

Design et test expérimental d'un concentrateur parabolique composé non-symétrique pour la cuisson solaire

A. Harmim^{*}, M. Merzouk¹, M. Boukar et M. Amar

Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URER/MS
B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie

¹ Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Saad Dahlab, B.P. 270, Blida, Algérie

(reçu le 30 Juin 2011 – accepté le 26 Décembre 2011)

Résumé - Notre travail s'inscrit dans le cadre du développement et de la vulgarisation de la cuisson solaire en milieu saharien. Un nouveau prototype a été construit par des moyens simples et des matériaux disponibles; il s'agit d'un cuiseur solaire de type boîte doté d'un Concentrateur Parabolique Composé (CPC) non-symétrique. Dans ce papier, on expose les résultats obtenus de l'expérimentation de ce prototype qui a été effectuée à Adrar. Les résultats obtenus par les différents tests sont satisfaisants et encourageants d'autant plus que ce prototype fonctionne efficacement durant une longue période journalière sans aucun ajustement d'orientation.

Abstract - Our work deals with development and popularization of solar cooking in Saharan medium. A novel prototype was built by simple means and available materials; it is of box-type equipped with asymmetric Compound Parabolic Concentrator (CPC) as booster-reflector. In this paper we expose the results obtained by the experimentation of this prototype which was carried out in Adrar. The results obtained by the various tests are satisfactory and encouraging more especially as this solar cooker effectively functions during a long period per day without any orientation adjustment.

Mots clés: CPC non-symétrique - Cuiseur solaire boîte - Expérimentation - Performances.

1. INTRODUCTION

En tenant compte des résultats de nos travaux publiés précédemment, [1-4], l'activité actuelle est orientée vers le développement d'une autre gamme de cuiseurs solaires adaptés au milieu saharien. Un effort considérable est consacré pour les travaux visant l'amélioration de la concentration du rayonnement solaire tout en réduisant l'ajustement du cuiseur pendant la durée de son exploitation journalière. Suite à une large consultation de la bibliographie disponible en matière de concentration appliquée aux systèmes solaires, notre choix s'est fixé sur le cas du Concentrateur Parabolique Composé 'CPC' non-symétrique.

Depuis la démonstration de la faisabilité du CPC en 1974, [5], plusieurs articles traitant l'analyse, le design et l'optimisation de ce type de collecteur ont été publiés, [6]. Le CPC a été utilisé comme réflecteur dans différents systèmes solaires. En effet, le design du CPC peut être fait pour différentes formes d'absorbteurs: plan à une seule face, plan à deux faces, ainsi que tubulaire, [5].

Il y a deux types de CPC, symétriques et non-symétriques, [7]. Les CPC non-symétriques ont été conçus pour intercepter un maximum de rayonnement solaire direct

* arezki.harmim@yahoo.fr

et diffus dans des positions statiques. Dans ce papier, on présente une application originale d'un CPC non-symétrique utilisé comme réflecteur d'un cuiseur solaire de type boîte.

Un premier prototype de ce type de cuiseur a été réalisé avec les moyens disponibles au niveau de l'URER/MS d'Adrar. On présente son design, ainsi que les résultats des tests expérimentaux effectués sur ce prototype afin d'évaluer ses performances et juger sa faisabilité.

2. DESCRIPTION DU CUISEUR SOLAIRE A CPC NON-SYMETRIQUE

Comme montré sur les figures 1 et 2, un cuiseur solaire à CPC non-symétrique se compose principalement d'une plaque chauffante disposée dans un boîtier thermiquement isolé par le bas et doté d'un double vitrage sur la face avant.

Deux réflecteurs en forme de branche paraboliques sont fixés sur le boîtier de telle sorte à réfléchir le rayonnement solaire incident sur la surface d'ouverture du système vers la plaque chauffante.

La disposition des deux branches paraboliques est montrée sur la figure 2. A la différence d'un CPC symétrique, les axes des deux branches paraboliques ne sont pas parallèles.

