



# Étude de l'impact de l'espace entre deux vitres sur le rendement du capteur solaire plan à double vitrage

Mohammed Lakhdar BEN GUEHZA <sup>#1</sup>, Abdelkader SOUIGAT <sup>#2</sup>, Mohammed AZZAOUÏ <sup>\*3</sup>

<sup>#</sup> Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Lab. Développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA), Ouargla 30 000, Algérie

<sup>1</sup>benguehzaph@gmail.com

<sup>2</sup>souigataek@gmail.com

<sup>\*</sup> Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Lab. Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces, Ouargla 30 000, Algérie

<sup>3</sup> mohazzaoui@gmail.com

**Abstract**— Les but de ce travail est d'étudier l'impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur le rendement d'un capteur solaire plan à double vitrage. Notre choix est sur la région de Ouargla, dans les considérations les distinctions suivantes : Le ciel est clair presque toute la journée - La Durée d'Insolation est grande - Le climat en été est chaud et sec - Le rayonnement solaire est gratuit.

On choisit comme typique le 15 Juin. Dans cette étude du côté théorique on utilise comme méthode numérique (les différences fines) pour simplifier les systèmes d'équations de l'énergie, La résolution du système est faite à l'aide de la méthode itérative de Gauss-Seidel programmée en langage Fortran. On remarque de cette étude que pour avoir un rendement optimum il faut que :

- L'inclinaison optimale du capteur 10°
- L'espace optimale entre les deux vitres soit 1.5 cm.

**Keywords**— capteur solaire, double vitrage, espace, rendement

## I. INTRODUCTION

Le chauffe-eau solaire (CES) est une technologie des énergies renouvelables bien prouvée et utilisée dans beaucoup de pays du monde. La technologie de base est simple bien qu'il y a une variété importante des systèmes de CES.

La conversion d'énergie solaire en chaleur pour Le chauffe-eau solaire (CES) est devenue un enjeu énergétique majeur. Dans les pays en voie de développement, s'affranchir de la dépendance pétrolière, parmi les moyens utilisés pour le chauffage de l'eau est le capteur solaire plan à double vitrage, il est survenu de nombreuses améliorations, y compris l'ajout de couvertures (augmentation du nombre des vitrages pour une réduction des pertes par convection), Dans cette étude, nous examinons l'impact de l'espace entre la vitre de protection et la vitre intermédiaire sur rendement.

## II. RENDEMENT D'UN CAPTEUR SOLAIRE

Le rendement thermique d'un capteur solaire plan est défini par la relation suivante [1]:

$$\eta_{th} = \frac{P_u}{P_g S} \quad (1)$$

## III. CAPTEUR SOLAIRE PLAN A DOUBLE VITRAGE

La figure (1) représente un modèle de capteur solaire plan à double vitrage [1].

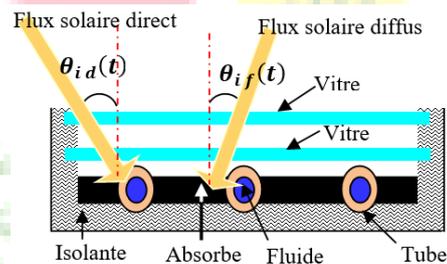


Fig. 1 Capteur solaire plan a double vitrage

## IV. PARAMETRES DU SYSTEME UTILISE DANS LA SIMULATION

TABLE 1

PARAMETRES DU SYSTEME UTILISE DANS LA SIMULATION

Paramètres	Valeur
Altitude	141 m
Latitude $\varphi$ ( $\varphi$ )	31°57'
Longitude $\lambda$ ( $\lambda$ )	5°24'E
Albédo $\rho$ ( $\rho$ )	0.35
La Vitesse du vent $v_{ven}$ $V_{ven}$	4.3 m/s
La distance entre l'absorbeur et la deuxième vitre $ep_{pv2}$ $ep_{pv_2}$	1.5 cm
Coefficient d'extinction de la vitre $k$	4m <sup>-1</sup>
Débit massique de l'eau $\dot{m}$	0.0088 $\frac{kg}{s}$ 8.8 $\frac{g}{s}$



