

## Le cuiseur solaire stationnaire à CPC asymétrique- Analyse éxérgétique expérimentale

A. Harmim<sup>1\*</sup>, M. Merzouk<sup>2</sup>, M. Boukar<sup>1</sup> et M. Amar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
B.P. 478, 01000 Adrar, Algérie

<sup>2</sup> Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Université Saâd Dahlab, B.P. 270, Route de Soumaâ, Blida, Algérie

(reçu le 12 Février 2014 – accepté le 30 Janvier 2015)

**Résumé** - *Le prototype du cuiseur solaire stationnaire à concentrateur parabolique composé 'CPC' asymétrique a été caractérisé expérimentalement en suivant les recommandations du standard international de test et d'évaluation des cuiseurs solaires. La campagne des tests expérimentaux a été conduite sous les conditions réelles à Adrar et en période hivernale. Sa puissance standardisée est de 78.9 W et ses rendements, énergétique et éxérgétique, sont également évalués. Lors du chauffage à l'ébullition de 5 litres d'eau de 11 h 30 à 14 h 30; son rendement énergétique décroît linéairement de 26.5 % à 5.3 % et son rendement éxérgétique varie entre 0.38 % et 2.43 %. Comparés à d'autres cuiseurs solaires, notre prototype est efficace et ergonomique. De nouveaux indices de performance de cuiseurs solaires sont également proposés.*

**Abstract** - *The stationary solar cooker prototype, equipped with an asymmetric compound parabolic concentrator 'CPC', was tested according to the international standard for testing solar cookers. Experimentation was conducted under the real weather conditions of Adrar in winter season. Its standard cooking power is 78.9 W and its energetic and exergetic efficiencies are also evaluated. During heating test of 5 liters of water from 11:30 to 14:30; its energetic efficiency decreases linearly from 26.5 % to 5.3 % and its exergetic efficiency varies between 0.38 % and 2.43 %. Compared with other solar cookers; our prototype is effective and ergonomic. New performance indices of solar cookers are also proposed.*

**Mots clés:** Cuiseur solaire stationnaire - Caractérisation expérimentale - Performances - Efficacité éxérgétique.

### 1. INTRODUCTION

Dans les régions sahariennes isolées où l'approvisionnement en gaz butane est très difficile, l'être humain est souvent contraint de se rabattre sur l'exploitation du bois des quelque arbustes qui restent pour assurer la cuisson de son alimentation. Les médias nationaux rapportent que cette activité est très répandue surtout en période hivernale [1].

Le recours à la cuisson solaire apparaît comme une alternative intéressante pour répondre à ce besoin vital sans pour autant compromettre la biodiversité végétale et tout en limitant la déforestation et l'utilisation abusive des énergies fossiles polluantes.

En effet, du point de vue environnemental, l'utilisation des cuiseurs solaires contribue à limiter la déforestation dans le monde. En effet, plus de 2 milliards de personnes utilisent le bois de chauffage pour cuire [2] et plus de 15 millions d'hectares de forêt sont perdus chaque année dans les pays en voie de développement à cause de la consommation abusive du bois de forêt.

---

\* arezki.harmim@yahoo.fr

La cuisson solaire contribue également à limiter les émissions des gaz à effet de serre qui sont générées par la combustion du gaz, du bois et du pétrole. Ces combustibles seront alors réservés pour des exploitations stratégiques.

Du point de vue santé, les cuiseurs solaires peuvent être utilisés gratuitement pour purifier l'eau de boisson dans les régions pauvres et déshéritées, car la température atteinte par ces dispositifs dépasse largement la température de consigne qui est de l'ordre de 65 °C.

La cuisine solaire est plus saine. En effet, la concoction solaire est lente sous des températures modérées. On conserve alors les saveurs, les vitamines et les richesses des aliments cuits.

Du point de vue économique, la cuisson solaire, qui se fait gratuitement, contribue à la réduction de la facture énergétique. Les cuiseurs solaires sont rustiques et ne nécessitant pas de haute technologie. Ils contribuent alors à la création d'emplois pour leur réalisation artisanale dans les régions enclavées.

L'un des avantages les plus importants de la cuisson solaire est le gain de temps. En effet, en cuisson solaire il n'est pas nécessaire de rester constamment près des fourneaux pour remuer et surveiller la cuisson car l'alimentation ne brûle pas et ne colle pas. Durant la cuisine, on peut vaquer à d'autres occupations familiales quotidiennes en toute sécurité.

La revue bibliographique effectuée a montré que les cuiseurs solaires boîtes ont atteint un niveau de maturité très élevé en tant qu'application de la thermique solaire. Mais, dans certains pays comme l'Algérie, ces dispositifs ne sont pas développés et ils restent socialement non acceptés à cause de leurs désavantages et inconvénients. En effet, tous les modèles de cuiseurs solaires boîtes étudiés doivent être installés à l'extérieur des habitations et l'utilisateur doit sortir sous le soleil pour pouvoir les exploiter ou bien pour contrôler la cuisson du plat préparé. Les meilleurs d'entre eux nécessitent quelques changements en position ou bien quelques réorientations des réflecteurs pour obtenir la collecte de l'irradiation solaire adéquate à une cuisson saine.

