

Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra

N. Hamani ¹, A. Moummi ^{2*}, N. Moummi ³, A. Saadi ⁴ et Z. Mokhtari ⁵

¹ Département de Physique, Faculté des Sciences et d'Ingénierie

^{2,3} Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et d'Ingénierie

⁴ Département d'Electrotechnique, Faculté des Sciences et d'Ingénierie

⁵ Département de Mathématique

Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie

(reçu le 14 Janvier 2006 – accepté le 25 Juin 2007)

Résumé - Dans cette étude, on s'intéresse à la simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration de type cylindro-parabolique. Pour étudier le phénomène de chauffage de l'eau, deux parties essentielles sont traitées: la première partie est consacrée à la simulation du flux solaire incident dans un plan incliné qui correspond à la latitude du lieu considéré. La deuxième partie est réservée à l'étude des échanges thermiques dans le tube absorbeur du capteur pour déterminer la température de sortie du fluide caloporteur qui est l'eau dans notre cas. Le concentrateur solaire cylindro-parabolique contient un tube circulaire 'absorbeur' en cuivre avec une couche sélective convenable, et il est entouré par une enveloppe en verre concentrique situé le long de la ligne focale d'un réflecteur cylindro-parabolique. Un modèle mathématique a été établi pour contrôler la température de sortie du fluide ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre. La simulation du processus est effectuée heure par heure du lever du soleil jusqu'au coucher. Un écart de température considérable est mis en évidence entre l'entrée et la sortie du capteur pour les jours du test étudiés. Les résultats obtenus montrent clairement que les températures de sorties varient en fonction du flux solaire incident et des conditions climatiques environnantes.

Abstract - The study of the water heating by this collector includes two essential parts: the first part relates to the numerical simulation of the incident solar flow in an inclined plan (the inclination angle = latitude of place). The second part is entirely reserved to study the heat exchange of the absorbent tube to determine the outlet temperature of the fluid (water). The studied cylindro-parabolic solar collector, contains a circular tube 'absorbent' with a suitable selective layer, surrounded by a glass cover locate along the focal line of cylindro-parabolic reflectors. We established a mathematical model to control the fluid temperature as well as the absorber and the glass cover temperatures. The results are calculated hour per hour of the during most of the daylight. This study has shown that there is a variation in temperature between the inlet and the outlet for the test days. The results obtained shows clearly that the outlet temperatures are a function of solar flow.

Mots clés: Capteur cylindro-parabolique - Température de sortie - Energie solaire - fluide.

1. INTRODUCTION

Il existe deux techniques distinctes pour la collection de l'énergie solaire, les capteurs plans dont le principe de conversion est basé sur une méthode simple de l'énergie solaire incidente en énergie thermique directement utilisable, par conséquent leur domaine d'application est très restreint, ils présentent en outre un certain nombre d'inconvénients; ce qui a poussé les spécialistes et particulièrement les constructeurs à concevoir d'autres modèles de configuration plus rentables, qui utilisent le principe du concentration où une quantité d'énergie considérable est fournie.

* moumi99dz@yahoo.fr

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique contenant un tube circulaire ‘absorbeur’ avec une couche sélective adéquate, est entouré par une enveloppe transparente en verre concentrique située le long de la ligne focale du concentrateur.

L’étude du chauffage de l’eau par le capteur considéré repose tout d’abord sur l’estimation exacte du rayonnement solaire incident calculé par des modèles semi empiriques, tel que le modèle de Perrin de Brichambaut et de Liu Jordan. L’étude thermique proprement dite dans le conduit absorbeur nous permet de suivre l’évolution de la température de l’eau qui circule à l’intérieur du tube absorbeur en mode de convection forcée.

L’objectif principal de ce travail est de simuler la température de sortie du fluide circulant dans le tube absorbeur du capteur avec effet de concentration. Pour cela, un modèle mathématique est établi pour contrôler la température de sortie du fluide.

2. PRINCIPE DE CAPTATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel, mais aussi de tout l’environnement.

Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d’un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d’ouverture du collecteur, afin d’augmenter la concentration du rayonnement au niveaux de l’absorbeur. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n’utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l’énergie solaire [1].

