

Modélisation numérique d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime transitoire en vue d'intégration au bâtiment

Rabéa. Kaoulal*¹; Sidi Med ElAmine.Bekkouche²; Tayeb. Benouaz³; Sofiane. Kherrou⁴

¹ Département Sciences de la matière, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université d'Adrar, Algérie

^{2,4} Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable, BP 88 Garat Ettaam Ghardaïa, Algérie

³ Laboratoire d'Automatique, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, Algérie

* kaoulal_r@yahoo.fr

RESUME. *L'objectif de cette étude est d'analyser l'apport énergétique des capteurs solaires à air dans le cadre de l'étude de l'efficacité énergétique dans le secteur de bâtiment. En effet, le présent travail concerne l'étude théorique d'un capteur solaire plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la vitre, intégré en façade, fonctionnant en régime dynamique en convection naturelle et destinée au chauffage. L'analyse du comportement de ce capteur a permis d'établir un modèle basé sur la résolution des équations de bilans thermiques par la méthode nodale. A l'aide de la simulation numérique sous Matlab (en utilisant la méthode de Runge-Kutta), nous avons pu déterminer les profils de températures, du vitrage, de l'absorbeur, et du fluide caloporteur (l'air) à la sortie du capteur, ainsi que le rendement thermique instantané.*

MOTS-CLÉS : *Capteur thermique, Modélisation, Régime transitoire.*

ABSTRACT. *The objective of this paper is to study the energy efficiency of integration of a thermal air collector in the building sector. Indeed, this work involves the theoretical study of a flat plate solar air collector with a single-pass between the absorber and the glass, integrated in roofing, working in dynamic states into natural convection and destined to heating. The analysis of the behavior of this sensor has allowed to establish a system based on solving the equations of heat balance by the nodal method. The numerical simulation in Matlab (using the Runge-Kutta method), we have allowed to determine the temperature profiles of the different layers of our sensor, the glazing, the absorber, and coolant fluid (air) to the output of thermal collector, thereby as the instantaneous thermal efficiency.*

KEYWORDS: *Air collector thermal, Modeling, Transient states.*

1. INTRODUCTION

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur [1]. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple le séchage des produits agroalimentaires (fruits, bois..), le chauffage. Ils présentent plusieurs avantages pratiques, en effet, l'utilisation directe de l'air pour le chauffage des locaux permet de faire des économies remarquables d'énergie, et c'est pour cela que les récents développements autour de la haute qualité environnementale prennent une place importante au sein des bureaux d'études et spécialement ceux du secteur du bâtiment.

Dans la présente contribution, nous nous sommes intéressés par l'étude d'un capteur à air destiné au chauffage du bâtiment et pour ce faire nous avons établi un modèle mathématique basé sur la méthode des bilans thermiques. Les résultats de simulation numérique sous MATLAB permettent de découvrir les profils de température de chaque couche qui constitue le capteur à étudier (le vitre, l'absorbeur,...), ainsi que d'évaluer le rendement instantané selon le standard d'ACHRAE. Pour valider ces résultats théoriques, on a conçu un prototype de capteur plan à air.

2. CONSTITUTION ET SCHEMA

Le capteur thermique que nous étudions est représenté schématiquement sur la figure 1 il est constitué d'un vitrage simple en verre qui réalise l'effet de serre nécessaire pour échauffer l'absorbeur qui est à base du cuivre, d'une couche d'isolation en arrière du capteur, elle permet de meilleures performances thermiques, elle est assurée par du polystyrène.

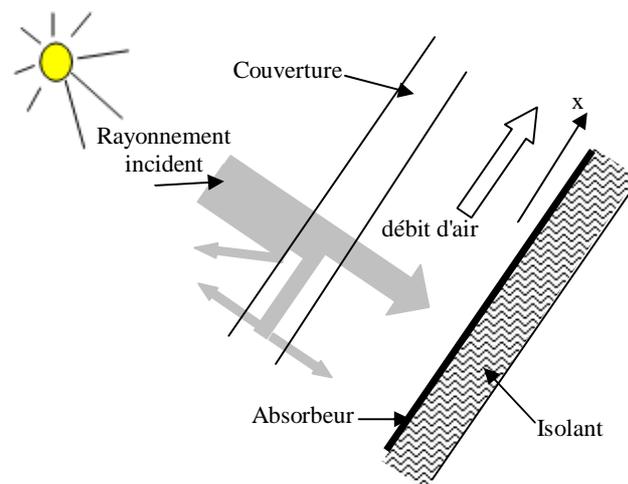


Figure 1 : Schéma de principe du capteur à air

3. MODELISATION THERMIQUE

Nous avons établi un modèle pour prédire le comportement dynamique réel de notre capteur, on approche son fonctionnement par l'application de la méthode nodale. Il s'agit au fait, de partager le capteur en couche et d'établir les équations générales de ces nœuds en régime variable, dont on calculera pour chacune son bilan thermique.