Longueur de capture H	1m
Largeur de capture W	1.1m

### V. HYPOTHESE

- Le ciel est considéré comme un corps noir de température équivalente calculée.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- Les surfaces d'échanges de chaleur par rayonnement sont supposées grises et diffusantes aussi la voûte céleste.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Le vent est supposé souffler parallèlement aux faces du système.
- La température du fluide à l'entrée d'une tranche quelconque est égale à sa température de sortie de la tranche précédente.
- Le régime d'écoulement est transitoire.
- Le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope.
- Les températures des faces intérieures et extérieures de la vitre, de l'absorbeur, et isolant sont supposées uniformes.
- La température de face absorbeur opposé (vis-à-vis) à la face intérieure de l'isolant à la même température.
- L'épaisseur de tube est négligée.
- Toutes les pertes au tube vers l'isolant et vers la vitre sont négligées parce que la surface d'échange est très petite.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- On néglige les pertes thermiques au niveau des faces latérales
- On néglige l'épaisseur de tube c'est-à-dire température du tube et l'absorbeur et est la même.

### VI. LES DIFFERENTES PERTES THERMIQUES

La figure (2) représente les différentes pertes thermiques [1]

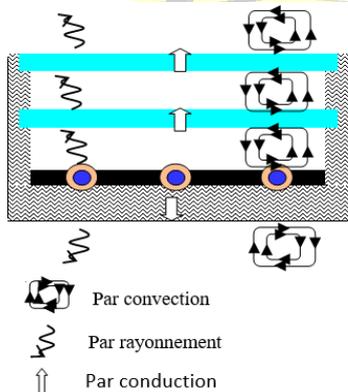


Fig. 2 Capteur solaire plan a double vitrage

### VII. SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALANT

Solen les hypothèses, on obtient la figure (3) [1], [2]

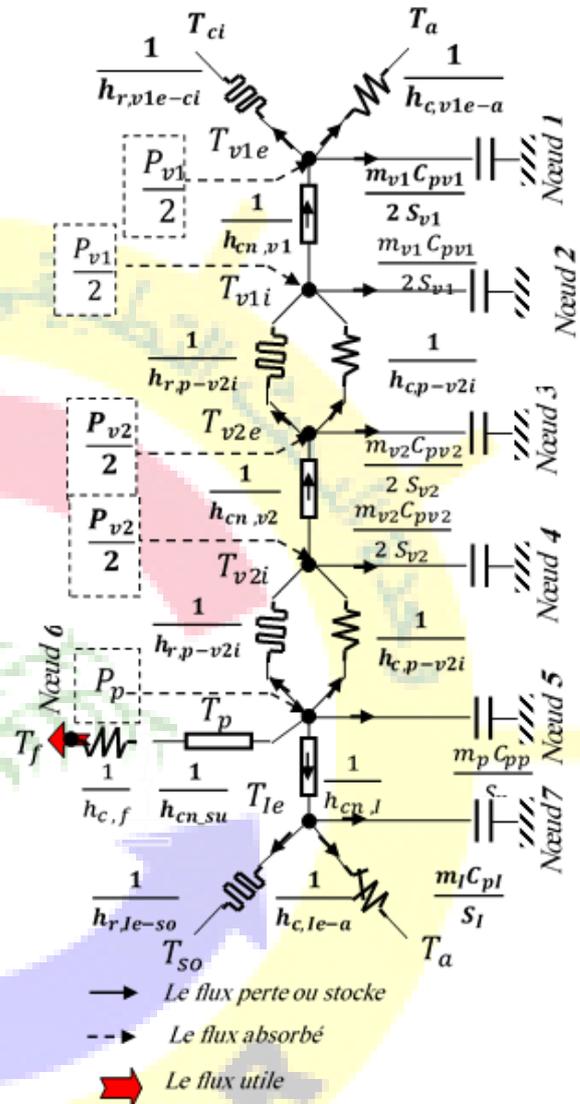


Fig. 3 Schéma électrique équivalent

### VIII. BILAN THERMIQUE AU NIVEAU DE CHAQUE SECTION

On applique le premier principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (2)$$