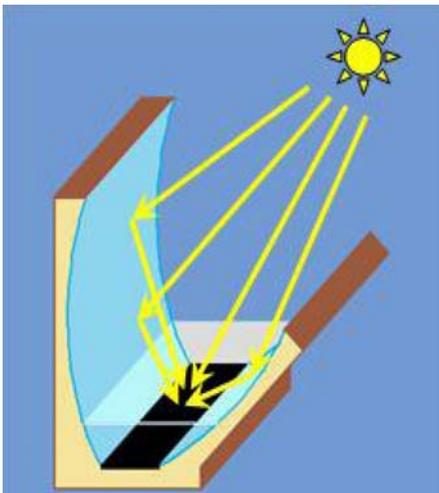


Fig. 1: Schéma descriptif d'un cuiseur solaire boîte utilisant un CPC non-symétrique comme réflecteur

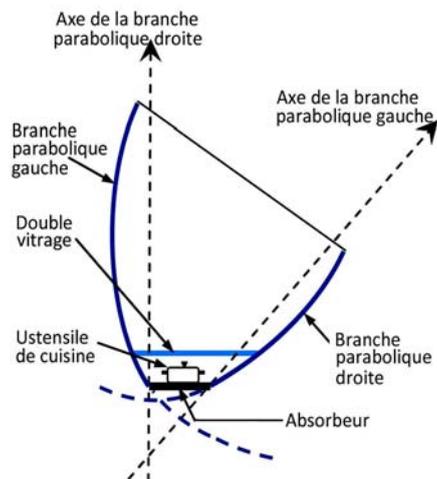


Fig. 2: Schéma descriptif montrant la disposition des branches paraboliques d'un CPC non-symétrique utilisé pour un cuiseur solaire

3. CONCEPTION ET REALISATION DU PROTOTYPE ETUDIE

Pour un design optimal d'un cuiseur solaire à CPC non-symétrique à installer à Adrar, la géométrie des réflecteurs doit être optimisée de telle sorte à permettre au cuiseur de fonctionner en position fixe durant toute l'année avec une orientation plein sud.

Cette configuration doit maximiser le gain énergétique journalier durant une période de 5 heures autour de midi TSV. C'est-à-dire que la durée d'exploitation du cuiseur est prévue de 9 h 30 à 14 h 30.

Pour cela, l'angle d'acceptation du CPC est déterminé en tenant compte de la hauteur du soleil de telle sorte à pouvoir intercepter tous les rayons solaires dont la hauteur est entre un seuil minimal qui correspond à la valeur minimale de la hauteur du soleil à 9 h 30 (en période hivernale) et un seuil maximal qui correspond à la valeur maximale de la hauteur du soleil à midi (en période estivale).

Pour ces deux moments de la journée représentative de chaque mois à Adrar, la hauteur du soleil a été calculée.

La hauteur maximale est égale à 85° en Juin et la hauteur minimale est de 27.5° en Décembre. Pour des valeurs pratiques, on prend 85° et 30° .

Tel qu'il est montré sur la figure 3, l'axe de la parabole de gauche 'G' fait un angle θ_G par rapport à la normale de l'absorbeur 'S', représentant le demi-angle d'acceptation de la parabole de gauche. Sachant que la limite angulaire minimale est de 30° , des rayons solaires à intercepter, la valeur de l'angle θ_G sera égale à 60° .

L'axe de la parabole de droite 'D' fait un angle θ_D par rapport à la normale de l'absorbeur 'S', qui représente le demi-angle d'acceptation de la parabole de droite. En tenant compte de la limite angulaire maximale (85°) des rayons solaires à intercepter, la valeur de cet angle θ_D serait égale à 5° .

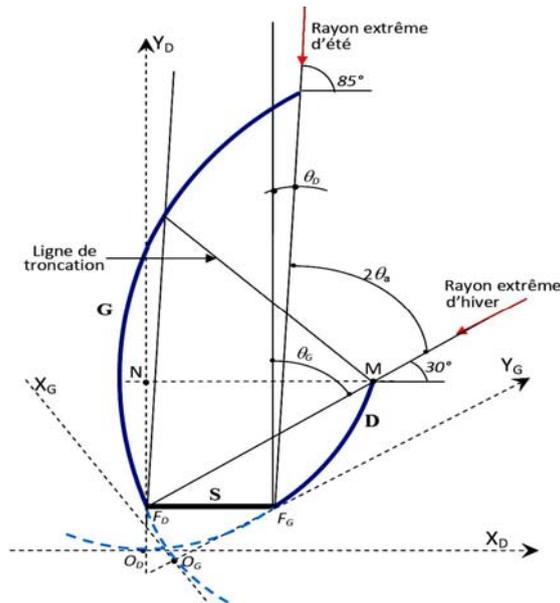


Fig. 3: Schéma définissant la géométrie du CPC non-symétrique

Ce collecteur accepte tous les rayons solaires incidents entre 30° et 85° par rapport à l'horizontale. L'angle d'ouverture de CPC non-symétrique sera alors:

$$2\theta_a = \theta_G - \theta_D = 55^\circ \quad (1)$$

Ce qui donne un facteur de concentration géométrique selon, Rabl [7], de:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_a} = 2.16 \quad (2)$$