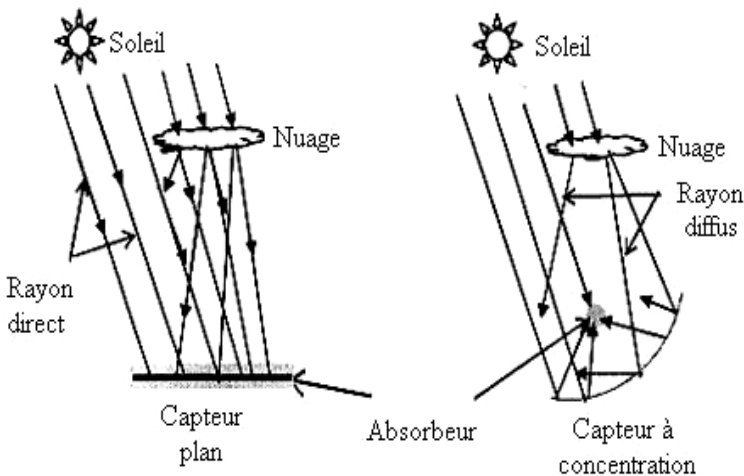


Fig. 1: Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire

3. INCLINAISON OPTIMALE D’UN CAPTEUR SOLAIRE

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d’un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le sud, à l’écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d’inclinaison qui permet que la surface du capteur soit perpendiculaire aux rayons solaires et d’être exposés au maximum à la lumière solaire. Le calcul de l’angle d’inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l’emplacement du capteur. En général, il s’agit de la latitude de l’emplacement plus ou moins 10 à

15 degrés. En hiver (position hivernale), lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (à la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (à la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel (position estivale).

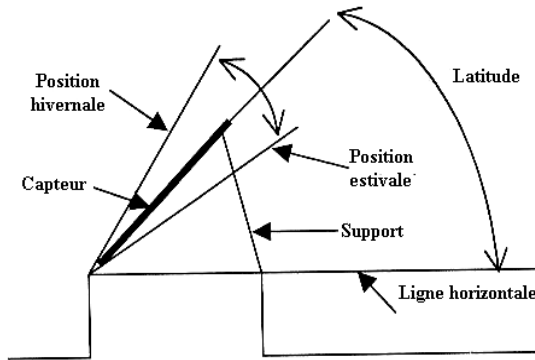


Fig. 2: Installation d'un capteur solaire

4. ETUDE THERMIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE

L'élément le plus important dans les systèmes concentrateurs est le tube absorbant, à l'intérieur duquel circule le fluide caloporteur. Le tube absorbant est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, est entouré d'une enveloppe transparente en verre, comme il est représenté par la figure 3. Il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro-parabolique.

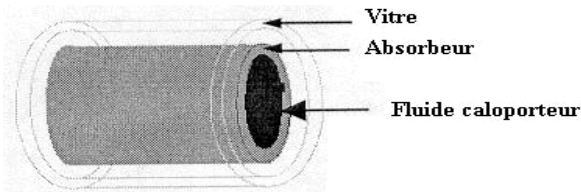


Fig. 3: Schéma d'un élément du tube absorbant

L'énergie solaire incidente absorbée, n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur, une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques entre l'absorbant et la vitre. En prenant en considération les différentes parts d'énergies, celle recueillie par le fluide et perdue vers l'ambiance telle qu'elle est montrée par la figure 4.

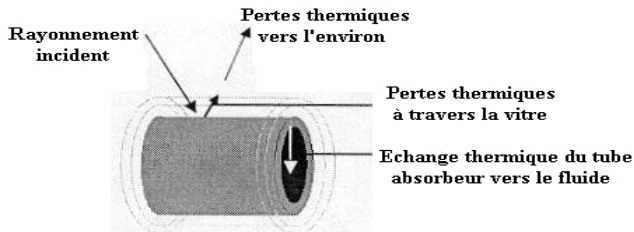


Fig. 4: Schématisation des échanges thermiques entre les différents éléments du collecteur cylindro-parabolique

4.1 Bilan thermique

Pour le calcul du bilan énergétique, on devrait tenir compte des hypothèses suivantes:

- Le fluide caloporteur est incompressible.
- La forme de la parabole est symétrique.
- La température ambiante autour du capteur est uniforme.
- La vitre est considérée comme opaque aux radiations infrarouges.
- L'écoulement du fluide est unidimensionnel.
- Les variations temporelles dans l'épaisseur de l'absorbeur et la vitre sont négligeables.
- Les échanges par conduction dans l'absorbeur et la vitre sont négligeables.
- L'effet de l'ombre du tube absorbeur sur le miroir est négligeable.
- Le flux solaire au niveau de l'absorbeur est uniformément réparti.