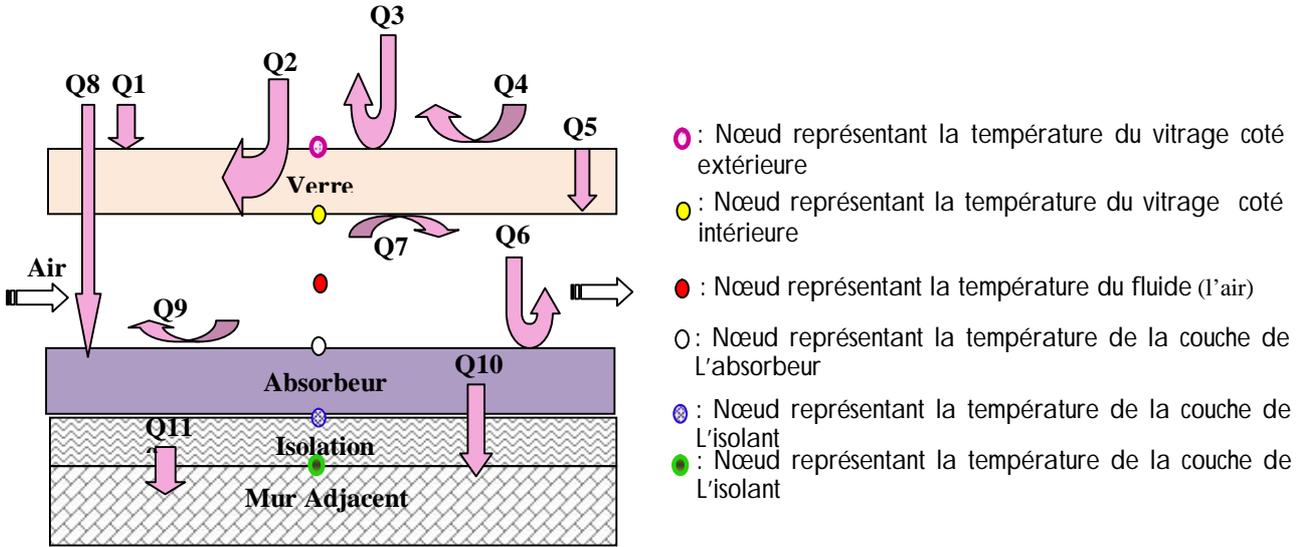


Figure 2 : Mécanisme des échanges de chaleur détaillé

3.1. EQUATIONS DE TRANSFERT THERMIQUE

Le bilan énergétique général est donnée par : pages possèdent les caractéristiques suivantes :

– Au niveau du vitrage (coté extérieur): la surface haute de la couche du verre, l'énergie reçue par la vitre étant celle des irradiances solaires plus une quantité de chaleur transmise à partir du ciel (à une certaine longueur d'onde) par rayonnement et à partir de l'air ambiant par convection (la surface interne du vitrage), on a aussi, l'échange par convection à partir de la couche d'air (gap d'air) et le vitrage:

$$M_V C_V \frac{dT_{V1}}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5$$

$$\rho_V V_V C_V \frac{dT_{V1}}{dt} = \alpha_V SG + h_{rCiel} S(T_{Ciel} - T_{V1}) + h_{rSol} S(T_{Sol} - T_{V1}) + h_{CV1-amb} S(T_{amb} - T_{V1}) - U_V S(T_{V1} - T_{V2}) \quad (1)$$

$$T_{Ciel} = 0.0552 * T_{amb}^{(1.5)} \quad , \quad \text{Par la relation de SWINBANK [3]} \quad T_{Sol} = T_{amb} + 2 \quad [4]$$

– Au niveau du vitrage (coté lame d'air):

$$M_V C_V \frac{dT_{V2}}{dt} = Q_5 - Q_6 - Q_7$$

$$\rho_V V_V C_V \frac{dT_{V2}}{dt} = U_V S(T_{V1} - T_{V2}) - h_{rV-abs} S(T_{V2} - T_{abs}) - h_{CV2-f} S(T_{V2} - T_f) \quad (2)$$