L'exploitation des cuiseurs solaires boîtes disponibles nécessite un minimum de connaissances en matière de géométrie solaire pour les positionner et réorienter leurs réflecteurs en fonction de la position du soleil selon les saisons de l'année.

Telle qu'ils sont présentés, dotés de réflecteurs ou de concentrateurs solaires mobiles et fragiles, les cuiseurs solaires boîtes disponibles ne sont pas commodes pour une intégration dans l'activité quotidienne des ménages qui sont habitués à des dispositifs efficaces, conviviales et ergonomiques, intégrés dans le décor et dans l'espace des cuisines modernes.

Afin de palier à ces inconvénients, un cuiseur solaire boîte équipé d'un concentrateur parabolique composé 'CPC' asymétrique a été développé à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar. Le design optogéométrique et les résultats des tests préliminaires d'un prototype réalisé ont été présentés en référence [3].

Les essais effectués sous l'ensoleillement réel d'Adrar ont démontré son efficacité à cuire deux plats par jour pour une famille de quatre personnes même en période hivernale [3]. Ce système peut être intégré au mur de la cuisine d'une habitation. Il pourrait être alors exploité sans avoir recours à sortir sous le soleil.

Dans ce papier, nous présentons la caractérisation expérimentale de ce prototype en suivant les recommandations du standard international de test des cuiseurs solaires et puis l'analyse exergétique du système est effectuée.

## 2. L'EFFICACITE EXERGETIQUE DES CUISEURS SOLAIRES

Les procédures de caractérisation, de test et d'évaluation des cuiseurs solaires existantes [4-6] se basent sur une analyse énergétique qui se rapporte à la première loi de la thermodynamique. En effet, ces méthodes délivrent des informations concernant la quantité d'énergie sans faire attention à sa qualité et sa disponibilité.

Par contre, l'efficacité exergetique se base sur la seconde loi de la thermodynamique, qui tient compte des irréversibilités, ainsi que de la qualité de l'énergie disponible [7]. L'exergie est définie comme le travail maximal qui peut être fourni par un système évoluant sous une température ambiante donnée. L'introduction de l'efficacité exergetique constitue une autre façon d'évaluer et de comparer les performances des cuiseurs solaires.

L'efficacité exergetique a été introduite, pour la première fois, en cuisson solaire par Öztürk [8, 9] qui a fait l'analyse d'un simple cuiseur solaire à collecteur cylindro-parabolique. Il a montré que l'efficacité exergetique du cuiseur étudié est très faible.

Les performances du cuiseur solaire peuvent être améliorées en limitant les pertes exergetique par un meilleur choix des propriétés optiques des surfaces importantes du cuiseur comme le réflecteur et les parois absorbantes des ustensiles de cuisine. Par la suite, d'autres chercheurs ont exploité cette méthode pour analyser d'autres types de cuiseurs solaires [10-17].

Afin de déterminer, expérimentalement, le rendement énergétique instantané et le rendement exergetique instantané, des essais de chauffage d'eau seront effectués selon le standard international recommandé par Funk [5]. Quand l'eau est chauffée de 40 °C à 90 °C, alors pour chaque intervalle de temps  $\Delta t$  de 10 minutes (600 s), l'énergie de chauffage de l'eau est donnée par:

$$E_{out} = M_e \cdot C_e \cdot (T_{e2} - T_{e1}) \quad (1)$$

Et l'énergie solaire incidente sur la surface d'interception du cuiseur est donnée par:

$$E_{in} = I_{in} \cdot A_{in} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Avec  $I_{in}$ , l'éclairement solaire moyen sur l'intervalle de temps considéré et incident sur la surface d'interception du cuiseur ( $W/m^2$ ). Pour l'intervalle de temps  $\Delta t$  considéré, le rendement énergétique du cuiseur sera calculé par l'expression suivante:

$$\eta_{en} = \frac{M_e \cdot C_e \cdot (T_{e2} - T_{e1})}{I_{in} \cdot A_{in} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

Le rendement exergetique du cuiseur solaire est défini comme le rapport du gain d'exergie produite associée à l'eau chauffée de la température  $T_{e1}$  à la température  $T_{e2}$  à l'exergie de l'irradiation solaire incidente sur la surface d'ouverture du cuiseur solaire durant l'intervalle de temps considéré  $\Delta t$ .