Les différents échanges thermiques qui ont lieu dans l'élément absorbeur sont schématisés par la figure 5.

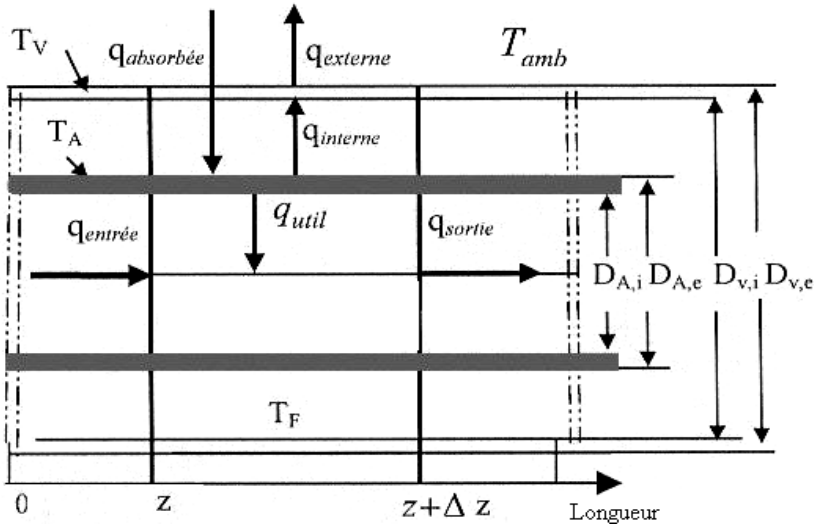


Fig. 5: Bilan thermique d'un élément de surface du collecteur cylindro-parabolique

4.2 Equations caractéristiques gouvernantes

4.2.1 Bilan thermique du fluide caloporteur

Le bilan énergétique pour le fluide caloporteur qui circule dans le tube absorbeur est exprimé par la relation suivante:

$$\rho_F C_F A_{A,interne} \frac{\partial T_F(z,t)}{\partial t} = q - q_{sortie} + q_{utile} \cdot \Delta z \tag{1}$$

$A_{A,interne}$ est la surface d'échange interne de l'absorbeur par unité de longueur, et elle est exprimée par la relation suivante:

$$A_{A,interne} = \pi D_{A,i} \tag{2}$$

La quantité de chaleur à l'entrée et à la sortie dans l'élément de longueur Δz est donnée par les expressions suivantes:

$$q(z,t) = \rho_F \cdot C_F \cdot \dot{V} \cdot T_F(z,t) \tag{3}$$

$$q_{sortie}(z + \Delta z, t) = \rho_F \cdot C_F \cdot \dot{V} \cdot T_F(z + \Delta z, t) \tag{4}$$

Les propriétés thermo physiques du fluide sont considérées en fonction de la température. Les conditions initiales et les conditions aux limites sont: $T_F(0, t) = T_F(t) = T_{amb}(t)$

$$T_F(z, 0) = T_{F,initiale}(t) = T_{amb}(0)$$

4.2.2 Bilan énergétique du tube absorbeur

Le bilan énergétique dans l'absorbeur est:

$$\rho_A \cdot C_A \cdot A_A \frac{\partial T_A(z, t)}{\partial t} = q(t) - q_{interne}(z, t) - q_{utile}(z, t) \quad (5)$$

On impose comme condition initiale:

$$T_A(z, t) = T_{A,initiale}(z) = T_{amb}(0)$$

4.2.3 Bilan énergétique de la vitre

De la même façon, le bilan énergétique de la vitre est exprimé par:

$$\rho_V \cdot C_V \cdot A_V \frac{\partial T_V(z, t)}{\partial t} = q_{interne}(z, t) - q_{externe}(z, t) \quad (6)$$

avec comme condition initiale:

$$T_V(z, t) = T_{V,initiale}(z) = T_{amb}(0)$$

4.3 Discrétisation des équations

La résolution du problème est basée sur la discrétisation en plusieurs tranches élémentaires du tube absorbeur, où chaque élément est défini par un indice j de longueur (z) . On suppose que les températures T_F , T_A et T_V sont uniformes dans chaque tranche élémentaire j .

