

Influence de l'inclinaison des parois réfléchissantes d'un capteur solaire thermique sur la température de l'absorbeur

Mamadou Saliou Diallo*, Pierre Faye, Cheikh Mbow, Mamadou Lamine Sow et Joseph Sarr

Groupe de Recherches sur les Transferts, GRT
Faculté des Sciences et Techniques,
Université Cheikh Anta Diop de Dakar, B.P. 5005 Dakar Fann, Sénégal.

(reçu le 22 Août 2012 – accepté le 22 Mars 2014)

Résumé - Nous présentons dans cet article une série de simulations menée sur un capteur solaire boîte qui a la forme d'une pyramide tronquée et renversée. Afin d'améliorer les performances thermiques, le capteur est muni d'un double vitrage et les parois latérales sont inclinées par rapport à la verticale et sont recouvertes d'un mince film d'aluminium. La variation de l'inclinaison des parois latérales a une nette influence sur la production de chaleur. Ainsi les résultats des différentes configurations sont présentés et une étude comparative a abouti au choix d'une configuration permettant d'obtenir la température la plus élevée.

Abstract - In this paper, various numerical simulations on a solar panel box, shaped as a shortened and reversed pyramid are investigated. In order to improve the thermal performances, the panel is provided with a double glazing; the inner lateral walls, covered with an aluminium film are inclined with respect to the vertical. The variation in the inclination of these lateral walls produces an obvious influence on the heat production. Therefore, the results of various simulations are reported and a comparative study resulted in the selection of the most efficient configuration.

Mots clés: Cuiseur - Capteur solaire - Performance thermique – Température - Inclinaison

1. INTRODUCTION

Parmi les grandeurs dont la connaissance s'avère indispensable pour caractériser un capteur solaire figurent:

- i) celles qui sont imposées:
 - le flux solaire incident
 - la vitesse du vent
 - la température ambiante
- ii) celles qui sont accessibles par la mesure:
 - le nombre de couvertures
 - la dimension du capteur
 - l'inclinaison du capteur et des parois latérales

Nous cherchons à déterminer leur influence sur le comportement du système. En raison de leur grand nombre, nous nous limiterons à étudier l'influence de l'inclinaison des parois sur la production de chaleur.

* mamasaliou@gmail.com

Les capteurs solaires de différents types ont fait l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales. Ils peuvent être utilisés dans beaucoup d'applications, telles que la cuisson de produits alimentaires, le séchage de produits agro-alimentaires, la stérilisation d'instruments médicaux, la production d'eau sanitaire.... Ces applications thermiques de l'énergie solaire exigent de la part des capteurs des rendements élevés. Dans le but d'améliorer les rendements des capteurs solaires, il est nécessaire de construire d'autres prototypes.

Dans ce cadre, les travaux de Semmar *et al.* [1] portent sur l'étude et la conception d'un capteur solaire à air destiné à la production d'air chaud. Pour cela, les auteurs ont adopté une approche théorique qui consiste à simuler le comportement du capteur par un programme informatique utilisant un modèle mathématique qui permet d'évaluer instantanément tous les paramètres caractérisant la performance du système durant la période d'ensoleillement.

Aoues *et al.* [2] proposent un capteur solaire plan à air dont le canal d'écoulement d'air est garni de rangées de chicanes. Leur étude a montré l'augmentation de l'échange thermique entre le fluide caloporteur et l'absorbeur et a permis d'optimiser les performances du capteur solaire.

Harmim *et al.* [3] ont proposé un cuiseur solaire dont la surface latérale extérieure est munie d'ailettes rectangulaires. Ils ont démontré que ce nouvel ustensile de cuisine réduit considérablement le temps de cuisson.

Par ailleurs, Diallo *et al.* [4] ont présenté une étude expérimentale et théorique d'un capteur solaire muni d'un double vitrage qui a la forme d'une pyramide tronquée et renversée. Les faces latérales sont inclinées et recouvertes d'un mince film d'aluminium.

