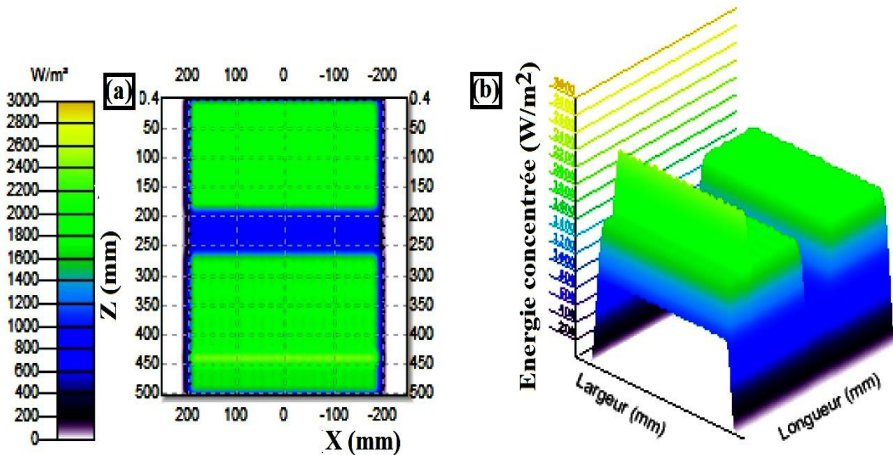


Fig. 6: Résultats de simulation du cuiseur type boîte à surface d'ouverture inclinée avec réflecteur additionnel (a) au mois d'Avril et (b) relief représentatif du facteur de concentration

5. REALISATION EXPERIMENTALE

Les cuiseurs solaires de type boîtes sont simples à construire avec des matériaux disponibles localement et pas trop onéreux et, leur taille n'est pas très encombrante. Basé sur la conception et la simulation d'un cuiseur de type boîte à surface réceptrice

inclinée, il a été réalisé le premier cuiseur de ce type à l'unité de recherche de Ghardaïa (Fig. 7), avec les caractéristiques suivantes:

- un boîtier en bois;
- des surfaces intérieures réfléchissantes (miroirs);
- une isolation entre les miroirs et le boîtier avec la laine de verre;
- une plaque absorbante en Aluminium teintée en noir;
- une surface réceptrice vitrée, inclinée de 32° (latitude de Ghardaïa) et
- un réflecteur extérieur additionnel (miroir).



Fig. 7: Vue du cuiseur solaire de type boîte à surface réceptrice inclinée avec réflecteur additionnel réalisé à l'unité

6. TESTS ET RESULTATS PRELIMINAIRES

Nous avons utilisé divers capteurs de température (thermocouples type K) implantés à des différents endroits différents du cuiseur. Ces capteurs sont connectés à un micro-ordinateur via une unité d'acquisition de données. Les données collectées sont affichées sous forme numérique et graphique et sauvegardées dans un fichier Excel.

6.1 Tests réalisés

Plusieurs tests sur le cuiseur muni du réflecteur additionnel ont été réalisés, au cours du mois d'Avril, à savoir: des tests de stagnation, l'ébullition de l'eau, des tests avec charge (cuisson de morceaux de poulet, préparation du café presse).

Dans ce papier, on présente les tests expérimentaux correspondants à la préparation du café, deux fois dans la journée. Les mesures prises sont effectuées chaque minute et sont les suivantes:

- la température ambiante (T_a),
- la température de la vitre (T_v),
- la température de l'air intérieur (T_r),
- la température de la plaque absorbante (T_p).

6.2 Résultats obtenus

La figure 8 représente l'évolution de l'éclairement global, direct et diffus mesurés sur le site de Ghardaïa pour la journée du 04 Avril, qui est un jour perturbé par les

passages nuageux. L'éclairement diffus est dominant notamment au cours de la matinée. Pour l'après midi, la valeur du rayonnement global atteint les 900 W/m^2 .

