

III .1 Introduction :

Les panneaux solaires hybrides sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique, ceci permet de l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée. La production de cette énergie électrique et thermique d'un PVT dépend des plusieurs paramètres d'entrées et de sorties : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur.

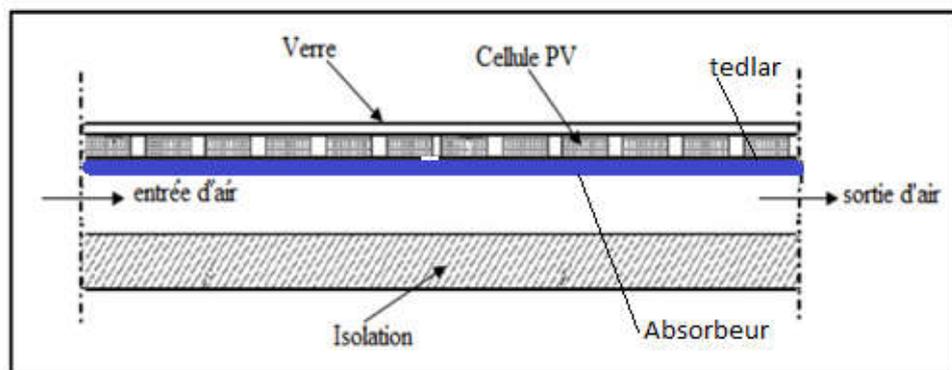


Figure III.1 : Conception du panneau PV/T étudié dans ce travail

III .2 Éléments de constructions et principe :

Les éléments essentiels sont:

- Le vitrage.
- Le panneau photovoltaïque.
- Le tedlar
- La plaque absorbante.
- Le fluide caloporteur.
- L'isolant.

A- Le panneau photovoltaïque :

Le rôle du panneau photovoltaïque est de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique, il se compose de trois couches : la première c'est une couche du verre qui est la face exposée au rayonnement incident, la deuxième couche qui contenant les cellules photovoltaïques et la troisième couche protectrice qui est le tedlar.

la **Figure III.2**-suivante présente ces trois couches de PV.

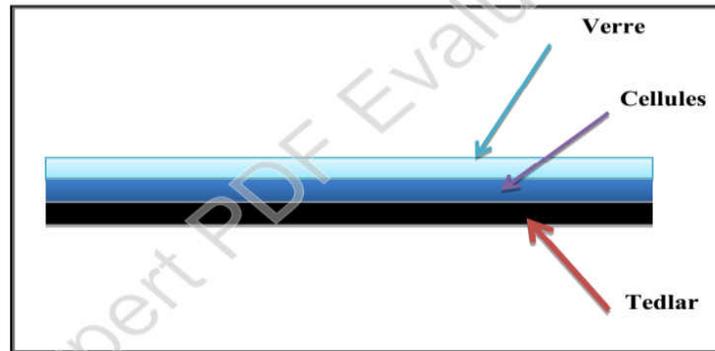


Figure III.2 : Vue des trois couches de panneau photovoltaïque

B- Fluide caloporteur :

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise un fluide caloporteur l'air.



Figure III.3 : Schéma d'un panneau avec son système d'évacuation de la chaleur à air

C- Isolant :

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolant, le tableau suivant regroupe les principales propriétés thermiques, de quelques matériaux isolants.

Matériau	λ (W/m.k)	ρ (kg/m ³)	C_p (j/kg.k)	$a = (\lambda / \rho \cdot C_p)$ (m ² /s)
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Laine	0.040	450	1880	0.47

Tableau III.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants

III.3 Principe de l'étude thermique d'un PV/T :

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du panneau PV/T, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante :

La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue – l'énergie perdue

III.4 Bilan énergétique du capteur hybride PVT :

Le panneau étudié est un modèle de 7 nœuds. Les différents nœuds du ce panneau solaire sont indiqués sur la figure suivante :