– Pour le fluide caloporteur l'air :

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = Q_7 - Q_9$$

$$\rho_f V_f C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{CV2-f} S(T_{V2} - T_f) - h_{Cf-abs} S(T_f - T_{abs}) \quad (3)$$

– Au niveau de l'absorbeur (couche sélective) :

$$M_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = Q_8 + Q_6 + Q_9 - Q_{10}$$

$$\rho_{abs} V_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = \alpha_{abs} \tau_V SG + h_{rV_abs} S(T_{V2} - T_{abs}) - h_{cf_abs} S(T_f - T_{abs}) - U_b S(T_{abs} - T_{isol}) \quad (4)$$

– Au niveau de l'isolant :

$$M_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol}}{dt} = Q_{10} - Q_{11}$$

$$\rho_{isol} V_{isol} C_{isol} \frac{dT_{isol}}{dt} = U_b S(T_{abs} - T_{isol}) - U_{muradj} S(T_{isol} - T_{muradj}) \quad (5)$$

– Au niveau de la surface du mur :

$$M_{muradj} C_{muradj} \frac{dT_{muradj}}{dt} = Q_{11}$$

$$\rho_{muradj} V_{muradj} C_{muradj} \frac{dT_{muradj}}{dt} = U_{muradj} S(T_{isol} - T_{muradj}) \quad (6)$$

3.2. EXPRESSIONS DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT

L'utilisation de la notion de coefficient d'échange radiatif et convectif est fort pratique, parce qu'elle simplifie la formulation mathématique des équations de transfert thermique dans le capteur.

En effet, Les échanges s'effectuent selon les trois modes connus ; convectifs, radiatif et par conduction. Il faut considérer l'architecture et le mode d'écoulement du fluide dans le capteur pour dresser un inventaire complet des transferts qui s'y manifestent.

*. Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste :

$$h_{rCiel} = (\sigma \cdot S \cdot (T_{Ciel}^2 - T_{V1}^2) \cdot (T_{Ciel} - T_{V1}))$$

*. Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la sol :

$$h_{rSol} = (\sigma \cdot S \cdot (T_{Sol}^2 - T_{V1}^2) \cdot (T_{Sol} - T_{V1}))$$

*. Coefficient de transfert radiatif entre la plaque absorbante et la vitre :

$$h_{rV_abs} = \frac{\sigma \cdot (T_{V2} + T_{abs})(T_{V2}^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1}{\epsilon_V} - 1\right)} \quad [5]$$

*. Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'air ambiant : D'après la relation de **HOTTEL** et

$$\mathbf{WOERTZ}: h_{CV_amb} = 5.7 + 3.8 \cdot V_{vent} \quad [2]$$

*. Coefficient de transfert convectif entre le vitrage et le fluide : $h_{CV2_f} = \frac{\lambda_{air} \cdot Nu_V}{L}$

*. Coefficient de transfert convectif entre le fluide et la plaque de l'absorbeur : $h_{cf_abs} = \frac{\lambda_{air} \cdot Nu_{abs}}{L}$, $G_r = \frac{g \cdot \beta t \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2}$, $\beta t = \frac{1}{T_f}$,

$$\Delta T = (T_f - T_i) , \text{ avec } i = abs , i = V2 \quad R_a = G_r \cdot P_r \quad , \quad P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$$

*. **Pour Notre cas** (Convection naturelle sur une plaque plane verticale) :

$$Nu_u = 0.59 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0.25} \quad , \quad \text{pour } 10^4 < (G_r \cdot P_r) < 10^9$$

$$N_u = 0.13 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0.33} \quad , \quad \text{pour } (G_r \cdot P_r) > 10^9$$

*. Le coefficient de pertes thermiques du vitrage : $U_v = \frac{\lambda_v}{e_v}$

*. Le coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur : $U_b = \frac{\lambda_{isolant}}{e_{isolant}}$

*. Le coefficient de pertes thermiques du mur adjacent : $U_{muradj} = \frac{\lambda_{muradj}}{e_{muradj}}$

4. CONCEPTION ET EXPERIMENTATION

La partie expérimentale a été réalisée au niveau du site Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS) pour une journée hivernale (le 12-02-2014) sous ensoleillement naturel.