Dans la présente étude, nous présentons une analyse théorique de l'influence de la variation de l'inclinaison des faces latérales sur la production de chaleur du capteur.

2. ANALYSE THEORIQUE

2.1 Description du capteur solaire

Le capteur est essentiellement réalisé à partir de plaques de bois en contre-plaqué, d'une tôle noircie et de vitrages. Il est composé des quatre sous-ensembles représentés sur la figure 1: le coffre, le bac intérieur, le couvercle du coffre, l'isolation.

Le coffre est réalisé avec du bois contreplaqué d'épaisseur 0.019 m; il a la forme d'un parallélépipède régulier.

Le bac intérieur est réalisé avec du bois contreplaqué d'épaisseur 0.015 m. Il a la forme d'une pyramide tronquée et renversée. Les faces latérales sont recouvertes d'un mince film d'aluminium permettant de réfléchir les rayons solaires incidents transmis par la couverture vers une tôle peinte en noir mât reposant au fond du bac (absorbeur).

Le couvercle est composé d'une paroi externe en plexiglas de 0.003 m d'épaisseur et d'une paroi interne en verre clair de 0.004 m d'épaisseur, espacés de 0.015 m. Cette disposition permet au système de résister aux chocs externes ainsi qu'aux températures internes relativement élevées produites en cours de fonctionnement. Cette double couverture transparente est utilisée essentiellement pour deux raisons:

- Elle isole- en l'absence du double vitrage, les pertes thermiques par convection et rayonnement de l'absorbeur sont importantes. Le rôle de la vitre est donc de limiter ces

perdes. L'espace optimal qu'il faut laisser entre la vitre et l'absorbeur est de 0.028 m (en pratique entre 0.025 et 0.040 m) [5].

- Elle réalise l'effet de serre- la vitre est transparente au rayonnement solaire et opaque au rayonnement émis par l'absorbeur. Ce rayonnement est absorbé par la vitre interne qui s'échauffe par conséquent et rayonne à son tour par toute sa surface (autant sur ses deux faces). Finalement la paroi absorbante recevra le rayonnement solaire incident augmenté d'une partie du rayonnement de la vitre interne.

L'isolation est réalisée dans l'espace compris entre le bac intérieur et le coffre. Cet espace occupe un volume de 0.16 m^3 . L'isolant est en laine de verre.

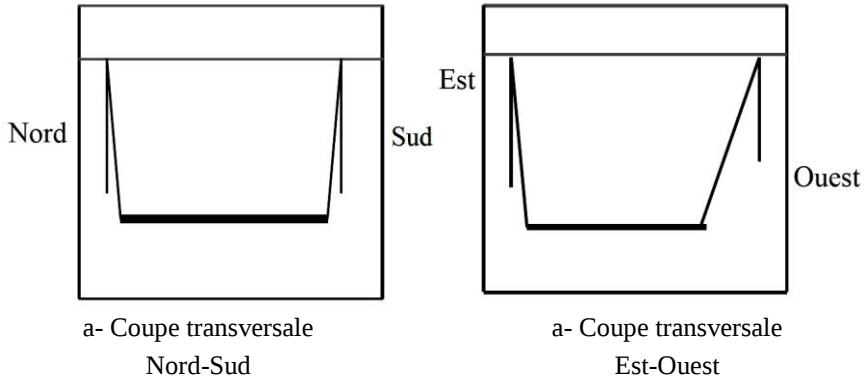


Fig. 1: Schéma du capteur solaire

2.2 Hypothèses simplificatrices

Le capteur solaire constitue un système énergétique complexe dans lequel la plupart des modes de transfert thermique sont mis en jeu.

Afin de simplifier l'analyse de notre système, certaines hypothèses sont posées:

- Au niveau des parois latérales réfléchissantes et isolées, les échanges de chaleur sont supposés négligeables,
- Les réflexions multiples à l'intérieur de la double couverture et au sein du bac intérieur sont négligeables,
- L'air au sein du capteur est transparent du point de vue radiatif,
- Les composantes du capteur ont initialement la même température que l'air ambiant
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux constituant le système sont constantes dans les marges de température de fonctionnement du capteur solaire.