A la température  $T_e$ , le flux du gain d'exergie de l'eau chauffée est donné par, [18]:

$$\dot{E}_x = M_e \cdot C_e \cdot dT_e \cdot (1 - T_{amb} / T_e) \quad (4)$$

En considérant constantes la chaleur spécifique de l'eau, ainsi que la température ambiante, le gain d'exergie lors de l'intervalle de temps  $\Delta t$  est calculé comme suit:

$$Ex_{out} = \int_{T_{e1}}^{T_{e2}} \dot{E}x = M_e \cdot C_e \cdot [(T_{e2} - T_{e1}) - T_{amb} \cdot \ln T_{e2}/T_{e1}] \quad (5)$$

L'exergie de l'irradiation solaire incidente sur la surface d'interception du cuiseur est calculée moyennant l'expression donnant le flux de l'énergie disponible du rayonnement solaire développée par Peleta [19], c'est-à-dire,

$$Ex_{in} = I_{in} \times \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_s} \right)^4 \right] \times A_{in} \cdot \Delta t \quad (6)$$

Pour l'intervalle du temps considéré, l'efficacité exergétique du cuiseur solaire sera alors:

$$\eta_{ex} = \frac{M_e \cdot C_e \times (T_{e2} - T_{e1}) - M_e \cdot C_e \times T_{amb} \times \ln T_{e2}/T_{e1}}{I_{in} \times \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_s} \right)^4 \right] \times A_{in} \cdot \Delta t} \quad (7)$$

Avec,  $T_s$ , la température de surface du soleil (6000 K).

Ces deux efficacités seront alors représentées graphiquement en fonction de la différence de température  $\Delta T$  entre la température moyenne de l'eau et la température ambiante relatives à chaque intervalle de temps  $\Delta t$ .

### 3. CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU PROTOTYPE

Les tests de caractérisation expérimentale ont été effectués sous l'ensoleillement naturel d'Adrar sur la plate-forme des essais de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien. Les performances thermiques du prototype du cuiseur solaire boîte à CPC ont été évaluées selon la procédure du standard international en effectuant des tests de chauffage d'eau comme montré en figure 1. Ces tests ont été effectués en cinq (05) jours au cours de la période allant du 24 février au 01 mars 2013.



**a-**Disposition des trois casseroles remplies d'eau et munies de thermocouples



**b-**Fixation du pyranomètre selon les recommandations du standard international

Fig. 1: Photographies du prototype du cuiseur solaire à CPC asymétrique installé sur un banc d'essai expérimental à l'URERMS d'Adrar

La surface d'interception  $A_{in}$  de notre cuiseur, telle que définie par le standard international introduit par Funk [5], est évaluée à  $0.712 \text{ m}^2$ . Alors la charge en eau sera de  $5 \text{ kg}$  ( $7 \text{ kg}$  par  $\text{m}^2$  de surface d'interception) distribuée dans trois casseroles identiques.

Durant chaque test, la température de l'eau, la température ambiante, ainsi que l'éclairement solaire global mesuré sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire direct normal ont été mesurés.

La figure 2 montre les résultats obtenus lors d'un test (26 février 2013) parmi les 05 effectués. En exploitant tous les résultats obtenus durant les 05 tests; les puissances de cuisson ajustées ont été calculées et tracées en fonction de la différence de température  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), entre l'eau et l'ambiance, en figure 3. A partir de cette figure, nous déduisons la relation qui donne la puissance de cuisson ajustée  $P_{aj}$  (W) en fonction de la différence de température  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ):

$$P_{aj} = 136.28 - 1.142 \Delta T \quad \dots\dots(8)$$

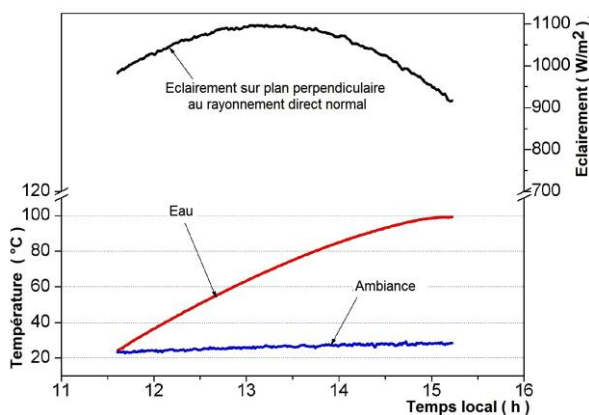


Fig. 2: Variation de l'éclairement solaire, de la température ambiante et de la température de l'eau, lors du test de chauffage de  $5 \text{ kg}$  d'eau (26/02/2013)

La valeur du coefficient de détermination de la régression linéaire  $R^2 = 0.936$  satisfait l'exigence du standard (supérieur à 75 %) et la puissance de cuisson standardisée (puissance à  $50^{\circ}\text{C}$ ) est de  $78.9 \text{ W}$ .

Au **Tableau 1**, la puissance standardisée de notre cuiseur solaire est comparée à celles d'autres cuiseurs solaires de type boîte développés ailleurs.