Selon l'équation (1) et la figure (3) on peut avoir



A. Pour La Première Vitre

La face extérieure :

$$\frac{C_{PV1} M_{V1}}{2S_{V1}} \frac{\partial T_{V1e}}{\partial t} = \frac{P_{V1e}}{2} + h_{c,V1e-a} (T_a - T_{V1e}) + h_{r,V1e-ci} (T_{ci} - T_{V1e}) + h_{cn,V1} (T_{V1i} - T_{V1e}) \quad (3)$$

La face intérieur:

$$\frac{C_{PV1} M_{V1}}{2S_{V1}} \frac{\partial T_{V1i}}{\partial t} = \frac{P_{V1i}}{2} + h_{c,V1e-a} (T_{V2e} - T_{V1i}) + h_{r,V2e-V1i} (T_{V2e} - T_{V1i}) + h_{cn,V1} (T_{V1e} - T_{V1i}) \quad (4)$$

B. Pour La Deuxième Vitre

La face extérieur:

$$\frac{C_{PV2} M_{V2}}{2S_{V2}} \frac{\partial T_{V2e}}{\partial t} = \frac{P_{V2e}}{2} + h_{c,V2e-vli} (T_{V1i} - T_{V2e}) + h_{r,V2e-v2i} (T_{V1i} - T_{V2e}) + h_{cn,V2} (T_{V2i} - T_{V2e}) \quad (5)$$

La face intérieure:

$$\frac{C_{PV2} M_{V2}}{2S_{V2}} \frac{\partial T_{V2i}}{\partial t} = \frac{P_{V2i}}{2} + h_{c,P-V2i} (T_P - T_{V2i}) + h_{r,P-V2i} (T_P - T_{V2e}) + h_{cn,V2} (T_{V2e} - T_{V2i}) \quad (6)$$

C. Pour L'absorbeur

$$\frac{C_{PP} M_P}{2S_P} \frac{\partial T_P}{\partial t} = P_P + h_{c,P-V2i} (T_{V2i} - T_P) + h_{r,P-V2i} (T_{V2i} - T_P) + h_{cn,I} (T_{Ie} - T_P) + \frac{S_{P-t}}{S_P} h_{cn,P-t} (T_t - T_P) \quad (7)$$

D. Pour Le tube

$$\frac{C_{Pt} M_t}{S_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} = \frac{S_{P-t}}{S_P} h_{cn,P-t} (T_P - T_t) + h_{c,t-f} (T_f - T_t) \quad (8)$$

E. Pour La Fluide Caloporteur

$$\rho_f \pi r_i^2 C_{fp} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{m C_{fp}}{n} \frac{\partial T_f}{\partial x} = 2\pi r_i h_{c,t-f} (T_t - T_f)$$

Quand le fluide écoule dans le tube à une vitesse modérée le terme du stockage sera très petit par rapport au terme de la convection. Par contre si le fluide est en repos dans le tube, le terme du stockage n'est plus négligeable. Donc l'équation Précédent s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{m C_{fp}}{n} \frac{\partial T_f}{\partial x} = 2\pi r_i h_{c,t-f} (T_t - T_f) \quad (9)$$

F. Pour L'isolant

$$\frac{C_{PI} M_I}{2S_I} \frac{\partial T_{Ie}}{\partial t} = h_{cn,I} (T_P - T_{Ie}) + h_{r,I-so} (T_{so} - T_{Ie}) \quad (10)$$

IX. LES DIFFERENTS COEFFICIENTS D'ECHANGE THERMIQUE

Par rayonnement [1]

$$h_{r,1-2} = \sigma \frac{(T_{V2e}^2 + T_{Ii}^2)(T_{V2e} + T_{Ii})}{\frac{1}{\varepsilon_{V1}} + \frac{1}{\varepsilon_{V2} - 1}}$$