On note, respectivement pour la parabole de gauche 'G', et la parabole de droite 'D':

- F_G et F_D , le point focal;

- f_G la distance focale ($\overline{O_G F_G}$) et f_D la distance focale ($\overline{O_D F_D}$).

Dans le repère ($X_G O_G Y_G$), l'équation de la parabole de gauche est donnée par:

$$y = \frac{1}{4 f_G} \times x^2 \quad (3)$$

Puis, on calcule la distance focale f_G , les coordonnées du point $F_D (X_D, Y_D)$ en fonction de la largeur de l'absorbeur 'S' et l'angle θ_G :

$$f_G = \frac{S}{2} \times (1 + \sin \theta_G) \quad (4)$$

$$Y_D = \frac{S}{2} \times (1 - \sin \theta_G) \quad (5)$$

$$X_D = S \times \cos \theta_G \quad (6)$$

Dans le repère ($X_D O_D Y_D$), l'équation de la parabole de droite est donnée par:

$$y = \frac{1}{4 f_D} \times x^2 \quad (7)$$

Puis, on calcule la distance focale f_D , les coordonnées du point $F_G (X_G, Y_G)$ en fonction de la largeur de l'absorbeur 'S' et l'angle θ_D :

$$f_D = \frac{S}{2} \times (1 - \sin \theta_D) \quad (8)$$

$$Y_G = \frac{S}{2} \times (1 + \sin \theta_G) \quad (9)$$

$$X_G = S \times \cos \theta_D \quad (10)$$

Ces différentes relations nous ont permis de dessiner la forme géométrique du CPC avec une plaque absorbante de largeur $S = 0.3$ m. Un gabarit a été alors construit et utilisé pour faire le traçage des deux branches paraboliques sur du bois à découper pour construire les deux réflecteurs.

Un soin particulier a été observé lors du découpage du bois pour minimiser les pertes optiques au niveau du réflecteur, réalisé en morceaux rectangulaires de miroirs fixés sur le cadre en bois formé par les deux branches paraboliques.

La plaque absorbante, de forme rectangulaire et de dimension 0.3 m par 0.54 m, a été découpée sur une fine tôle d'aluminium peinte en noire. Elle est disposée horizontalement entre les focales des deux branches paraboliques et elle est thermiquement isolée vers le bas par la paroi du plancher sur lequel est fixé le réflecteur.

La couverture transparente horizontale est constituée d'un double vitrage en verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur avec un espace de 3 cm entre les deux vitres. Cette couverture est disposée entre les deux branches paraboliques à une distance de 20 cm de la plaque absorbante.

Les deux parois de côté, dont l'une d'elles constitue la portière du boîtier de cuisson, sont réalisées en bois tapissé d'une très fine feuille d'Aluminium peinte en noire. La portière est dotée d'un joint résistant à des hautes températures et permettant une bonne étanchéité thermique.

Le premier prototype du cuiseur solaire à CPC non-symétrique ainsi réalisé à l'Unité d'Adrar est montré sur les photographies de la figure 4.



Fig. 4: Vues du prototype de cuiseur solaire à CPC non-symétrique

4. ETUDE EXPERIMENTALE

Afin d'évaluer les performances thermiques du prototype réalisé, des tests expérimentaux ont été effectués en l'ensoleillement naturel sur la plate-forme des essais de l'unité.

Durant chaque test, on mesure la température ambiante, la température de l'air interne du cuiseur et la température interne de l'ustensile de cuisine utilisé, ainsi que le rayonnement solaire incident sur le plan horizontal.

Pour la mesure de la température, on utilise des thermocouples de type K. Pour la mesure du rayonnement solaire global, on utilise un pyranomètre de type CM11.

Tous ces transducteurs sont reliés à une acquisition de données qui fait des lectures chaque 60 secondes.