La dérivée partielle par rapport au temps et à l'espace permet d'obtenir un système matriciel, dont la solution se fait par la méthode de Gauss-Seidel avec pivot total. Cette méthode est très bien adaptée pour la résolution des systèmes comportant plusieurs inconnus, qui converge rapidement et qui supprime l'inversion matricielle, ce qui est notre cas.

5. CALCUL DES PERTES THERMIQUES DANS LE TUBE ARSORBEUR

L'approche suggéré par Mullick [2], est utilisé pour évaluer le coefficient des pertes thermiques au niveau du tube absorbeur et de l'enveloppe transparente en verre. Cette méthode est souvent utilisée pour l'absorbeur à concentration linéaire, qui donne des résultats satisfaisants avec une erreur de 1 % par rapport à la méthode itérative, pour des températures de l'absorbeur de 380 à 580 K, avec une émittance du tube absorbeur de 0,1 à 0,95.

Le modèle peut également estimer la valeur du coefficient des pertes thermiques même à des températures supérieures à 620 K, avec une erreur maximale de 2 %.

Le coefficient des pertes thermique U_L est donné par l'expression suivante.

$$U_L = \left[\frac{1}{C_1 (T_A - T_V)^{0,25} + \frac{\sigma (T_A^2 + T_{amb}^2) (T_A + T_{amb})}{1/\varepsilon_A - (D_{A,i}/D_{A,e})(1/\varepsilon_V - 1)}} + \left(\frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \right) \frac{1}{h_v + \sigma \varepsilon_V (T_V^2 - T_{amb}^2) (T_A + T_{amb})} + \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \frac{e_g}{k_v} \right]^{-1} \quad (7)$$

Où, C_1 est donné par:

$$C_1 = \frac{17,74}{(T_A - T_V)^{0,4} D_{A,i} (D_{A,i}^{-0,75} + D_{A,e}^{-0,75})}$$

h_v est le coefficient par convection du au vent donné par:

$$h_v = 4 v^{0,58} D_{V,e}^{-0,42}$$

6. RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures 5-8 montrent l'évolution de la température du fluide, du tube absorbeur et de la vitre en fonction du temps respectivement pour les journées du 21 Mars, le 21 Juin, le 21 Septembre et le 21 Décembre, relativement à un concentrateur dont les caractéristiques géométriques figurent dans l'annexe (1).

Il est évident de montrer que la variation de la température dépend particulièrement de la puissance solaire incidente et des conditions climatiques environnantes.

L'étude des pertes thermiques montre que l'absorbeur est le siège de ces pertes qui sont estimées par l'expression suggéré par Mullick et Nanda. La figure 10 montre l'évolution du coefficient global des pertes thermiques en fonction de la température moyenne de l'absorbeur, pour trois valeurs d'émissivité respectivement égale à 0,9; 0,5 et 0,2. On remarque que les pertes thermiques augmentent avec l'accroissement de la température moyenne de l'absorbeur. On tient à signaler qu'une émissivité du tube absorbeur au voisinage de 0,2 pourrait réduire davantage les pertes thermiques par rayonnement en adoptant des surfaces sélectives convenables. D'autre part l'élimination de l'air entre l'enveloppe transparente en verre et l'absorbeur, en créant le vide pourrait réduire sensiblement les déperditions par convection.

La figure 11 montre la variation de la température du fluide à la sortie du concentrateur en fonction de la longueur du tube absorbeur pour trois valeurs du rayonnement solaire direct respectivement égales à 1000 W/m², 700 W/m² et 500 W/m² dans le site de Biskra. On pourrait remarquer que la température du fluide T_F est proportionnelle à la longueur du tube absorbeur et à l'intensité du flux solaire incident.