Par convection entre la vitre 1 et l'ambiance et l'isolant et le sol [3]

$$h_c = 5.67 + 3.86 v_{vent}$$

Par conduction

$$h_{cn} = \frac{\lambda}{e}$$

Par convection entre les deux vitres et entre l'absorbeur et le vitre [4]

$$\frac{H}{e P_{V2V1}} \geq 12 \text{ et } 0 \leq \beta \leq 70^\circ$$

$$Nu = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_L \cos(\beta)} \right]^+ \left[ 1 - \frac{1708 (\sin(1.8\beta))^{1.6}}{Ra_L \cos(\beta)} \right] + \left[ \frac{Ra_L \cos(\beta)^{\frac{1}{3}}}{18} - 1 \right]^+$$

Où le l'exposant "+" implique seulement les valeurs positives des termes dans les supports carrés qui devraient être utilisés (on le néglige lorsqu'elles deviennent négatives).

$$\frac{H}{e P_{V2V1}} \geq 12 \text{ et } 0 \leq \beta \leq \beta_{cr}$$

$$Nu = Nu_{\beta=0} \left[ \frac{Nu_{\beta=90}}{Nu_{\beta=0}} \right]^{\beta/\beta_{cr}} (\sin(\beta_{cr}))^{0.4/\beta_{cr}}$$



TABLE 2  
VALEUR DE L'ANGLE CRITIQUE POUR CAVITE RECTANGULAIRE INCLINEE  
[4]

Rapport d' aspect $\frac{H}{e p_{v1} v_2}$	Angle critique $\beta_{cr}$
1	25°
3	53°
6	60°
12	67°
>12	70°

Par convection tube-fluide

Pour calculer le coefficient d'échange thermique entre le tube et le fluide caloporteur  $h_{c,t-f}$  par convection forcée et pour les conduites circulaires, on peut utiliser des corrélations, en tenant compte des adimensionnels suivants [5] :

Nombre de Reynolds  $Re_f = \frac{\rho_f v_f D_{ii}}{\mu_f}$

Nombre de Graetz  $Gz_f = \frac{Re_f Pr_f D_{ii}}{L_f}$

Nombre de Stanton  $St = \frac{Nu_f}{Re_f Pr_f}$

Dans le cas d'un écoulement laminaire  $Re_f < 2100$

Pour  $Gz_f < 100$

$$Nu_f = 3.66 + \frac{0.085 Gz_f}{1 + 0.047 Gz_f^{2/3}}$$

Pour  $Gz_f > 100$  [Sieder-Tate]

$$Nu_f = 1.86 Gz_f^{1/3}$$

Dans la zone transitoire  $2100 < Re_f < 10^4$  [Haussen]

$$Nu_f = 0.116 \left( Re_f^{2/3} - 125 \right) P_f^{1/3} \left[ 1 + \left[ \frac{D_{ii}}{L_f} \right]^{2/3} \right] \left[ \frac{\mu_f}{\mu_p} \right]^{0.14}$$

Dans le cas d'un écoulement turbulent  $Re_f > 10^4$  [Sieder-Tate]

$$Nu_f = 0.027 Re_f^{0.8} P_f^{1/3} \left[ \frac{\mu_f}{\mu_p} \right]^{0.14}$$

#### X. DU SYSTEME DE SIMULATION DE PROCEDURE

Pour le processus de maillage on divise le domaine de calcul en plusieurs tranches fictives le long de sens de l'écoulement du fluide caloporteur (voir figure 4)