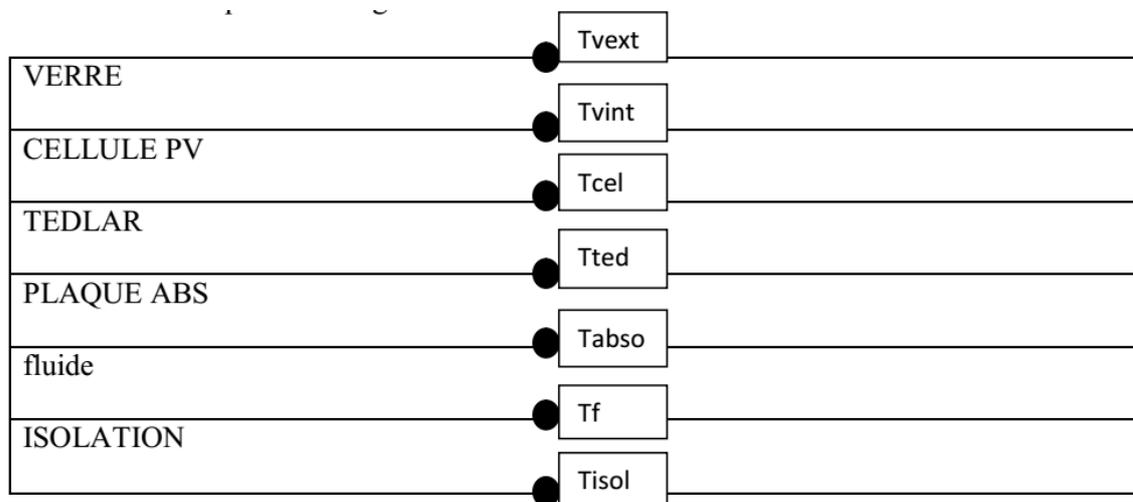


Figure III.4 : Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit [58] :

$$Q_{\text{sun}} = A_{\text{verre}} I \tau_{\text{verre}} \alpha_{\text{cel}} \quad \text{III. 1}$$

A_{verre} : Surface du verre (m^2)

I : Rayonnement directe totale absorbée par la cellule solaire (W/m^2)

τ_{verre} : Transmittivité du verre

α_{cel} : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit :

$$Q_{rad\ v-ciel} = \sigma \epsilon_v \frac{1}{2} (1 + \cos \sigma) (T_v^2 + T_{ciel}^2) (T_v + T_{ciel}) \quad \text{III. 2}$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en (W/ m² K⁴)

ϵ_v : Émissivité du verre

A_v : Surface du verre en (m²)

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad \text{III. 3}$$

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur comme suit:

$$Q_{conv\ v-a} = h_{vent} A_v (T_v - T_a) \quad \text{III. 4}$$

Avec :

T_v : Température du verre du capteur hybride (K)

T_a : Température ambiante (K)

$h_{c,a}$: Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m²K), il est donné par l'expression suivante [58] :

$$h_{vent} = 2.8 + 3.0V_{vent} \quad \text{III. 5}$$

Les équations donnant le coefficient de transfert par convection :

$$h_{conv\ abso-f} = \frac{Nu\lambda_f}{L_{abso}} (T_{abso}) \quad \text{III. 6}$$

$$h_{conv\ f-isol} = \frac{Nu\lambda_{isol}}{L_{isol}} (T_{isol}) \quad \text{III. 7}$$

➤ Pour la face extérieure du verre :