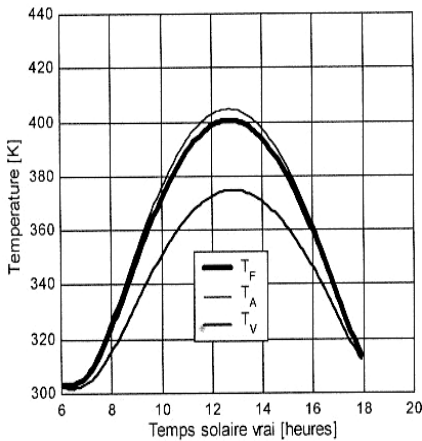


Fig. 6: Evolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Mars

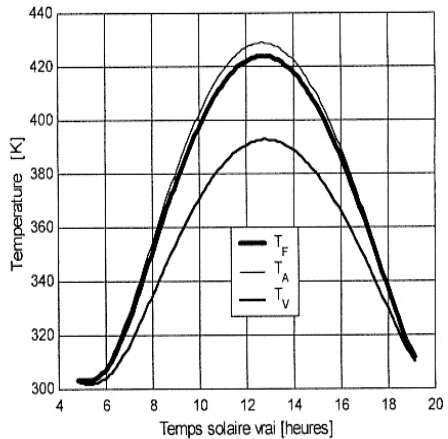


Fig. 6: Evolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Juin

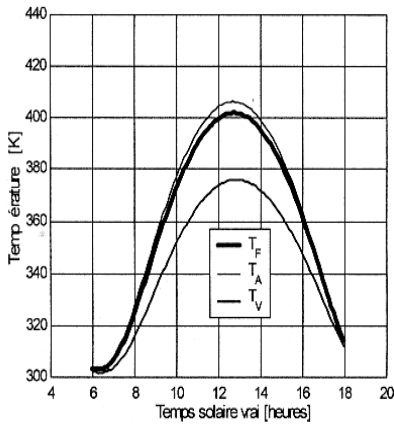


Fig. 8: Evolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Septembre

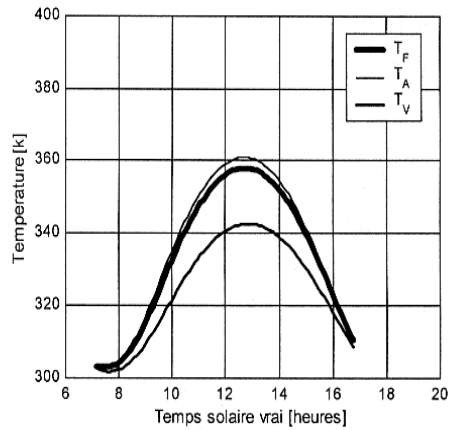


Fig. 9: Evolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Décembre

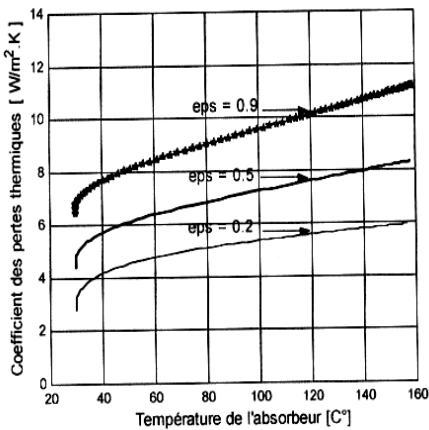


Fig. 10: Evolution du coefficient des pertes thermiques en fonction de la température de l'absorbeur pour trois valeurs d'émissivité

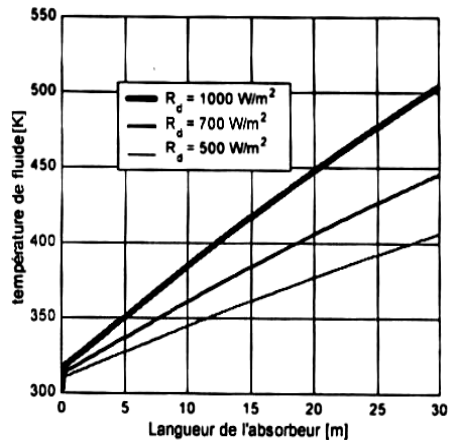


Fig. 11: Evolution de la température de sortie du fluide en fonction de la longueur du tube absorbeur pour trois valeurs du rayonnement incident

6. CONCLUSION

Ce travail propose une simulation numérique du chauffage de l'eau circulant à l'intérieur d'un tube absorbeur d'un capteur solaire avec effet de concentration de type cylindro-parabolique.

A partir des échanges thermiques qui ont lieu, un modèle mathématique est établi pour contrôler la température du fluide ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre. La simulation du processus de chauffage du fluide est effectuée heure par heure du lever du soleil jusqu'au coucher. Les résultats obtenus montrent qu'il y a un écart de température important de l'entrée du capteur jusqu'à la sortie pour les jours de tests considérés.

Un programme informatique en langage Matlab5.3 est développé pour simuler la température de sortie du fluide caloporteur en comparaison avec celles du tube absorbeur et de la vitre en fonction du temps et de la position géographique du lieu.