**Tableau 1:** Expression de la puissance de cuisson ajustée de notre cuiseur comparée à celle d'autres cuiseurs de type boîte développés ailleurs

Référence	Puissance de cuisson ajustée (W)	Puissance de cuisson standardisée (W)
Funk [5]	$P_{aj} = 125 - 1.58 \Delta T$	46
El-Sebaï and Ibrahim [20]	$P_{aj} = 103.62 - 1.598 \Delta T$	24.02
Mahavar <i>et al.</i> [21]	$P_{aj} = 103.5 - 1.474 \Delta T$	29.8
Notre cuiseur	$P_{aj} = 136.28 - 1.142 \Delta T$	78.9

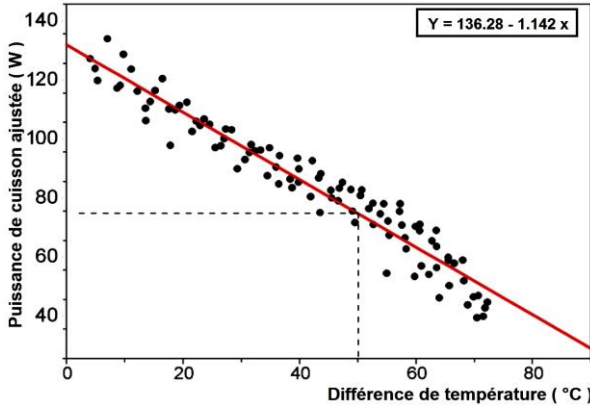


Fig. 3: Relation entre la puissance de cuisson ajustée  $P_{aj}$  (W) et la différence de température  $\Delta T$  (°C) pour notre cuiseur solaire

### 4. ANALYSE EXERGETIQUE

En exploitant tous les résultats obtenus durant les 05 tests expérimentaux effectués durant la période allant du 24 février au 01 mars 2013, les rendements énergétique et exergetique ont été calculés pour les intervalles de temps de 10 minutes moyennant les équations (3) et (7). A titre indicatif, les résultats expérimentaux obtenus lors de la journée du 26/02/2013, dont les évolutions du rayonnement solaire, ainsi que de la température ambiante sont présentées à la figure 2, sont résumés sur le **Tableau 2**.

**Tableau 2:** Résumé des résultats du test du 26/02/ 2013  
Les paramètres sont calculés en intervalles de 10 minutes

Rendement exergetique $\eta_{ex}$ maximum- <b>2.435 %</b>			
	Exergie produite	Température de l'eau	Différence de température
	<b>10.552 kJ</b>	<b>352.3 K</b>	<b>52.7 K</b>
Rendement exergetique $\eta_{ex}$ maximum- <b>0.387 %</b>			
	Exergie produite	Température de l'eau	Différence de température
	<b>1.543 kJ</b>	<b>300.4 K</b>	<b>4.1 K</b>
Rendement exergetique $\eta_{ex}$ maximum- <b>26.532 %</b>			
	Exergie produite	Température de l'eau	Différence de température
	<b>13.01 kJ</b>	<b>300.4 K</b>	<b>4.1 K</b>
Rendement exergetique $\eta_{ex}$ maximum- <b>5.365 %</b>			
	Exergie produite	Température de l'eau	Différence de température
	<b>30.557 kJ</b>	<b>370.5 K</b>	<b>69.4 K</b>

Les variations instantanées des rendements, énergétique et exergetique en fonction du temps sont montrées à la figure 4.

Comme pour tout système solaire, le rendement énergétique de notre prototype de cuiseur solaire décroît linéairement avec le temps au fur et à mesure que la température s'élève et les pertes thermiques augmentent.

Le rendement exergetique du cuiseur est nettement plus faible. Il a l'allure de l'éclairement solaire et présente un maximum au cours du test.

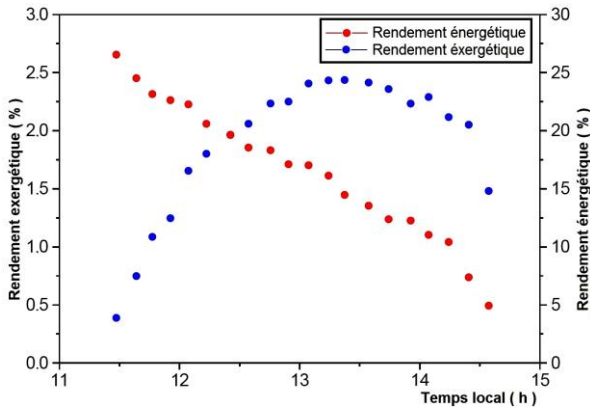


Fig. 4: Variation du rendement énergétique  $\eta_{en}$  et du rendement exergetique  $\eta_{ex}$  en fonction du temps (26/02/2013)

Afin d'avoir une idée sur la valeur de la température de l'eau quand ce maximum est atteint, on présente, à la figure 5, l'évolution du rendement exergetique en fonction de la différence de température entre l'eau et l'ambiance. Après un lissage des points expérimentaux par un polynôme du second degré, nous déduisons que la valeur maximale du rendement exergetique (2.435 %) a été atteinte quand la différence de température entre l'eau et l'ambiance a atteint 48.6 °C.