Au cours de la première campagne, nous avons programmé des tests de chauffage de l'eau à l'ébullition et des tests de chauffage de l'huile végétale de table. La campagne des tests s'est déroulée lors du mois de Juin 2011.

Notre prototype de cuiseur solaire a été installé sur la plate forme des essais expérimentaux de l'unité dans une position stationnaire avec un angle azimutal de -30° , c'est-à-dire un décalage de 02 heures à l'Est par rapport à une orientation plein sud. Cette orientation nous permet une exploitation matinale du cuiseur.

Afin de jauger la capacité de notre cuiseur, nous avons mené des tests de chauffage de 1 et 1,5 litres d'eau et 1,5 litres d'huile.

Afin de vérifier la possibilité d'exploiter notre cuiseur, sans ajustement d'orientation (en position stationnaire), sur une longue durée, nous avons mené des tests de chauffage de 1 litre d'eau portée à ébullition plusieurs fois de suite, c'est-à-dire : 1 litre deux fois de suite, 1 litre trois fois de suite et 1 litre quatre fois de suite.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 5 illustre les variations temporelles des températures respectives de l'air interne du cuiseur, de l'eau mise dans une casserole de cuisine déposée sur la plaque absorbante du cuiseur et de l'ambiance lorsque on porte à ébullition 1,5 litres d'eau, pour la journée du 07/06/2011 caractérisée par un vent très faible et un ciel clair comme montré par l'évolution de l'éclairement solaire global mesuré sur plan horizontal.

Le test a débuté à 11 h 50 min temps local. La température initiale de l'eau est de 32°C . Lors de ce test, le temps nécessaire pour atteindre l'ébullition est de 90 minutes. On remarque que la température de l'air interne reste toujours supérieure à celle de l'eau, dont la chaleur spécifique est très élevée. En fin de test, l'air atteint la température de 116°C pour une température ambiante de 35°C .

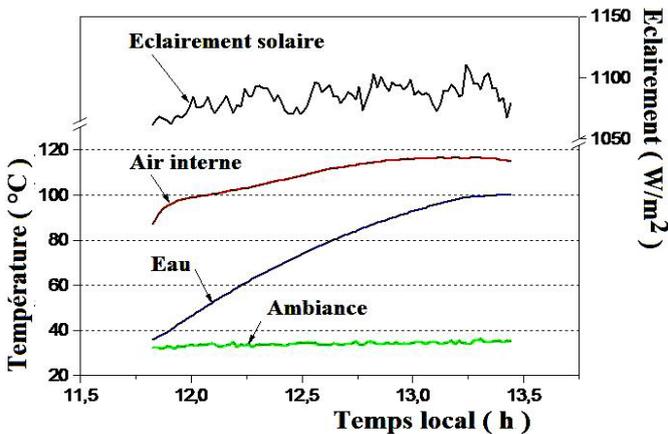


Fig. 5: Variation de la température de 1,5 litres d'eau portée à ébullition - Test du 07/06/11

La figure 6 illustre les variations temporelles des paramètres mesurés lors du chauffage à l'ébullition de 1 litre d'eau durant le test du 09/06/2011. Le test s'est déroulé sous un ciel clair avec un vent très calme. La température initiale de l'eau est de 34.7°C et le temps nécessaire pour atteindre l'ébullition est de 54 minutes.

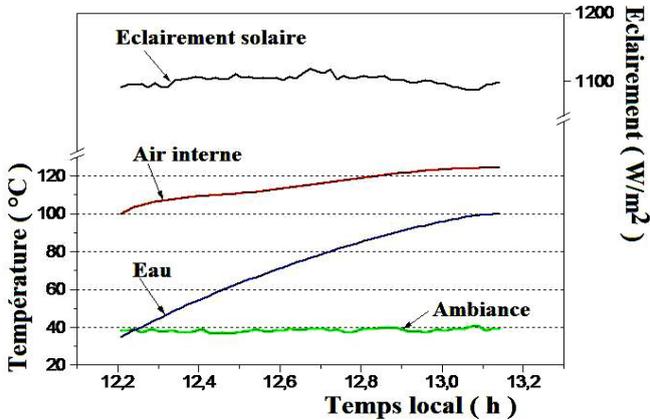


Fig. 6: Variation de la température de 1 litre d'eau portée à ébullition - Test du 09/06/11

En figure 7, nous présentons les variations temporelles des mêmes paramètres mentionnés précédemment, lorsque 1,5 litres d'huile est chauffée en stagnation, pour la journée du 14/06/2011 caractérisée par un vent très faible et un ciel clair.