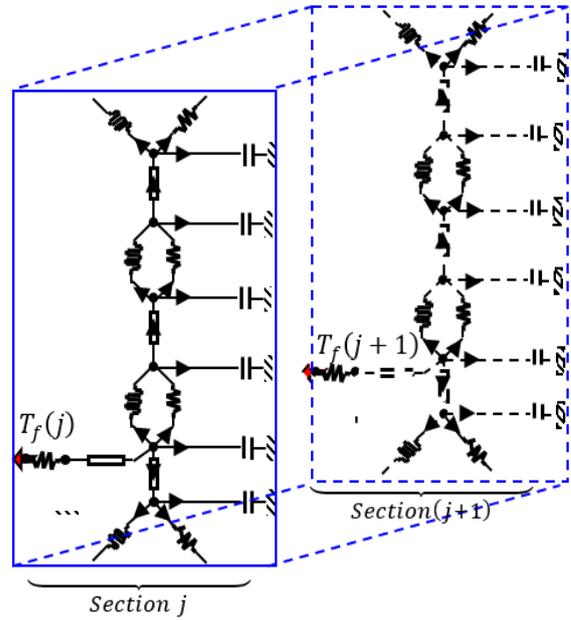


Fig. 4 Schéma de tranche successives j et (j+1)

#### A. Discrétisation Des Equations Du System

Le système des équations différentielles aux dérivées partielles n'est pas facile à résoudre analytiquement, pour cela on utilise la méthode numérique la méthode des différences finies. L'idée est de calculer (une approximation de) la solution aux points d'une grille de calcul suffisamment fine. Pour cela, on se donne un pas de discrétisation en espace

$$\Delta x = \frac{L}{n} > 0 \text{ et un pas de discrétisation en temps } \Delta t > 0$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}; \frac{T_{j+1}^t - T_j^{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}; \frac{T_{j+1}^t - T_j^t}{\Delta x}$$

On peut discrétiser le capteur à huit nœuds voir la figure (3)

Nœud 1 : La face extérieure à la première vitre.

$$\frac{C_{PV1} M_{V1} (T_{V1e}^t(j+1) - T_{V1e}^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V1} \Delta t} = \frac{P_{V1}}{2} +$$

$$h_{c,V1e-a} [T_a^t - T_{V1e}^t(j+1)] + h_{r,V1e-ci} [T_{ci}^t - T_{V1e}^t(j+1)] + h_{cn,V1} [T_{V1i}^t(j+1) - T_{V1e}^t(j+1)]$$

Nœud 2 : La face intérieure à la première vitre.



$$\frac{C_{PV1} M_{V1} (T_{V1i}^t(j+1) - T_{V1i}^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V1} \Delta t} = \frac{P_{V1}}{2} +$$

$$h_{c,V2e-V1i} [T_{V2e}^t(j+1) - T_{V1i}^t(j+1)] + h_{r,V2e-V1i}$$

$$[T_{V2e}^t(j+1) - T_{V1i}^t(j+1)] +$$

$$h_{cn,V1} [T_{V1e}^t(j+1) - T_{V1i}^t(j+1)]$$

Nœud 3 : La face extérieure à la deuxième vitre.

$$\frac{C_{PV2} M_{V2} (T_{V2e}^t(j+1) - T_{V2e}^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V2} \Delta t} = \frac{P_{V2}}{2} +$$

$$h_{c,V2e-V1i} [T_{V1i}^t(j+1) - T_{V2e}^t(j+1)] + h_{r,V2e-V1i}$$

$$[T_{V1i}^t(j+1) - T_{V2e}^t(j+1)] +$$

$$h_{cn,V2} [T_{V2i}^t(j+1) - T_{V2e}^t(j+1)]$$

Nœud 4 : La face intérieure à la deuxième vitre.

$$\frac{C_{PV2} M_{V2} (T_{V2i}^t(j+1) - T_{V2i}^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V2} \Delta t} = \frac{P_{V2}}{2} +$$

$$h_{c,p-V2i} [T_p^t(j+1) - T_{V2i}^t(j+1)] + h_{r,p-V2i}$$

$$[T_p^t(j+1) - T_{V2i}^t(j+1)] +$$

$$h_{cn,V2} [T_{V2e}^t(j+1) - T_{V2i}^t(j+1)]$$

Nœud 5 : l'absorbeur

$$\frac{C_{PP} M_p (T_p^t(j+1) - T_p^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V2} \Delta t} = P +$$