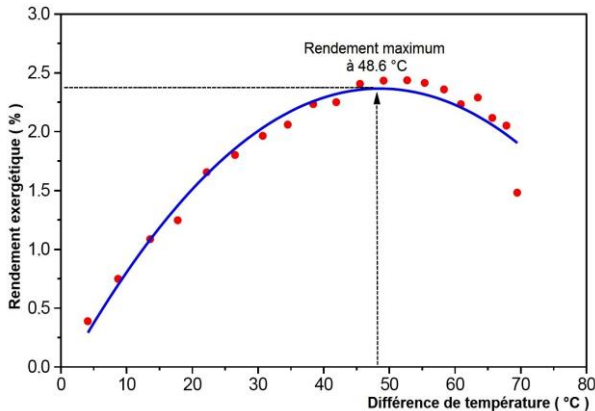


Fig. 5: Variation du rendement exergetique  $\eta_{ex}$  en fonction de la différence de température entre l'eau et l'ambiance (26/02/2013)

Bejan [22] a montré que: 'Dans une installation de collecteurs avec inertie thermique, la température optimale pour l'exergie produite maximale doit varier parallèlement à l'insolation. Ceci signifie que la température du collecteur devrait être maximum au moment où l'insolation atteint son pic'.

On déduit par là que pour un cuiseur solaire 'exergetiquement optimisé', son rendement exergetique maximum doit être atteint quand l'éclairement solaire incident sur sa surface d'interception atteint son pic. Comme montré sur la figure 6, l'écart temporel entre les deux pics doit être minimal. Pour le cas de notre prototype, cet écart est de 8 minutes.

Moyennant les résultats expérimentaux obtenus lors du test du 26/02/2013 et comme proposé par Kumar [14], le facteur de qualité, le pic en gain de puissance d'exergie et le

coefficient des pertes de chaleur sont également évalués. Le pic en gain de puissance d'exergie est défini comme le gain maximal en puissance d'exergie obtenu par la courbe de lissage en traçant le graphe reliant le gain en puissance d'exergie ( $Ex_{out} / \Delta t$ ) et la différence de température moyenne de l'eau et la température ambiante à chaque intervalle (Fig. 7).

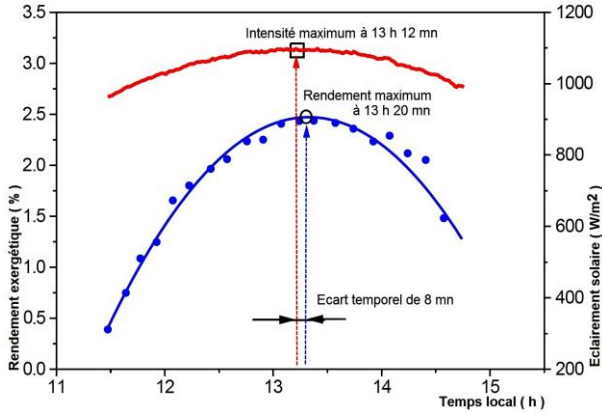


Fig. 6: Variation du rendement exergetique  $\eta_{ex}$  et de l'éclairement solaire incident sur la surface d'interception du cuiseur en fonction du temps (26/02/2013)

Les pertes en puissance d'exergie (le second terme au numérateur de l'expression de l'efficacité exergetique, donnée en équation (7), rapporté à l'intervalle de temps  $\Delta t$ ) sont présentées en fonction de la différence de température en figure 8. Le facteur de qualité est alors défini comme le rapport du pic en gain de puissance d'exergie aux pertes en puissance d'exergie à la même différence de température.

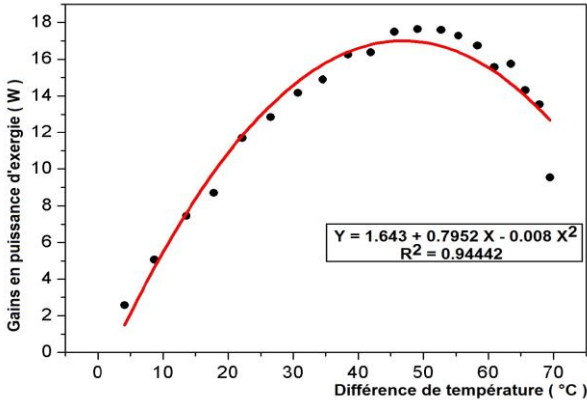


Fig. 7: Variations du gain en puissance d'exergie de notre cuiseur en fonction de la différence de température (26/02/2012)

A partir de la figure 7, on détermine le pic en gain de puissance d'exergie. Il est de 21.4 W à 49.70 °C et à partir de la figure 8, les pertes en puissance d'exergie à la même différence de température est de 99.05 W. Le facteur de qualité est alors égal à 0.216.

Le coefficient des pertes de chaleur est calculé en rapportant la pente de la droite de lissage obtenue en traçant le graphe des pertes de puissance d'exergie en fonction de la



différence de température, à la surface d'ouverture du cuiseur ( $0.462 \text{ m}^2$ ). Il est alors égal à  $4.09 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ces différents indices de performance sont comparés à ceux d'autres cuiseurs développés ailleurs au **Tableau 3**. La comparaison des indices montre que notre prototype est très efficace avec un facteur de qualité exceptionnel.