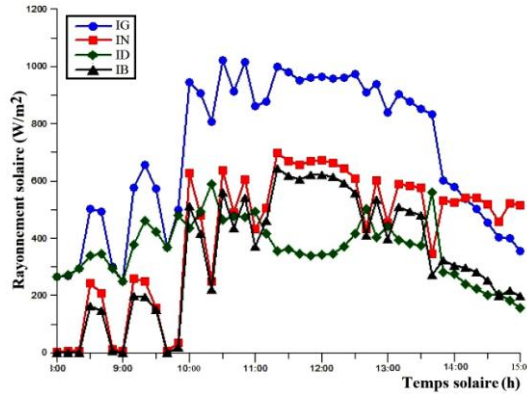


Fig. 8: Eclairages solaires global, diffus et direct incident sur plan horizontal

Le premier test est effectué, la matinée entre 10h00 et 12h00. Une variation de la position du cuiseur est assurée chaque 20 min pour permettre le suivi du soleil [14]. Les résultats de ce test sont présentés sous forme de graphes sur la figure 9.

Ces graphes sont relatifs à la variation des températures des éléments du cuiseur, ainsi que la température ambiante, en fonction du temps, au cours du test de préparation du café.

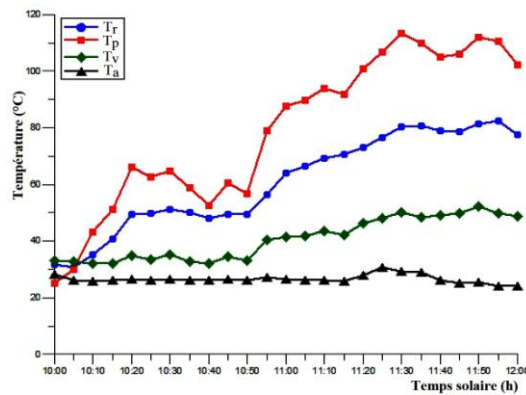


Fig. 9: Evolution des températures mesurées (04 Avril matin pour le test) (ciel très nuageux)

On constate que l'allure des graphes de températures mesurées n'est pas uniforme. Les valeurs de ces dernières fluctuent en fonction du temps solaire.

Par conséquent, l'évolution du phénomène de l'effet de serre à l'intérieur du cuiseur se trouve donc influencée et l'absorbeur n'ait pu atteindre les $100 \text{ }^\circ\text{C}$, qu'après un temps de 01h 20 min ($113 \text{ }^\circ\text{C}$ max).

Le café n'est prêt qu'après 45 minutes passées.

Tandis que le second test, il est effectué l'après midi entre 14h00 et 15h00. Un changement de position du cuiseur est effectué toutes les 20 minutes. La figure 10 représente la variation des différentes températures au cours de ce test.

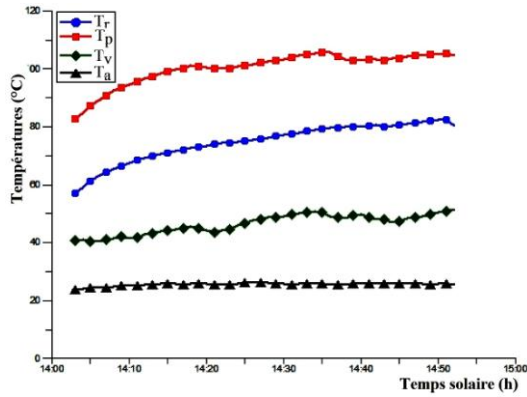


Fig. 10: Evolution des températures mesurées (04 Avril A.M. pour le test) (ciel peu nuageux)

L'allure des températures est uniformément ascendante, du fait qu'entre 14h00 et 14h30, le ciel était dégagé. On peut remarquer qu'au début de ce test (14h00), les valeurs mesurées étaient de loin les valeurs initiales de la température ambiante, ceci est dû au fait que le cuiseur a subi une période du préchauffage avant le début du test.

On remarque également que la température de l'absorbeur ne dépasse pas les 100°C, pourtant le ciel est moins nuageux par rapport au test du matin, ceci a pour cause la hauteur du soleil, qui diminue progressivement l'après midi influençant ainsi l'intensité de l'éclairement solaire qui devient de plus en plus faible.