Les caractéristiques des différents composants du capteur ainsi que les paramètres du site d'expérimentation sont résumées dans les tableaux ci-dessous :

| Latitude | Longitude | Altitude | Albédo du sol | Orienta-tion | Inclinaison |
|----------|-----------|----------|---------------|--------------|-------------|
| 27,88 | -0,28 | 269 m | 0.2 | Sud-Est | 90° |

Tableau 01 : Caractéristiques du site de URER-MS (Route de Reggane, ADRAR)

| Composants | Caractéristiques | Valeur | Unité |
|--|---|----------|----------------|
| Dimension (Boitier en Bois) | Longueur | 1.87 | m |
| | Largeur | 0.96 | m |
| | Ecartement vitre-absorbeur | 0.10 | m |
| | Epaisseur capteur | 0.19 | m |
| | Surface | 1.79 | m ² |
| | Vitres (en verre simple) -Un seul vitre- | Longueur | 1.80 |
| Largeur | | 0.90 | m |
| Epaisseur | | 0.004 | m |
| Plaque (l' Absorbeur) (en cuivre) | Longueur | 1.80 | m |
| | Largeur | 0.90 | m |
| | Epaisseur | 0.0015 | m |
| Isolant (en polystyrène) | Longueur | 1.80 | m |
| | Largeur | 0.90 | m |
| | Epaisseur | 0.04 | m |
| Le capteur fonction en convection naturelle : le fluide entre par l'orifice du bas et sort par l'orifice en haut, la longueur des deux orifices et la largeur sont : L1=50cm, w1=10cm. La forme des orifices est rectangulaire comme celle de capteur | | | |

Tableau 02 : Caractéristiques des éléments du capteur à air



a. Vue de face b. Vue d'arrière

Figure 3 : Prototype expérimentale

du capteur à air

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. 5.1.RESULTATS NUMERIQUES, EXPERIMENTALES ET COMPARAISONS:

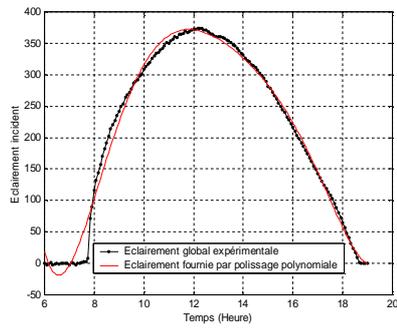


Figure 4 : Eclairement global

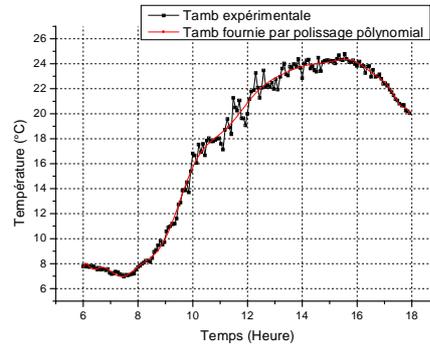


Figure 5 : Température ambiante

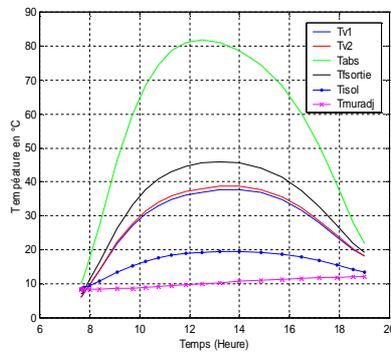


Figure 6 : Allure de température des couches capteur pour la modélisation et l'expérimentation

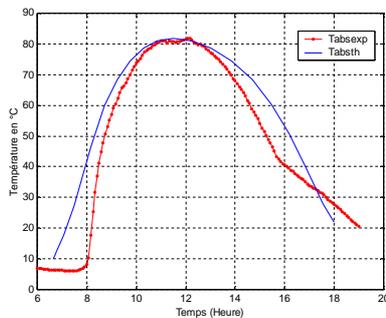
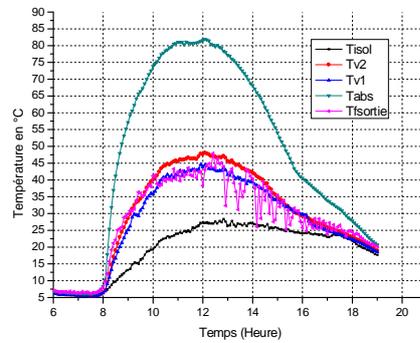