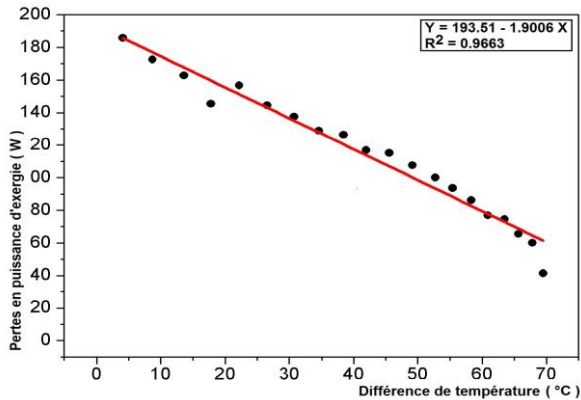


Fig. 8: Variations des pertes en puissance d'exergie de notre cuiseur en fonction de la différence de température (26/02/2012)

**Tableau 3:** Comparaison des indices de performances, selon Kumar [14], de notre cuiseur avec ceux développés ailleurs

Type de cuiseur	Indicateurs				
	Pic puissance d'exergie (W)	Coef. Pertes de chaleur ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Facteur de qualité	$\eta_{\text{ex}}$ max. (%)	$\eta_{\text{en}}$ max. (%)
Cuiseur solaire en forme pyramide tronquée [14] M=2 kg	7.12	4.09	0.15	3.89	36.38
Cuiseur solaire boîte domestique [16] M=2.5 kg	6.46	5.24	0.123	---	---
SK-14 (domestique) [16] M=6.3 kg	18.21	40.35	0.106	---	---
Cylindro-parabolique [16] M=6.3 kg	6.92	54.12	0.087	---	---
Scheffler (commun.) [16] M=20 kg	55.75	47.73	0.099	---	---
<b>Notre cuiseur M=5kg</b>	<b>21.40</b>	<b>4.12</b>	<b>0.216</b>	<b>2.43</b>	<b>27.15</b>

## 5. NOUVEAUX INDICES POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES CUISEURS SOLAIRES

Partant des analyses énergétiques effectuées et du fait que les différents standards disponibles, en matière d'évaluations et de comparaisons des performances des cuiseurs solaires, ne prennent en considération que l'aspect énergétique du système, alors une proposition complémentaire tenant compte de l'aspect exergétique du système serait très utile pour l'évaluation des performances des cuiseurs solaires.

En se basant sur l'efficacité énergétique et sur la condition d'optimisation énergétique introduite par Bejan [22], nous faisons une nouvelle proposition de deux (02) indices de performance énergétique à déterminer expérimentalement en suivant les recommandations du standard international de test et évaluation des performances des cuiseurs solaires [5].

En considérant les résultats des 05 tests expérimentaux effectués; l'évolution du rendement énergétique de notre prototype de cuiseur solaire en fonction de la différence de température  $\Delta T$  est présentée sur la figure 9. Le lissage du nuage de points a donné l'expression suivante:

$$\eta_{ex} = -69.693 + 10.853 \Delta T - 0.407 (\Delta T)^2 \quad (9)$$

La valeur du coefficient de détermination du lissage des points  $R^2 = 0.920$ . Quand le rendement énergétique atteint son maximum, alors,

$$\frac{d\eta_{ex}}{d\Delta T} = 0 \quad (10)$$

Le rendement énergétique maximum  $\eta_{ex-max}$  est alors égal à 2.505 % et est atteint à la différence de température  $\Delta T_{max}$  de 51 °C. Le cuiseur solaire dont le rendement  $\eta_{ex-max}$  le plus élevé atteint à la plus élevée différence de température  $\Delta T_{max}$  est le plus efficace et le plus performant. On définit alors le premier indice de performance qui sera dénommé facteur d'efficacité énergétique '  $F_{ee}$  ',

$$F_{ee} = \frac{\Delta T_{max} (\text{°C}) \times \eta_{ex-max} (\%) }{100} \quad (11)$$

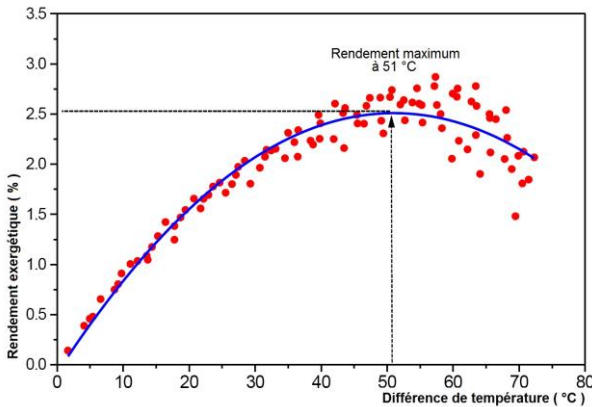


Fig. 9: Relation entre le rendement énergétique et la différence de température pour notre prototype de cuiseur solaire

Sachant qu'en général, les valeurs du rendement énergétique des cuiseurs solaires boîtes sont petites (valeurs allant de 1 à 4 %) [7-16] et que la différence de température maximale, dans les conditions de tests du standard international, ne peut dépasser 70 °C, alors  $F_{ee}$  varie de 0 à 3 au maximum comme limite supérieure. Dans le cas de notre prototype,  $F_{ee} = 1.277$  °C.