L'étude numérique montre qu'une température au voisinage de 430 K est particulièrement obtenue au midi solaire vrai pour le 21 Juin dans le site de Biskra. Les résultats obtenus sont très encourageants pour des applications industrielles telles que la production de l'eau surchauffée.

Une interface informatique sous l'environnement Matlab 5.3 est également mise en oeuvre, qui peut être exploitée par les utilisateurs spécialistes, et qui représente un support technique pour l'estimation par voie de simulation du rayonnement solaire incident ainsi que la température de sortie du fluide en fonction de la date et du lieu géographique de n'importe quel site considéré.

NOMENCLATURE

- C_F : Chaleur spécifique du fluide, [J/kg.K]
 C_A : Chaleur spécifique de l'absorbeur, [J/kg.K]
 C_V : Chaleur spécifique de la vitre, [J/kg.K]
 ρ_F : Densité du fluide, [kg/m³]
 ρ_A : Densité de l'absorbeur, [kg/m³]
 ρ_V : Densité de l'enveloppe transparente en verre, [kg/m³]
 q_{utile} : Puissance utile du fluide, [W]
 $q_{\text{absorbé}}$: Puissance absorbée au niveau du tube absorbeur, [W]
 q_{interne} : Puissance interne (convection, rayonnement) entre absorbeur et vitre, [W]
 q_{externe} : Puissance externe (convection, rayonnement) entre vitre et l'ambiance, [W]
 Δz : Élément de longueur du tube absorbeur, [m]
 \dot{V} : Débit volumique du fluide circulant à l'intérieur du tube absorbeur, [m³/s]
 V : Vitesse du vent, [m/s]
 T_F : Température du fluide, [K]
 T_A : Température de l'absorbeur, [K]
 T_V : Température de la vitre, [K]
 T_{amb} : Température de l'ambiance, [K]
 A_A : Surface du tube absorbeur, [m²]
 A_V : Surface de la vitre, [m²]
 $D_{A,i}$: Diamètre intérieur du tube absorbeur, [m]
 $D_{A,e}$: Diamètre extérieur du tube absorbeur, [m]
 $D_{V,i}$: Diamètre intérieur de l'enveloppe transparente en verre, [m]
 $D_{V,e}$: Diamètre extérieur de l'enveloppe transparente en verre, [m]
 e_g : Epaisseur de l'enveloppe transparente en verre, [m]
 h_v : Coefficient du transfert par convection du au vent, [W/m².K]
 K_V : Conductivité thermique de l'enveloppe en verre, [W/m.K]
 U_L : Coefficient global des pertes thermiques, [W/m².K]
 ε_A : Emissivité du tube absorbeur
 ε_V : Emissivité de l'enveloppe transparente en verre
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann, [W/m².K⁴]