2.3 Mécanisme de transfert de chaleur

Lorsque le capteur est exposé au soleil, le mécanisme de transfert de chaleur se fait dans les conditions suivantes:

- La couverture externe est soumise à l'effet du vent. Elle s'échauffe en absorbant le flux solaire incident et échange par convection forcée avec le vent extérieur. Elle échange par rayonnement à la fois avec le ciel et la couverture interne et par convection naturelle avec l'air entre les deux couvertures.

- La couverture interne absorbe le flux solaire incident transmis par la couverture externe. Elle échange par rayonnement à la fois avec la couverture externe et l'absorbeur et par convection naturelle avec l'air entre elle et la couverture externe et l'air confiné dans le caisson.
- L'absorbeur absorbe à la fois le flux solaire incident transmis par la double couverture et celui réfléchi par les parois latérales. Il échange par rayonnement avec la couverture interne, par convection naturelle avec la lame d'air statique et par conduction avec l'isolant.

Il est très important d'élever la température de l'absorbeur. Ceci peut être obtenu à partir de l'inclinaison des parois latérales en augmentant le flux solaire réfléchi sur l'absorbeur. Il s'agit de considérer différentes configurations avec différentes inclinaisons des parois latérales et de choisir la configuration optimale, c'est-à-dire celle qui engendre la température la plus élevée de l'absorbeur.

2.4. Bilans énergétiques

L'écriture des bilans énergétiques au niveau de chaque composante du capteur permet de construire un modèle mathématique. On aboutit aux trois équations suivantes:

Bilan énergétique sur la couverture extérieure

$$\frac{\partial T_{\text{cext}}}{\partial t} = \frac{\alpha_{\text{cext}} \times \Phi_i}{\rho_{\text{cext}} \times e_{\text{cext}} \times C_{\text{pext}}} + \frac{h_{\text{r}_{\text{ext}}} (T_{\text{ciel}} - T_{\text{cext}})}{\rho_{\text{cext}} \times e_{\text{cext}} \times C_{\text{pext}}} + \frac{h_{\text{cn}_{\text{ext}}} (T_{\text{amb}} - T_{\text{cext}})}{\rho_{\text{cext}} \times e_{\text{cext}} \times C_{\text{pext}}} + \frac{h_{\text{cn}_1} (T_{\text{cint}} - T_{\text{cext}})}{\rho_{\text{cext}} \times e_{\text{cext}} \times C_{\text{pext}}} + \frac{h_{\text{r}_{\text{cint-cext}}} (T_{\text{cint}} - T_{\text{cext}})}{\rho_{\text{cext}} \times e_{\text{cext}} \times C_{\text{pext}}} \quad (1)$$

Bilan énergétique sur la couverture intérieure

$$\frac{\partial T_{\text{cint}}}{\partial t} = \frac{\tau_{\text{cext}} \times \alpha_{\text{cext}} \times \Phi_i}{\rho_{\text{cint}} \times e_{\text{cint}} \times C_{\text{pcint}}} + \frac{h_{\text{r}_{\text{ab-cint}}} (T_{\text{ab}} - T_{\text{cint}})}{\rho_{\text{cint}} \times e_{\text{cint}} \times C_{\text{pcint}}} + \frac{h_{\text{cn}_2} (T_{\text{ab}} - T_{\text{cint}})}{\rho_{\text{cint}} \times e_{\text{cint}} \times C_{\text{pcint}}} + \frac{h_{\text{r}_{\text{cext-cint}}} (T_{\text{cext}} - T_{\text{cint}})}{\rho_{\text{cint}} \times e_{\text{cint}} \times C_{\text{pcint}}} + \frac{h_{\text{cn}_1} (T_{\text{cext}} - T_{\text{cint}})}{\rho_{\text{cint}} \times e_{\text{cint}} \times C_{\text{pcint}}} \quad (2)$$