Selon la bibliographie consultée, la valeur limite inférieure de la différence de température maximale est de l'ordre de 45 °C. On peut alors définir une limite

inférieure d'acceptation pour le facteur d'efficacité exergetique, qui est égale à  $0.45^\circ\text{C}$ . C'est le minimum comme limite inférieure.

Les nuages de points représentant les évolutions de l'éclairement solaire incident sur la surface d'interception du cuiseur et du rendement exergetique de ce dernier en fonction du temps sont présentés sur la figure 10. Le lissage des points par polynômes du second degré a donné les résultats suivants:

Pour l'éclairement solaire-

$$I_{in} = -6931.67 + 1220.88 t - 46.69 t^2$$

avec un coefficient de détermination,  $R^2 = 0.596$ .

Pour le rendement exergetique-

$$\eta_{ex} = -77.79 + 12.016 t - 0.4495 t^2$$

avec un coefficient de détermination,  $R^2 = 0.738$ .

Les maximums sont déterminés moyennant les dérivées des deux équations (12) et (13):

- Le pic de l'éclairement solaire a été atteint à 13 h 40 minutes.
- Le pic du rendement exergetique a été atteint à 13 h 22 minutes.

L'écart temporel 'ET' est alors de 18 minutes. C'est le deuxième indice de performance. Plus cet indice est faible plus le cuiseur, dont le premier indice est satisfaisant, est meilleur.

En exploitant les résultats expérimentaux donnés par Kumar [14], nous avons déterminé les valeurs de ces deux indices de performance pour le cas du cuiseur solaire boîte en forme de pyramide tronquée développé par Kumar [14]. Une comparaison est présentée au **Tableau 4**.

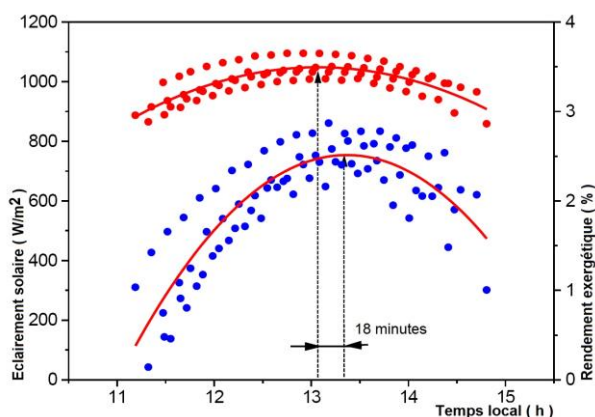


Fig. 10: Evolutions de l'éclairement solaire incident sur la surface d'interception de notre prototype et de son rendement exergetique en fonction du temps

**Tableau 4:** Valeurs des deux indices de performances 'F<sub>ee</sub>' et 'ET' de notre cuiseur comparées à celles du cuiseur en forme de pyramide tronquée

Références	Premier indice F <sub>ee</sub> (°C)	Second indice ET (mn)
Kumar [14], m=2kg	1.597	55
Notre cuiseur, m=5kg	1.277	18

La comparaison montre que les indices de performance des deux cuiseurs sont proches. Mais notre prototype de cuiseur solaire, qui reste absolument stationnaire durant son utilisation et dont la charge admissible est nettement supérieure, est meilleur d'autant plus que l'indice 'ET' relatif à l'optimisation exergetique énoncée par Bejan [22] est meilleur.

## 6. CONCLUSION

Le prototype du cuiseur solaire doté d'un CPC asymétrique, conçu pour fonctionner en position fixe durant toute l'année, a été testé expérimentalement sous l'ensoleillement réel d'Adrar.

Les différents essais ont été effectués en suivant les recommandations du standard international de test et évaluation des cuiseurs solaires. Son analyse exergetique expérimentale a été également effectuée.

Ces performances, comparées à celles d'autres cuiseurs solaires de type boîte développés ailleurs, montrent que notre cuiseur est original et est très efficace d'autant plus qu'il peut être intégré au mur de la cuisine d'une habitation. Il pourrait être alors exploité sans avoir recours à sortir sous le soleil.