$$h_{c,p-V2i} [T_{V2i}^t(j+1) - T_p^t(j+1)] + h_{r,p-V2i}$$

$$[T_{V2i}^t(j+1) - T_p^t(j+1)] +$$

$$h_{cn,I} [T_{Ie}^t(j+1) - T_p^t(j+1)] +$$

$$\frac{S_{p-t}}{S_p} h_{cn,p-t} [T_t^t(j+1) - T_p^t(j+1)]$$

Nœud 6 : le tube

$$\frac{C_{Pt} M_t (T_t^t(j+1) - T_t^{t-\Delta t}(j+1))}{2S_{V2} \Delta t} = \frac{S_{p-t}}{S_p} h_{cn,p-t}$$

$$[T_p^t(j+1) - T_t^t(j+1)] + h_{c,t-f} [T_f^t(j+1) - T_t^t(j+1)]$$

Nœud 7 : le fluide caloporteur

$$\frac{\dot{m} c_{pf} (T_t^t(j+1) - T_t^{t-\Delta t}(j))}{N \pi D_{ii} \Delta x} = h_{cn,p-t} [T_t^t(j+1) - T_f^t(j+1)]$$

Nœud 8 : La face extérieure à l'isolant.

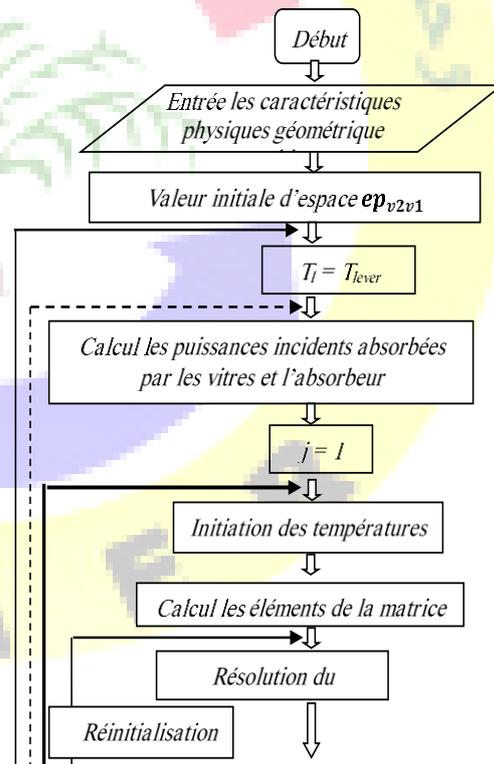
$$\frac{c_{pI} M_I (T_{Ie}^t(j+1) - T_{Ie}^{t-\Delta t}(j+1))}{S_p \Delta t} = h_{c,Ie-a} [T_a^t(j+1) - T_{Ie}^t(j+1)]$$

$$+ h_{r,Ie-so} [T_{so}^t(j+1) - T_{Ie}^t(j+1)] + h_{cn,I} [T_p^t(j+1) - T_{Ie}^t(j+1)]$$

C'est un système de huit équations à huit inconnues, il peut se mettre sous la forme d'une matrice [A] qui s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{V1e}^t(j+1) \\ T_{V1i}^t(j+1) \\ T_{V2e}^t(j+1) \\ T_{V2i}^t(j+1) \\ T_p^t(j+1) \\ T_t^t(j+1) \\ T_f^t(j+1) \\ T_{Ie}^t(j+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{pmatrix}$$