Bilan énergétique sur l'absorbeur

$$\frac{\partial T_{\text{ab}}}{\partial t} = \frac{\tau_{\text{cext}} \times \tau_{\text{cint}} \times \alpha_{\text{ab}} \times \Phi_i}{\rho_{\text{ab}} \times e_{\text{ab}} \times C_{\text{pab}}} + \frac{R_{\text{al}} \times \tau_{\text{cext}} \times \tau_{\text{cint}} \times \alpha_{\text{ab}} \times (3 \cos \alpha + \cos \beta) \Phi_i}{\rho_{\text{ab}} \times e_{\text{ab}} \times C_{\text{pab}}} + \frac{h_{\text{cn}_2} (T_{\text{cint}} - T_{\text{ab}})}{\rho_{\text{ab}} \times e_{\text{ab}} \times C_{\text{pab}}} + \frac{h_{\text{r}_{\text{ab-cint}}} (T_{\text{cext}} - T_{\text{cint}})}{\rho_{\text{ab}} \times e_{\text{ab}} \times C_{\text{pab}}} \quad (3)$$

2.5 Calcul des différents coefficients d'échanges thermiques

Le coefficient d'échange par rayonnement entre la couverture extérieure et le ciel est:

$$h_r = 4 \times \varepsilon_{\text{vex}} \times \sigma \times T_{\text{ciel}}^3 \quad (4)$$

La température du ciel est donnée par la relation:

$$T_{\text{ciel}} = \sqrt[4]{\left(1 - 0.261 \times \exp\left(-7.77 \times 10^{-4} \times (T_{\text{amb}} - 273)^2\right)\right)} \times T_{\text{amb}} \quad (5)$$

Le vent refroidit la couverture externe par convection. Le coefficient d'échange dû au vent est formulé différemment suivant les auteurs. Nous citons la corrélation de Mac Adams:

$$h_{\text{cext}} = 5.62 + 3.9 \times V_v \quad (6)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre les deux couvertures est:

$$h_{r, \text{vin-vex}} = \sigma \times (T_{\text{vin}}^2 + T_{\text{vex}}^2) \times (T_{\text{vin}} + T_{\text{vex}}) \quad (7)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre interne $h_{r, \text{ab-vin}}$ est de la forme [6]:

$$h_{r, \text{ab-vin}} = \frac{\sigma \times (T_{\text{ab}} + T_{\text{vin}}) \times (T_{\text{ab}}^2 + T_{\text{vin}}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ab}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{vin}}} - 1} \quad (8)$$

2.6 Calcul du flux solaire global

Le flux solaire global est la somme du rayonnement direct et diffus, il est donné par la relation [7].

$$G^* = \varphi_0 \times \exp[m_0 \times \xi] \times \sin H + D^* \quad (9)$$

D^* est le flux solaire diffus.

Le flux incident sur une surface normale aux rayons solaires à la limite de l'atmosphère est:

$$\varphi_0 = C_0 \times (1 + 0.034 \times \cos[0.986 \times (j - 3)]) \quad (10)$$

2.7 Calcul du rendement du capteur

Les performances du capteur solaire sont décrites par le bilan énergétique global suivant:

$$\varphi_{\text{sa}} = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_{\text{st}} \quad (11)$$

En négligeant le flux thermique stocké dans les différents composants du capteur, on obtient:

$$\varphi_{\text{sa}} = \varphi_u + \varphi_p \quad (12)$$

La quantité d'énergie utile à l'échauffement de l'air intérieur peut être exprimée par:

$$Q_u = \dot{m} \times C_p \times (T_{\text{af}} - T_{\text{ai}}) \quad (13)$$

En introduisant le coefficient de pertes totales vers la face avant de l'absorbeur U_L (pertes entre l'absorbeur et l'air ambiant), le gain d'énergie utile fourni par l'absorbeur est donné par la relation:

$$Q_u = S_{ab} (I_G \times \tau_{cint} \times \tau_{cext} \times \alpha_{ab} - U_L \times (T_a - T_{amb})) \quad (14)$$