REFERENCES

- [1] D. Guerraiche, 'Simulation et Prédiction de la Radiation Solaire Directe Absorbée par un Champ de Capteurs Cylindro-Parabolique', Mémoire de Magister, Batna, Algérie, 2002.
- [2] S.C. Mullick and S. Nanda, 'An Improved Technique for Computing the Heat Loss Factor of Tubular Absorber', Solar Energy, Vol. 42, N°1, pp. 1 - 7, 1989.
- [3] R. Bernard, D. Menguy et M. Schwartz, '*Le Rayonnement Solaire : Conversion et Applications*', Edition Tech. Doc. Paris, 1979.
- [4] J. Howell, B. Bauverot and Q.C. Veliet, '*Solar Thermal Energy System: Analysis and Design*', Mc. Graw-Howell Book Company, USA, 1982.
- [5] H.D. Ammari and Y.L. Nimir, 'Experimental and Theoretical of Performance of a tar Water Heaters', Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 3037 - 3055, 2003.
- [6] J.H. Lienhard IV and J.H. Lienhard V, 'A Heat Transfer Text Book', Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, Third Edition, 2003.
- [7] K. Messaïfa, 'Evaluation de l'Apport Quantitatif des Inclinaisons Optimales d'un Système de Pompage Photovoltaïque', Enersole'01, Adrar, pp. 255 - 272, 2001.
- [8] M. Capderou, '*Atlas Solaire en Algérie*', Tome 1, 2 et 3, O.P.U., Alger, 1988.
- [9] A. Benderradji, 'Etude Théorique et Expérimentale des Performances d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique', Thèse de Magister, Batna, Algérie, 1996.
- [10] A.I. Rubaian and A.F. Harnual, 'Performance of Single Axis Tracking Solar Parabolic Trough in Riyadh, Saudi Arabia', Word Renewable Energy Congress VIII, WREC 2004.
- [11] N. Hamani, A. Moummi et S. Ouamane, 'Modélisation du Flux Solaire dans un Capteur Solaire de Type Cylindro-Parabolique dans le Site de Biskra', The First International Conference on Electrical Systems, PCSEe05, May 9-11, Oum El Bouaghi, Algeria, pp. 345 - 350, 2005.
- [12] N. Hamani, A. Moummi et S. Ouamane, 'Etude Comparative entre Deux Modèles Semi-Empirique de Calcul du Rayonnement Solaire sur un Capteur Incliné dans le Site de Biskra', The First International Conference on Electrical Systems, PCSE'05, May 9-11, Oum El Bouaghi, Algeria, pp. 345 - 350, 2005.
- [13] N. Hamani, 'Modélisation du Flux Solaire Incident et de la Température de Sortie dans un Capteur Solaire à Eau avec Effet de Concentration du Rayonnement Incident', Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie, 2005.
- [14] N. Hamani, A. Moummi et S. Ouamane, 'Modélisation de l'Energie Perdue dans un Concentrateur Solaire de Type Cylindro-Parabolique', Séminaire International sur les Systèmes Electro-Mécaniques, SISEM_05, Annaba, Algérie, 22-23 Novembre, 2005.

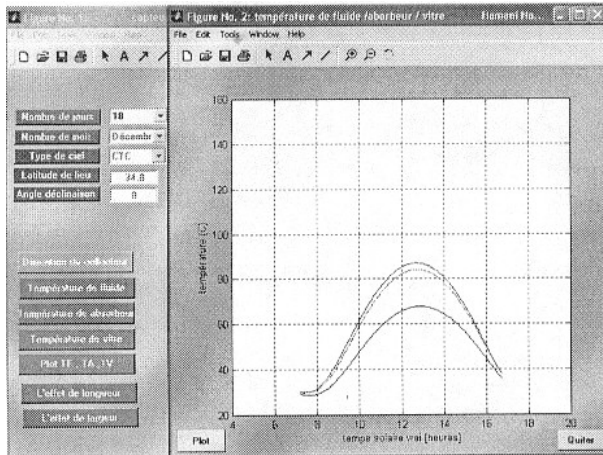
Annexe 1

Caractéristiques géométriques du capteur cylindro-parabolique

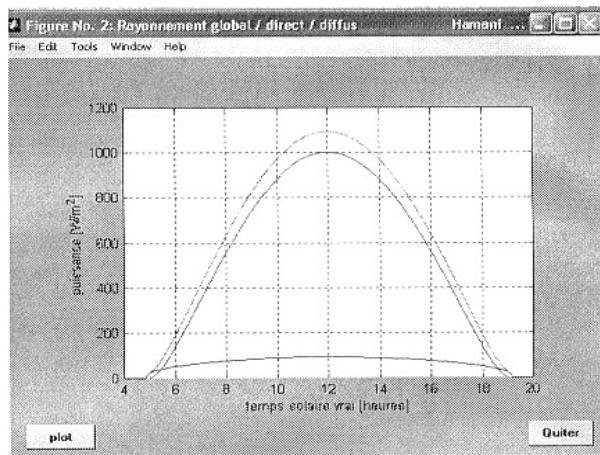
Désignation	Dimension
Diamètre interne du tube absorbeur, $D_{A,i}$	0,012 m
Diamètre extérieur du tube absorbeur, $D_{A,e}$	0,014 m
Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre, $D_{V,i}$	0,017 m
Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre, $D_{V,e}$	0,020 m
Largeur effective du miroir, W_{eff}	1 m
Nombre de tube collecteur, N_{total}	03
Longueur de chaque tube collecteur, L_{tube}	5 m
Elément de longueur, Δz	0,1 m
Distance focale, f	0,235 m

Annexe 2

Interface réalisée sous l'environnement Matlab 5.3



Interface 1: Saisie de la date du jour, du mois, du type du ciel et de situation géographique du lieu



Résultats 1: Evolution du rayonnement solaire incident pour le site de Biskra