## B. Organigramme General



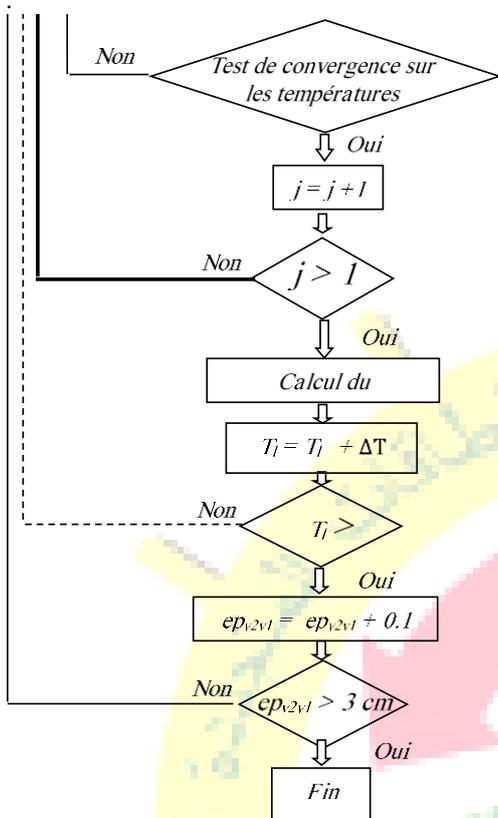


Fig. 5 Organigramme de programme de simulation

## XI. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### A. Variation Les Puissances En Fonction Du Temps

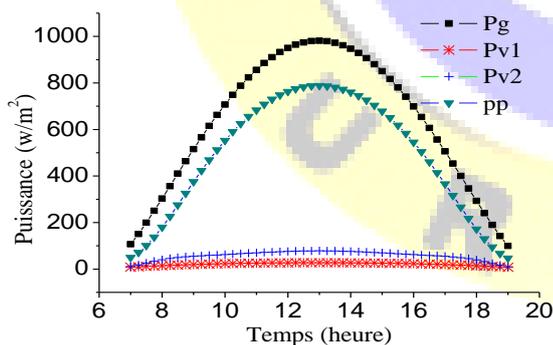


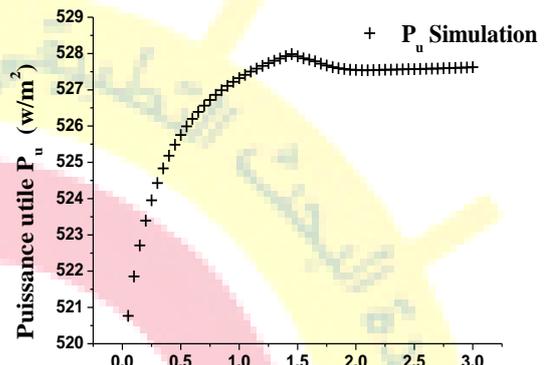
Fig. 6 Comparaison entre les différentes variations des puissances en fonction du temps

A partir de la figure 6 nous remarquons que l'intensité du

flux  $p_g$  est supérieure aux puissances absorbées par l'absorbeur  $p_p$ . Ce dernier est supérieur à celle absorbée par les deux vitres  $p_{v1}$  et  $p_{v2}$  celle par l'absorbeur  $p_p$ . Et Ceci est intuitif, car le flux incident sur le surface de captation, se

### B. L'impact De L'espace Entre La Vitre De Protection Et La Vitre Intermédiaire $ep_{v2v1}$

Sur puissance utile  $p_u$



L'impact de l'espace entre les deux vitres  $ep_{v2v1}$  (cm)

Fig. 7 Variation de la puissance utile en fonction de l'espace

D'après la figure (7) lorsqu'on augmente l'espace  $ep_{v2v1}$  entre la vitre intermédiaire et la vitre de protection on distingue trois zones :

Première zone  $0.1cm \leq ep_{v2v1} \leq 1.5cm$  on remarque une importante augmentation la puissance utile  $p_u$ .

Deuxième zone  $1.5cm \leq ep_{v2v1} \leq 2cm$  la puissance  $p_u$  diminue légèrement.