Le rendement thermique du capteur solaire [8], défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie utile récupérée et le rayonnement global incident, est donné par:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_G \times S_{ab}} \quad (15)$$

qui s'écrit:

$$\eta = \frac{m \times C_p \times (T_{af} - T_{ai})}{I_G \times S_{ab} \times \Delta t} \quad (16)$$

A partir des équations (15) et (14), on obtient:

$$\eta = \tau_{cext} \times \tau_{cint} \times \alpha_{ab} - U_L \times \frac{(T_a - T_{amb})}{I_G} \quad (17)$$

Les termes τ_{cext} , τ_{cint} , α_{ab} et U_L sont deux quantités très significatives. Elles représentent respectivement le taux d'énergie absorbée (rendement optique) et le taux d'énergie perdue (le coefficient des pertes globales).

2.8 Résolution numérique

Le système d'équations régissant le fonctionnement du capteur se compose de trois équations du premier ordre. Ainsi ces équations différentielles sont résolues par la méthode des différences finies avec un schéma explicite.

L'algorithme de calcul utilisé est explicité dans des travaux antérieurs de Diallo *et al.* [4].

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Ensoleillement et température de l'absorbeur

La figure 2 illustre l'évolution de l'ensoleillement global durant la journée du 11-04. Nous remarquons une corrélation entre les courbes théorique et expérimentale de l'ensoleillement global avec un léger écart. Cet écart est dû, à notre sens, à certains paramètres extrinsèques, essentiellement météorologiques.

La figure 3 illustre l'évolution de la température de l'absorbeur durant la même journée du 11-04. La comparaison entre les courbes théorique et expérimentale [4] témoigne d'un accord satisfaisant avec un certain écart.

Cet écart pourrait être attribué aux hypothèses simplificatrices, notamment la négligence du rayonnement des faces latérales.

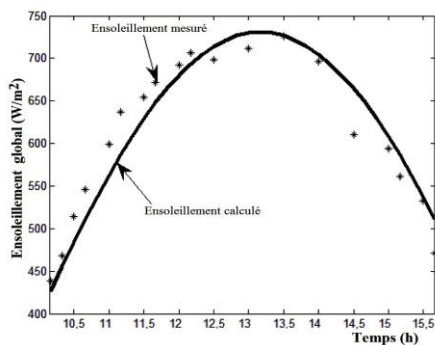


Fig. 2: Evolution de l'ensoleillement théorique et expérimental pour la journée du 11-04

Cet écart peut également provenir de la détermination plus ou moins exacte, à partir de relations empiriques, des coefficients d'échange, de la négligence des quantités de chaleur perdues par les différentes parois supposées parfaitement isolées, et des erreurs liées aux instruments de mesures.

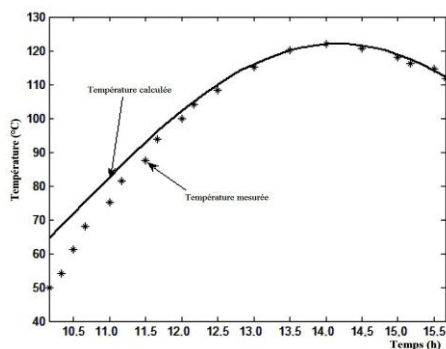


Fig. 3: Evolution de la température théorique et expérimentale de l'absorbeur pour la journée du 11-04

Nous remarquons que l'écart est plus accentué en début de fonctionnement du capteur, ce qui peut être dû à l'inertie du capteur.

Le rendement du capteur solaire est représenté sur la figure 4.