Le test a débuté à 9 h 53 min temps local. La température initiale de l'huile est de 34,2 °C. Après 3 heures et 24 minutes (à 13 h 17 min) d'exposition au rayonnement solaire du cuiseur en position fixe, l'huile atteint la température de stagnation de 136,3 °C, sous une température ambiante de 44 °C.

On remarque qu'avant le niveau de température de l'ordre de 120 °C, la température de l'air interne est supérieure à celle de l'huile, mais au-delà, l'huile s'échauffe plus que l'air interne, du fait que sa chaleur spécifique n'est pas très importante. On remarque également que l'exploitation du cuiseur peut débuter même avant 10 h temps local qui correspond à 9 h temps solaire vrai en cette période de l'année.

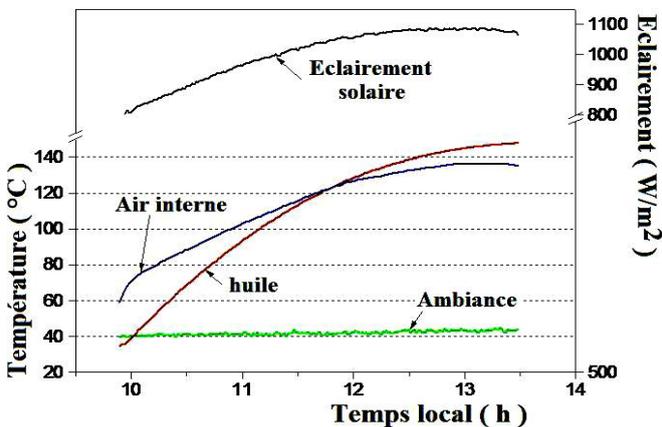


Fig. 7: Variation de la température de 1,5 litres d'huile En stagnation - Test du 14/06/11

En comparaison avec les performances des autres cuiseurs de type boîte équipés de réflecteurs nécessitant des ajustements périodiques de 20 à 60 minutes pour un meilleur fonctionnement, le prototype fonctionne en position stationnaire durant toute la durée d'exploitation.

Ceci a été vérifié par la série de tests dont les résultats sont présentés aux figures 8, 9 et 10. Cette série de test porte sur le chauffage à l'ébullition de deux fois 1 litre d'eau (Fig. 8), trois fois 1 litre d'eau (Fig. 9) et quatre fois 1 litre d'eau (Fig. 10).

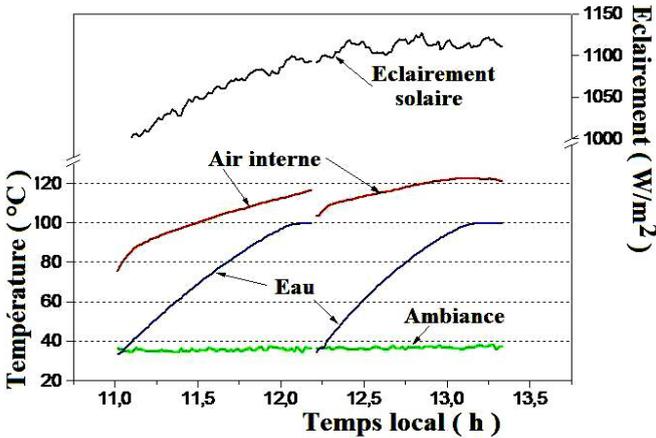


Fig. 8: Variation de la température de 1 litre d'eau portée à ébullition à deux fois de suite - Test du 08/06/11

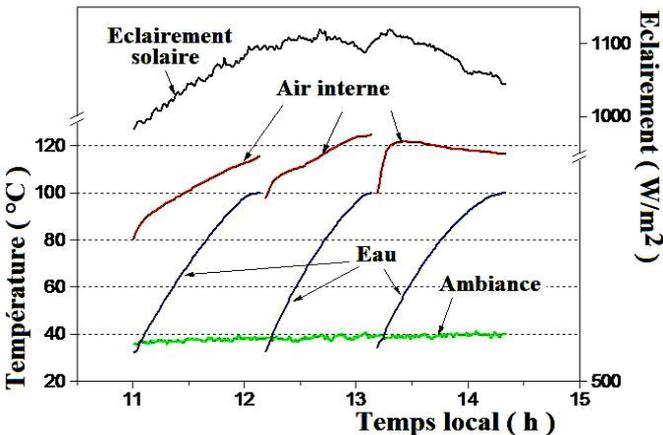


Fig. 9: Variation de la température de 1 litre d'eau portée à ébullition en trois fois de suite - Test du 09/06/11

On remarque que notre prototype peut être exploité efficacement pendant une durée supérieure à 5 heures par jour en position stationnaire sans aucun ajustement d'orientation.