## NOMENCLATURE

$A_{in}$ , Surface d'interception- $m^2$	$C_e$ , Chaleur massique de l'eau- J/kgK
$E_{out}$ , Energie de chauffage de l'eau- J	$Ex_{out}$ , Gain d'énergie de l'eau chauffée- J
$E_{in}$ , Energie solaire incidente sur la surface du cuiseur- J	$Ex_{in}$ , Exergie de l'irradiation solaire incidente sur la surface du cuiseur- J
ET, Ecart temporel- mn	$F_{ee}$ , Facteur d'efficacité exergetique
$F_q$ , Facteur de qualité	$I_{in}$ , Eclairage solaire global, $W/m^2$
$M_e$ , Masse d'eau- kg	T, Température- K
$P_{aj}$ , Puissance de cuisson ajoutée, W	$P_s$ , Puissance de cuisson standardisée, W
t, Temps- s	$\eta$ , Rendement thermique global
$\eta_{en}$ , Efficacité énergétique	$\eta_{ex}$ , Efficacité exergetique
$\Delta t$ , Intervalle, s	$\Delta T$ , Différence de température, K
amb, Ambiance	e, Eau - s, Soleil
$e_2$ , Finale de l'eau	$e_1$ , Initiale de l'eau

## REFERENCES

- [1] El Kahbar, 'Quotidien National d'Informations', 12/12/2009.
- [2] S.S. Nandwani, 'Solar Cookers-Cheap Technology with High Ecological Benefits', Ecological Economics, Vol. 17, N°2, 73 – 81, 1996.
- [3] A. Harmim, M. Merzouk, M. Boukar et M. Amar, 'Développement et Expérimentation d'un Nouveau Cuiseur Solaire Stationnaire', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°2, pp. 337 – 346, 2013.
- [4] S.C. Mullick, T.C. Kandpal and A.K. Saxena, 'Thermal Test Procedure for Box-Type Solar Cookers', Solar Energy, Vol. 38, N°4, pp. 353 – 360, 1987.

- [5] P.A. Funk, 'Evaluating the International Standard Procedure for Testing Solar Cookers and Reporting Performance', Solar Energy, Vol. 68, N°1, pp. 1 – 7, 2000.
- [6] M. Grupp *et al.*, 'Solar Cooker Test Procedure', Version 2. ECSCR, 1993.
- [7] A.K. Pandey, V.V. Tyagi, S.R. Park and S.K. Tyagi, 'Comparative Experimental Study of Solar Cookers Using Exergy Analysis', Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 109, N°1, pp. 425 – 431, 2012.
- [8] H.H. Öztürk, 'Second Law Analysis for Solar Cookers', International Journal of Green Energy, Vol. 1, N°2, pp. 227 – 239, 2004.
- [9] H.H. Öztürk, 'Experimental Determination of Energy and Exergy Efficiency of the Solar Parabolic-Cooker', Solar Energy, Vol. 77, N°1, pp. 67 - 71, 2004.
- [10] R. Petela, 'Exergy Analysis of the Cylindrical-Parabolic Cooker', Solar Energy, Vol. 79, N°3, pp. 221 – 233, 2005.
- [11] A. Mawire, M. McPherson and R.R.J. Van den Heetkamp, 'Simulated Energy and Exergy Analysis of the Charging of an Oil-Pebble Bed Thermal Energy Storage System for a Solar Cooker', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 92, N°12, pp. 1668 – 1676, 2008.
- [12] S.C. Kaushik and M.K. Gupta, 'Energy and Exergy Efficiency Comparison of Community-Size and Domestic-Size Paraboloidal Solar Cooker Performance', Energy and Sustainable Development, Vol. 12, N°3, pp. 60 – 64, 2008.
- [13] S.K. Shukla, 'Comparison of Energy and Exergy Efficiency of Community and Domestic Type Parabolic Solar Cookers', International Journal of Green Energy, Vol. 6, N°5, pp. 437 – 449, 2009.
- [14] N. Kumar, G. Vishwanath and A. Gupta, 'An Exergy Based Test Protocol for Truncated Pyramid Type Solar Cooker', Energy, Vol. 36, N°9, pp. 5710 – 5715, 2011.
- [15] N.L. Panwar, S.C. Kaushik and S. Kothari, 'Experimental Investigation of Energy and Exergy Efficiencies of Domestic Size Parabolic Dish Solar Cooker', Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 4, pp. 23111 – 23118, 2012.
- [16] N. Kumar, G. Vishwanath and A. Gupta, 'An Exergy Based Unified Test Protocol for Solar Cookers of Different Geometries', Renewable Energy, Vol. 44, pp. 457 – 462, 2012.
- [17] N. Kumar, G. Vishwanath and A. Gupta, 'Effect of Load Variations on Exergy Performance of Solar Box Type Cooker', Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 4, pp. 53125 – 53129, 2012.
- [18] A. Bejan, 'Advanced Engineering Thermodynamics', Third Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2006.
- [19] R. Petela, 'Exergy of Undiluted Thermal Radiation', Solar Energy, Vol. 74, N°6, pp. 469 – 488, 2003.
- [20] A.A. El-Sebaili and A. Ibrahim, 'Experimental Testing of a Box-Type Solar Cooker using the Standard Procedure of Cooking Power', Renewable Energy, Vol. 30, N°1, pp. 1861 – 1871, 2005.

- [21] S. Mahavar, N. Sengar, P. Rajawat, M. Verma and P. Dashora, '*Design Development and Performance Studies of a Novel Single Family Solar Cooker*', Renewable Energy, Vol. 47, pp. 67 – 76, 2012.
- [22] A. Bejan, '*Extraction of Exergy from Solar Collectors under Time-Varying Conditions*', International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.3, N°2, pp. 67 – 72, 1982.