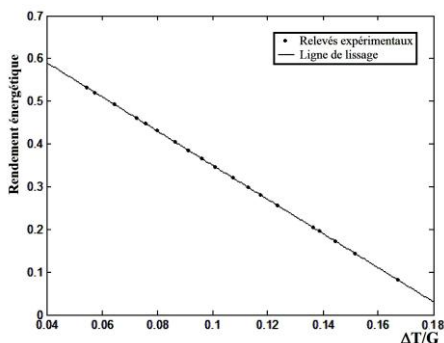


Fig. 4: Courbe représentant le rendement en fonction de $\Delta T/G$

La courbe du rendement peut être représentée par la relation suivante:

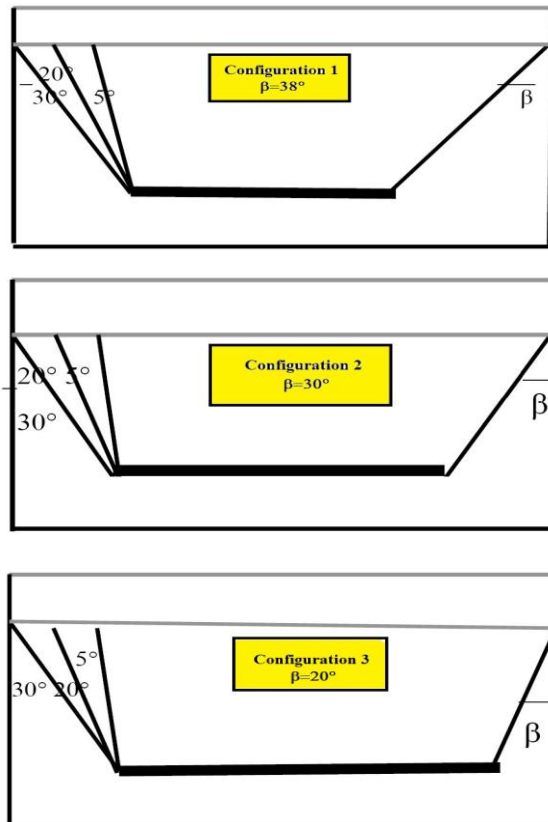
$$\eta = 0.59 - 3.94 \times (\Delta T / G) \quad (18)$$

Le premier terme du deuxième membre de l'équation (18) représente le rendement optique global et le coefficient du deuxième terme (- 3,94) représente le coefficient des pertes thermiques totales.

Ces deux valeurs sont très intéressantes car le rendement optique avoisine les 60 % et le coefficient des pertes thermiques est moyen (4 W/m²/°C). Ces résultats sont en parfaite corrélation avec la théorie développée dans les Cahiers A.F.E.D.E.S. [9]. Le rendement optique et les pertes thermiques baissent avec la présence du double vitrage.

3.2 Influence de l'inclinaison des parois sur la température de l'absorbeur

Afin d'augmenter la température de l'absorbeur du capteur solaire, nous avons fait varier, par simulation numérique, les angles d'inclinaison des parois latérales, cependant entre 0° et 45°. On exploite le code de calcul avec les conditions fixées dans la référence [4] pour la journée du 11-04. On fait varier les inclinaisons des parois latérales et on observe l'évolution de la température de l'absorbeur. On fait varier l'inclinaison des parois de 5° à 40° par pas de 10°. On présente les différentes configurations étudiées du capteur solaire dans la figure 5. En effet, on fixe l'inclinaison β de la face sud et on fait varier l'inclinaison α des autres faces.