Le café est prêt au bout de 30 minutes.

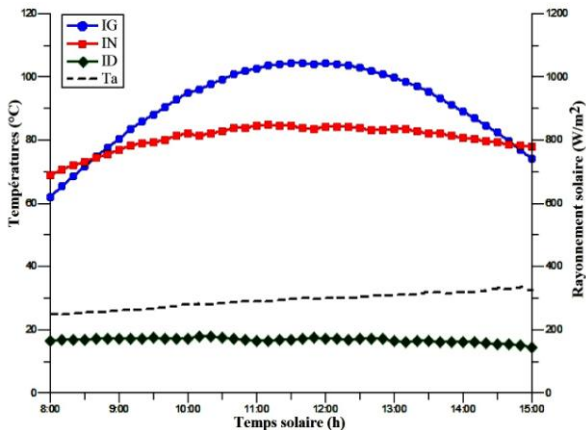


Fig. 11: Eclaircements solaires global, diffus et direct normal incident sur plan horizontal, mesurés le 29 Mai

6.3 Energie de sortie et rendement énergétique

Pour calculer la quantité d'énergie délivrée par le cuiseur de type boîte et le rendement énergétique de ce dernier, nous avons réalisé un test au mois de Mai en prenant comme charge, une quantité d'eau de un litre.

Les conditions climatiques de la journée du test sont représentées sur la figure 11 et les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 12.

Selon les résultats, l'énergie de sortie du cuiseur (calculé à partir de l'équation 6) est comprise entre 0.15 – 20.35 kJ. L'énergie de sortie est considérable durant les deux premières heures et à partir de 11:00, cette quantité d'énergie décroît d'une manière rapide.

L'énergie de sortie journalière moyenne délivrée par le cuiseur est estimée à 3.83 kJ/jour, tandis que l'énergie à l'entrée est de 138.67 kJ/jour. Ces résultats montrent que l'énergie délivrée par le cuiseur est grandement proportionnelle à l'intensité du rayonnement solaire et à la différence de la température de l'eau.

Les résultats de la figure 12 montrent aussi que, le rendement énergétique du cuiseur durant le période du test est compris entre 0.15 – 17.75 %. Les variations du rendement énergétique en fonction du temps sont de même allure que les variations de l'énergie de sortie du cuiseur.

Des valeurs maximales du rendement sont enregistrées durant la matinée. L'après-midi, on enregistre des valeurs minimales du fait que l'intensité du rayonnement solaire diminue.

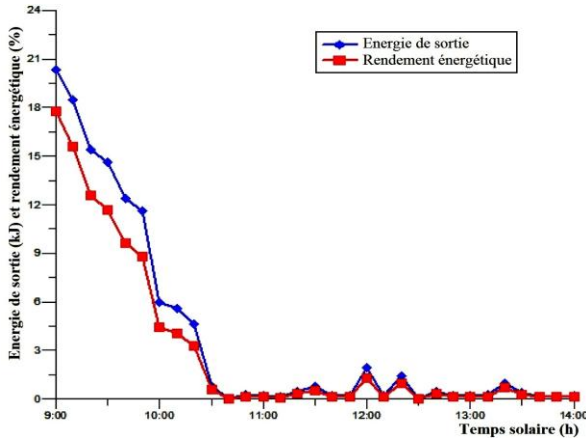


Fig. 12: Variation de l'énergie de sortie et du rendement énergétique du cuiseur réalisé en fonction du temps

7. CONCLUSION

La réalisation du premier cuiseur solaire à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, a été présentée. Le dimensionnement et la conception ont été effectués sur un cuiseur à surface réceptrice inclinée dans le but de collecter un maximum d'énergie.

La simulation du comportement optique du cuiseur est effectuée pour le mois des tests. Les résultats obtenus pour ces tests sont satisfaisants et encourageants. L'énergie de sortie journalière moyenne délivrée par le cuiseur est estimée à 3.83 kJ/jour, le rendement énergétique est compris entre 0.15 – 17.75 %.