Figure 7 : Température de l'absorbeur

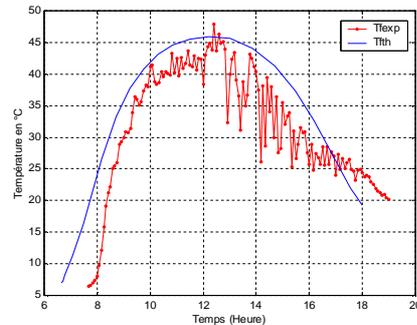


Figure 8 : Température de fluide caloporteur

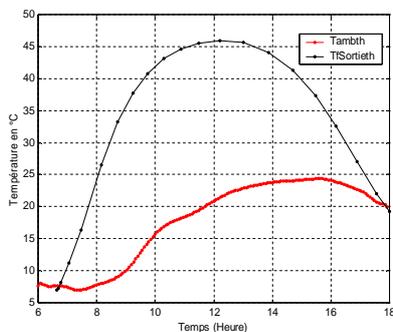
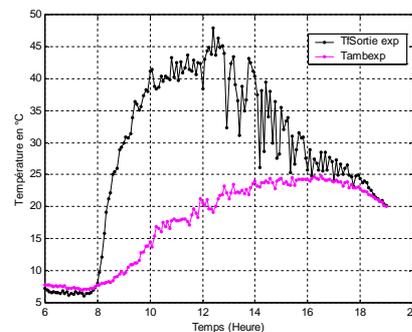


Figure 09: Température de fluide caloporteur comparé à la température ambiante pour la modélisation et l'expérimentation



5.2. INTERPRETATIONS :

L'observation et l'analyse des différentes figures (de 01 à 10) nous permet de tirer les remarques suivantes :

- L'inertie de notre capteur est faible car il est réalisé récemment (il été en équilibre thermique) pour cela il y a une diminution remarquable de la température de sortie l'après midi.
- On a pu simuler la température d'entrée à une distance 0.002m à l'entrée du capteur, et on peut aussi simuler les profil des températures de toutes les couches à différentes distances le long du capteur.
- La température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui explique aisément par son facteur d'absorption solaire (absorbeur en cuivre peinturé en noir c.à.d. avec couche sélective).
- D'après les profils des températures simulées on apercevait bien que le polystyrène assure une bonne isolation.
- La température de sortie du fluide varie en fonction du flux solaire.
- Notre conception a permis d'obtenir des températures du fluide considérable à la sortie, favorable pour les exploiter dans le préchauffage et le chauffage de bâtiments, surtout que c'est de l'énergie dissipé en tout cas, en plus le capteur tel qui a été réalisé est admirable question forme (joli) et il n'ajoute que du bien en lui intégrant en façade.