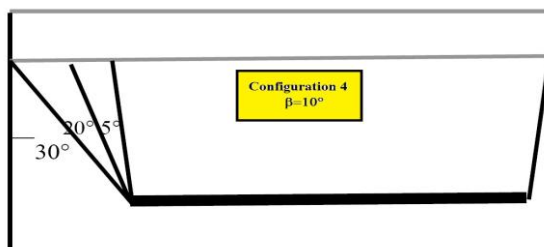


Fig. 5: Influence de l'inclinaison des parois sur la température de l'absorbeur

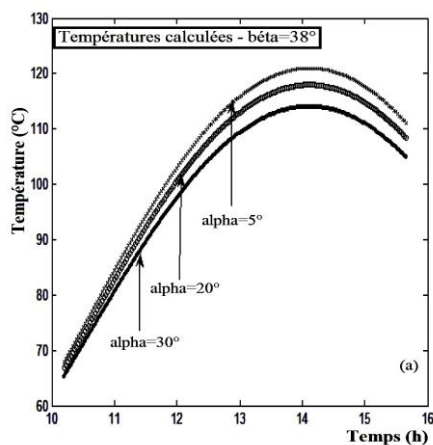
L'évolution de la température en fonction des angles d'inclinaisons, (Fig. 6), nous ont permis de choisir la meilleure configuration, c'est-à-dire celle qui permet d'obtenir la plus haute température de l'absorbeur.

On remarque que la variation des inclinaisons des faces latérales par rapport à la verticale, a une influence sur la production de la chaleur. Une augmentation de l'inclinaison abaisse la température de l'absorbeur, alors que si l'on baisse l'inclinaison des parois, on constate une élévation de la température.

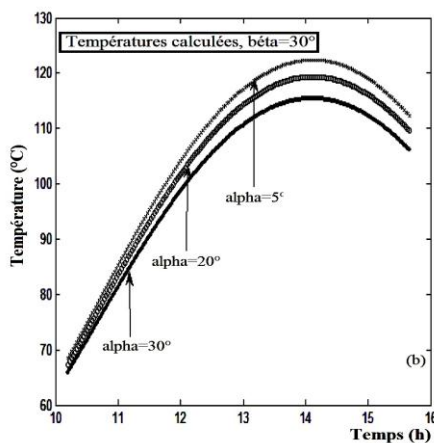
Cette influence est beaucoup plus visible entre 12 h et 15 h heures locales.

La figure 6d- nous présente la température la plus élevée pour une configuration du capteur avec des inclinaisons $\alpha = 5^\circ$ et $\beta = 10^\circ$.

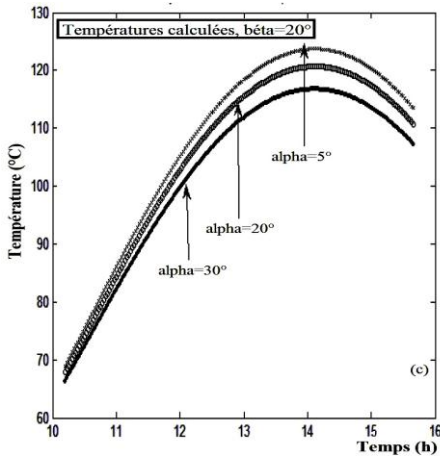
La comparaison des courbes des températures simulée ($\alpha = 5^\circ$ et $\beta = 10^\circ$) et mesurée ($\alpha = 9^\circ$ et $\beta = 38^\circ$) de l'absorbeur, (Fig. 7), confirme l'amélioration de la température de l'absorbeur du capteur.



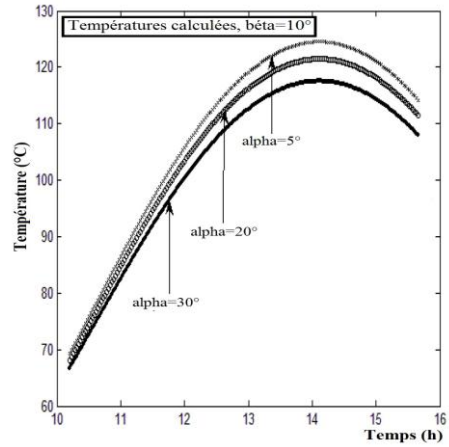
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6: Evolution de la température de l'absorbeur pour différents angles d'inclinaison (journée 11/04)