La température de la plaque absorbante atteint les 100°C, ce qui permet un mode de cuisson sain des aliments.

NOMENCLATURE

φ : Latitude du lieu	ω : Angle horaire
δ : Déclinaison solaire	γ_{σ} : Hauteur du soleil
χ : Azimut solaire	T_L : Facteur de trouble de Linke
m _A : Masse d'air optique	δP : Epaisseur de l'atmosphère
IB : Eclairage direct horizontal, W/m ²	G ₀ : Eclairage extraterrestre, W/m ²
θ : Angle des rayons avec la verticale au plan du réflecteur	E _o : Quantité d'énergie délivrée par le cuiseur, J
β : Angle d'inclinaison de la vitre	α : Angle d'inclinaison des réflecteurs
η : Rendement énergétique du cuiseur, %	E _i : Energie reçue par le cuiseur, J
m _w : Masse d'eau, kg	C _{pw} : Pouvoir calorifique de l'eau, J/kg
$\Delta \tau$: Intervalle de temps, s	T _{iw} : Température initiale d'eau, °C
I _s : Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal, W/m ²	A _{sc} : Surface d'interception du cuiseur, m ²
	T _{fw} : Température finale d'eau, °C

REFERENCES

- [1] Document, '*Manuel de Cuisson Solaire*', Edition commune SCI / iD COOK, Version traduite par: A. Dizier et F. Pignon, Paris, France, 2005.
- [2] A. Harmim, M. Belhamel, M. Boukar et M. Amar, '*Développement et Expérimentation d'un Cuiseur Solaire à Double Exposition*', Revue Des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3, pp. 371 - 377, 2008.
- [3] M. Hardy, '*Du soleil dans les pays du sud : Entre autonomie et dépendance de développement ?*', Institut d'Etudes Politiques de Lyon, France, 2005.
- [4] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui et A. Malek, '*Etude comparative entre deux types de cuiseurs solaires boîtes en milieu aride*', Revue des Energies Renouvelables, 'SIENR'12', pp. 233 – 245, 2012.
- [5] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek and A. Gama, '*Study and Simulation Of Concentrating Irradiance in Box Solar Cooker with Tracking Reflectors*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15, N°4, pp. 661 – 670, 2012.
- [6] J. Hofierka and M. Sári, '*The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications*', Proceedings of the Open Source GIS - Grass users Conference, Trento, Italy, 11 - 13 September, 2002.
- [7] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, '*Etude Comparative de Deux Modèles de Calcul du Rayonnement Solaire par Ciel Clair en Algérie*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 331 – 346, 2009.
- [8] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuissou and L. Wald, '*Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service*', Environmental

Modelling and Software, Vol.21, N°11, pp. 1555 - 1561, 2006.

- [9] A. Gama, F. Yettou, A. Malek, C. Larbes and B. Azoui, '*Determination of Atmospheric Turbidity Using Solar Radiation Measurements for Two Algerian sites*', 2nd International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources, NURER'10, Ankara - Turquie, 04 - 07 July 2010.
- [10] U.S. Mirdha and S.R. Dhariwal, '*Design Optimization of Solar Cooker*', Renewable Energy, Vol. 33, N°3, pp. 530 – 44, 2008.
- [11] S.M.A. Ibrahim and M.K. El Reidy, '*The Performance of Solar Cooker in Egypt*', Renewable Energy, Vol. 6, N°8, pp. 1041 – 1050, 1995.
- [12] H. Huseyin Ozturk, '*Energy and Exergy Efficiencies of a Solar Box-Cooker*', International Journal of Exergy, Vol. 1, N°2, pp. 202 – 214, 2004.
- [13] Scientific Report, '*SolidWorks*', SolidWorks Corporation, 300 Baker Avenue, Concord, MA 01742. Available from: <http://www.solidworks.com/>.
- [14] F. Yettou, B. Azoui and A. Malek, '*Determination of Adjustment Tracking Time in Two Types of Solar Cookers by Ray-Tracing Method*', Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG, 2013. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635716, pp. 822 – 827, 2013.