5.3. RENDEMENT INSTANTANE DU CAPTEUR SOLAIRE

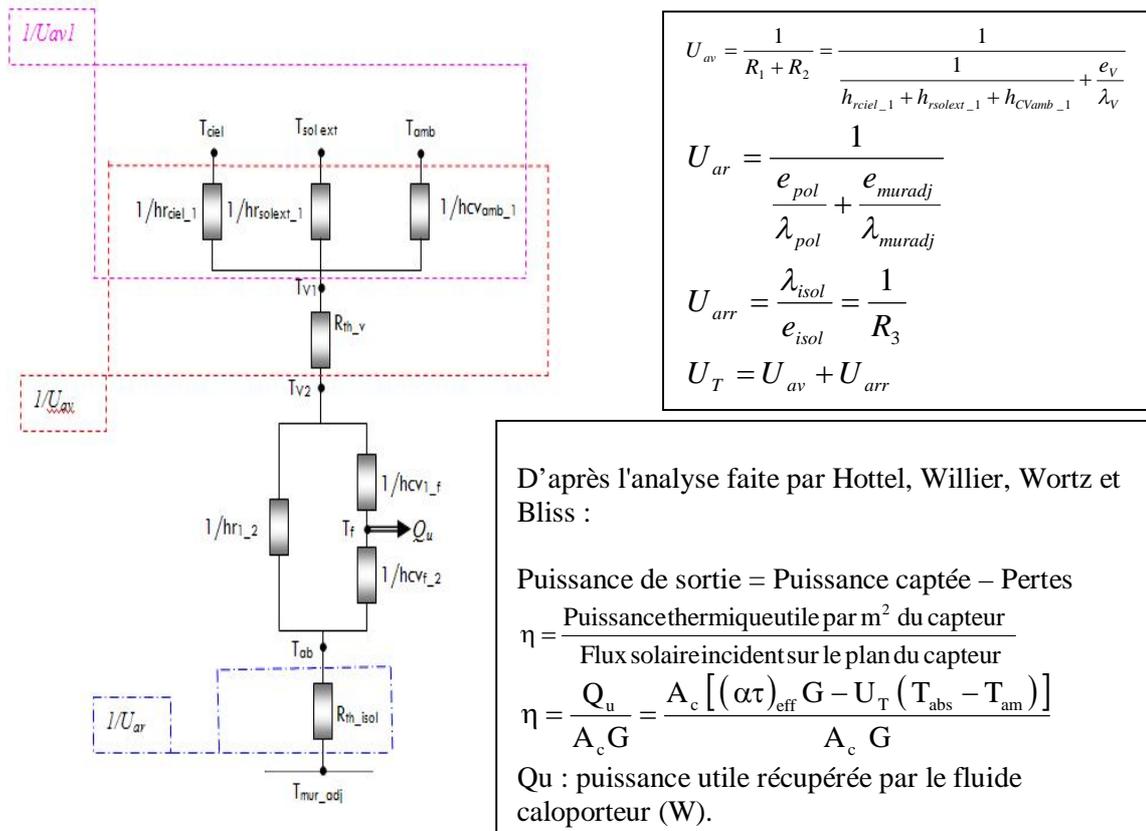


Figure 10 : Analogie électrique du réseau résistif relatif au capteur

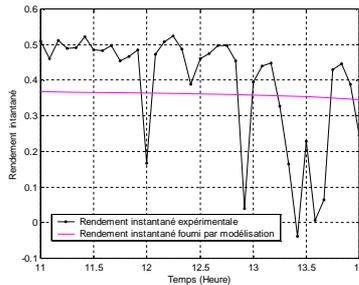


Figure 11: Rendement instantané

Selon le standard d'ACHRAE le rendement instantané se calcule entre 11h00 et 14h00 c.à.d. deux heures avant 13h00 et deux heures après. C'est un rendement instantané d'un capteur à air incliné de $\frac{\pi}{2}$.

6. CONCLUSION

Par le biais de cette étude on a pu aboutir à l'élaboration d'un modèle numérique qui permet de décrire le comportement d'un capteur thermique à air en régime transitoire.

L'expérimentation a validé ce modèle qui nous a donné des résultats raisonnables car la variance est dans l'intervalle admissible des modèles numériques (inférieure à <10%). D'où, on peut dire que la modélisation en régime dynamique rend compte du comportement thermique du capteur avec une bonne précision, aussi, elle confirme le rôle important de l'inertie du capteur.

Après sa validation, le modèle devient un outil qui pourrait être exploité pour obtenir des grandeurs instantanées du capteur à étudier et cela tous facilement et en gardant la liberté de varier :

- Les caractéristiques physiques, et les dimensions du capteur, ce qui permet d'étudier plusieurs variantes du capteur thermique à air, pour une meilleure optimisation de la conception avant la réalisation de prototype.
- Le lieu d'implantation du capteur et les conditions météorologiques.
- L'inclinaison, et l'orientation.
- Le domaine d'application (chauffage, séchage,...)

Enfin, nous prévoyons que les résultats de ce modèle peuvent être couplés avec les logiciels utilisés dans le domaine de Génie Civil tel que Transys pour étudier plus profondément l'effet de l'intégration d'un tel capteur au bâtiment surtout que cette application solaire, trop peu développée à mon sens, mais simple, fiable, économique et sans entretien ni risques liés aux aléas climatiques.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] D.SEMMAR ET AL « Etude et réalisation d'un séchoir solaire plan à air » revue énergies renouvelables, physique énergétique ; pp 33-38 ; (1998).
- [2] KOU, Q., KLEIN S.A., BECKMAN, W.A., A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems, Solar Energy, vol. 64, pp. 33–40, 1998.
- [3] BAHRIA S., « influence de la pose de chicanes sur le rendement d'un capteur solaire plan air », mémoire de Magister, USTHB, 2010.
- [4] TOUAFEK K., HADDADI M., MALEK A. "Design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production", Energy and Buildings, vol 59, pp 21–28, 2013.
- [5] BEKKOUCHE, SM EL AMINE. 2008 « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires » Thèse de doctorat, http://www.univ-tlemcen.dz/~benouaz/doctorat/bekkouche_doct.pdf