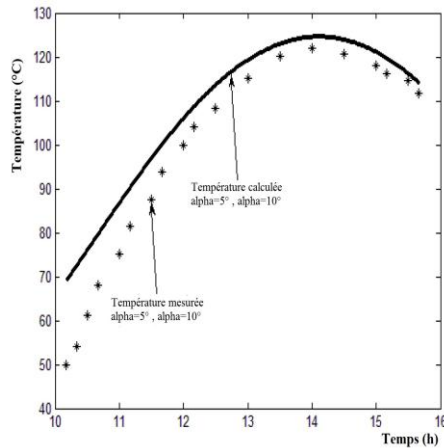


Fig. 7: Température mesurée et température simulée de la configuration choisie

5. CONCLUSION

L'étude de l'amélioration de la température de l'absorbeur a été effectuée dans le cas d'un capteur solaire de type boîte par l'intermédiaire de l'inclinaison des faces latérales. Les résultats des simulations sont satisfaisants et peuvent être extrapolés pour d'autres types de capteurs solaires dont le mécanisme de transfert chaleur est similaire à notre modèle.

Les résultats de la simulation ont permis d'arrêter la configuration des angles d'inclinaison des faces latérales pour l'amélioration du flux solaire global absorbé par l'absorbeur. Ceci permet d'augmenter rapidement la température de l'absorbeur et de

réduire le temps de cuisson de produits agroalimentaires ou de stérilisation d'instruments médicaux.

REFERENCES

- [1] D. Semmar, S. Betrouni et D. Lafri, '*Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air*', Revue des Energies Renouvelables: Physique Energétique, pp. 33 – 38, 1998.
- [2] A. Harmim, M. Belhamel, M. Boukar et M. Amar, '*Contribution à l'Amélioration des Performances d'un Cuiseur Solaire Boîte*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°3, pp. 419 – 432, 2009.
- [3] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf, A. Moumami, A. Labed, E. Achouri et A. Benchabane, '*Amélioration des Performances Thermiques d'un Capteur Solaire Plan à Air: Etude Expérimentale dans la Région de Biskra*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 237 - 248. 2009.
- [4] M.A. Diallo, J. Sarr, M.L. Sow, C. Mbow, B. Ba, A. Thiam, M. Sall and M.M. Kane, '*Photothermal Conversion in a Solar Collector with Tilted Walls*', International Journal of Physical Sciences, Vol. 4, N°12, pp. 860 - 867, 2009.
- [5] T. Cabriol, A. Pelissou et D. Roux, '*L'insolateur Plan à Effet de Serre et le Chauffe-Eau Solaire*', Collection 'Technologies Douces', EDISUD, Aix en France.
- [6] J.F. Saccadura, '*Initiation aux Transferts Thermiques*', Cast. INSA de Lyon, Paris, Techniques et Documentation, 1980.
- [7] A. Thiam, '*Stockage de la chaleur dans un capteur matériau fusible*', Mémoire de DEA, Ecole Supérieure Polytechnique, Dakar, Sénégal, 1998.
- [8] Y. Jannot, '*Thermique Solaire*' pp. 86, 2007.
- [9] Cahiers AFEDES N°4 Décembre 1977.

NOMENCLATURE

C_p : Chaleur massique, W/kg.K	H : Hauteur angulaire, deg
D^* : Rayonnement solaire diffus, W/m^2	G^* : Rayonnement solaire global, W/m^2
h_c : Coefficient d'échange par convection, $W/m^2.K$	h_r : Coefficient d'échange par rayonnement, $W/m^2.K$
I^* : Rayonnement solaire direct, W/m^2	m_0 : Nombre de masse atmosphérique
h : Constante de Planck, Js	R : Coefficient de réflexion
S : Surface, m^2	T : Temps, s
T_{amb} : Température ambiante, $^{\circ}C$	σ : Constante Stefan Boltzman, $W/m^2.K^4$
M : Masse, kg	j : Numéro du jour
ρ : Masse volumique, kg/m^3	Φ_i : Energie rayonnée, W
α : Coefficient d'absorption	ε : Emissivité
ξ : Densité optique	