Troisième zone  $2cm < ep_{v2v1} \leq 3cm$  la puissance utile  $p_u$  est presque constante

Sur température sortie du fluide caloporteur  $T_f$

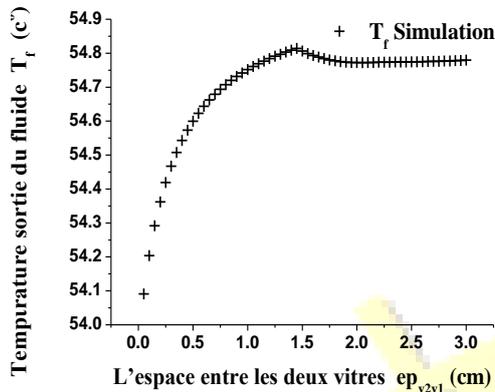


Fig. 8 Variation de la température du fluide en fonction de l'espace

D'après la figure (8) lorsqu'on augmente l'espace entre la vitre intermédiaire et la vitre de protection on distingue trois zones :

- Première zone  $0.1cm \leq ep_{v2v1} \leq 1.5cm$  on remarque une importante augmentation la température du fluide caloporteur
- Deuxième zone  $1.5cm < ep_{v2v1} \leq 2cm$  la température du fluide caloporteur diminue légèrement.
- Troisième zone  $2cm < ep_{v2v1} \leq 3cm$  la puissance utile  $p_u$  est presque constante

Sur rendement thermique

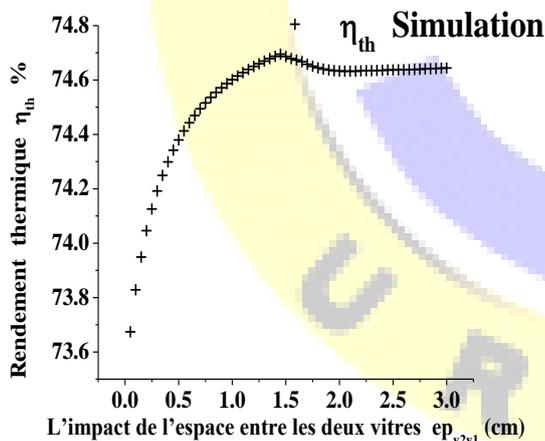


Fig. 9 Variation de rendement thermique en fonction de l'espace

D'après la figure (9) lorsqu'on augmente l'espace  $ep_{v2v1}$  entre la vitre intermédiaire et la vitre de protection on distingue trois zones :

- Première zone  $0.1cm \leq ep_{v2v1} \leq 1.5cm$  on remarque une importante augmentation le rendement thermique

Deuxième zone  $1.5cm < ep_{v2v1} \leq 2cm$  le rendement thermique diminue légèrement.

Troisième zone  $2cm < ep_{v2v1} \leq 3cm$  le rendement thermique est presque constante

En fin de compte on remarque

## XII. CONCLUSION

On remarque de cette étude que, pour accroître l'efficacité de la vitre de protection c'est-à-dire augmenter le rendement du capteur solaire à double vitrage dont les caractéristiques énumérées dans le tableau (1), nécessite ce que suit :

Pour avoir un rendement maximal de notre capteur solaire l'espace entre les deux vitres doit être  $ep_{v2v1} = 1.5cm$

Lorsque l'espace entre les deux vitres supérieures à 2 cm conduit à un impact nul sur le rendement.

Heureusement l'espace optimale est très petite, ce qui nous amène nous utilisons une surface d'isolant des côtes latérale est très réduit à qui nous conduit :

- La diminution du poids.
- La diminution du coût de la production de notre capteur.
- La diminution des pertes thermiques aux niveaux des faces latérales.

## REFERENCES

- [1] J. a. W.A.Beckman, Solar engineering of thermal Processes, 4th ed éd., New York: JohWiley, 1980, p. p 260.
- [2] C. Cristofari and G. Notton and P.Poggi and A. Louche , influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector , international journal of thermal sciences , 42, 455-469 , July, 2002, p 460
- [3] S.M.A Bekkouche and T.Benouaz and F.Bouayad ,modélisation thermique d'un capteur solaire plan a eau ,c.u.bechar, algerie-sipe8 ,2006 p13
- [4] Yunus and A. Çengel , heat reansfer a practical approach ,second edition ; copyright 2003
- [5] J.P.Holman ,HEAT TRANSFER , Ninth edition , copyright 2002