Ce résultat est obtenu en période estivale, il est donc nécessaire de programmer une autre campagne de tests en période hivernale pour vérifier cette performance. D'autres

tests sont également nécessaires pour conclure sur l'efficacité de ce cuiseur quand il est exploité sous un ciel partiellement couvert.

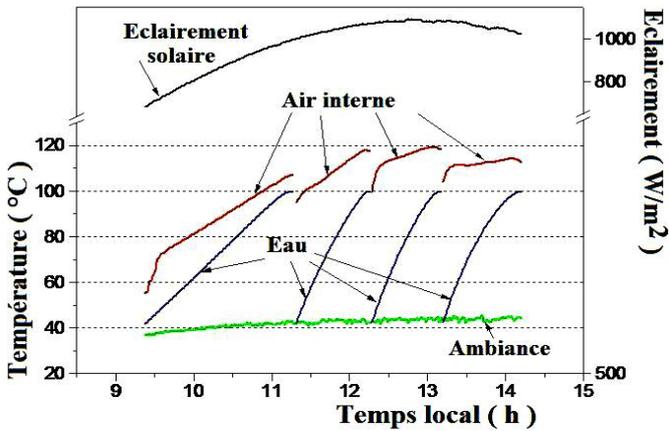


Fig. 10: Variation de la température de 1 litre d'eau portée à ébullition en quatre fois de suite - Test du 15/06/11

6. CONCLUSION

Le design d'un nouveau cuiseur solaire de type boîte doté d'un CPC non-symétrique a été présenté. Ce premier prototype a été réalisé par les moyens disponibles au niveau de l'unité. Les premiers tests expérimentaux pour l'évaluation de ces performances ont été effectués sur la plate forme des essais de l'URER/MS d'Adrar en période estivale.

Les résultats démontrent la faisabilité et la compétitivité de ce cuiseur qui fonctionne en position stationnaire sur une longue période de la journée, conférant la possibilité d'intégration à l'habitation.

Ces résultats sont encourageants et nous incitent à poursuivre cette voie de recherche pour l'amélioration de cette application du CPC.

REFERENCES

- [1] A. Harmim, M. Boukar et M. Amar, 'Etude Expérimentale d'un Cuiseur Solaire Boîte à Trois Réflecteurs Plans et une Surface d'Ouverture Inclinée', Revue des Energies Renouvelables, Vol 10, N°1, pp 31 – 38, 2007.
- [2] A. Harmim, M. Boukar and M. Amar, 'Experimental Study of a Double Exposure Solar Cooker with Finned Cooking Vessel', Solar Energy, Vol. 82, N°4, pp. 287 – 289, 2008.
- [3] A. Harmim, M. Boukar et M. Amar, 'Augmentation du Gain Energétique d'un Cuiseur Solaire à Double Exposition', Revue des Energies Renouvelables, Colloque International sur les Energies Renouvelables, 'CER'07', pp. 233 – 236, Oujda, Maroc, 4 - 5 Mai 2007.
- [4] A. Harmim, M. Boukar et M. Amar, 'Construction et Expérimentation d'un Cuiseur Solaire à Double Exposition en Milieu Saharien', SIPE'8, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [5] A. Rabl, J. O'Gallagher and R. Winston, 'Design and Test of non-Evacuated Solar Collectors with Compound Parabolic Concentrators', Solar Energy, Vol. 25, N°4, pp. 335 – 351, 1980.

- [6] R. Tchinda and N. Ngos, '*A Theoretical Evaluation of the Thermal Performance of CPC with Flat One-Side Absorber*', International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, N°6, pp. 709 – 718, 2006.
- [7] A. Rabl, '*Comparison of Solar Concentrators*', Solar Energy, Vol. 18, N°2, pp. 93 – 111, 1976.