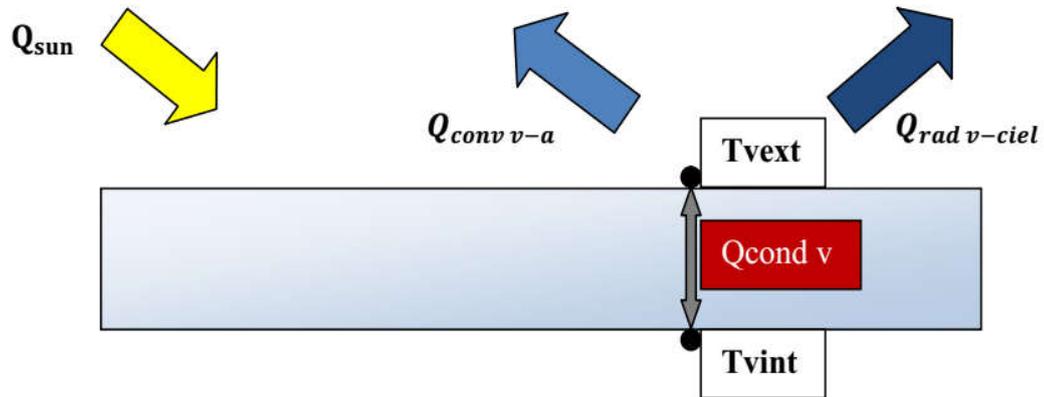


Figure III.5 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face extérieure est comme suit :

$$Q_{sun} - Q_{rad\ v-ciel} - Q_{conv\ v-a} - Q_{cond\ v} = 0 \tag{III. 8}$$

$$A_v I - \sigma \epsilon_v \frac{1}{2} (1 + \cos \sigma) (T_{vext}^2 + T_{ciel}^2) (T_{vext} + T_{ciel}) - h_{conv\ ver-a} (T_{vext} - T_a) - h_{cond\ v} A_v (T_{vext} - T_{vint}) = 0 \tag{III. 9}$$

$$h_{cond\ ver} = \frac{\lambda_v}{\delta_v} \tag{III. 10}$$

On note:

$$a_1 = (h_{vent} + h_{cond\ v} + h_r) * A_v \tag{III. 11}$$

$$b_1 = -h_{cond\ v} * A_v \tag{III. 12}$$

$$r_1 = (\alpha_{pv} * A_v * I (i)) + ((h_{vent} + h_r) * A_v * T_a (i)) \tag{III. 13}$$

L'équation (III.8) devient :

$$a_1 T_{vext} + b_1 T_{vint} = r_1 \tag{III. 14}$$

λ_v : La conductivité thermique du verre

δ_v : L'épaisseur de verre

➤ Pour la face intérieure du verre :

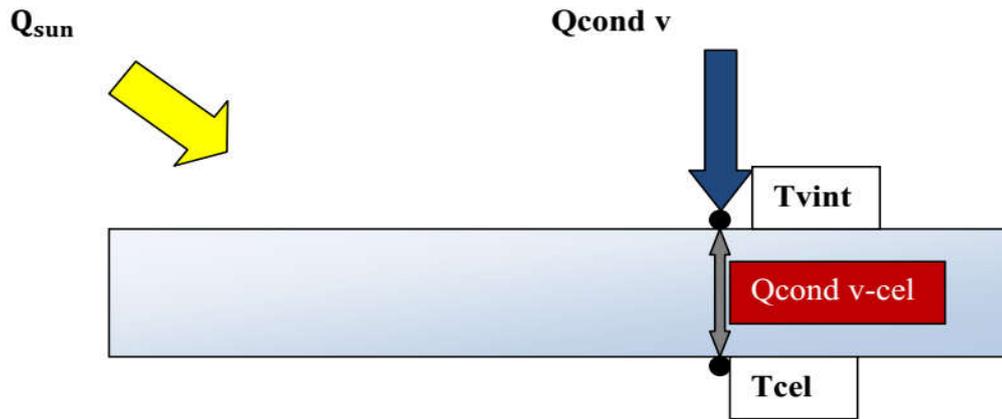


Figure III.6 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face intérieur est comme suit :

$$Q_{sun} + Q_{cond v} - Q_{cond v-cel} = 0 \tag{III.15}$$

$$A_v I \tau_v + h_{cond ver} A_v (T_{vext} - T_{vint}) - h_{cond v-cel} A_v (T_{vint} - T_{cel}) = 0 \tag{III.16}$$

$$h_{cond v-cel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \tag{III.17}$$

On note :

$$a_2 = -h_{cond v} A_v \tag{III.18}$$

$$b_2 = (h_{cond v} + h_{cond v_cel}) A_v \tag{III.19}$$

$$c_2 = -h_{cond v_cel} A_v \tag{III.20}$$

$$r_2 = (A_v * I(i) * \tau_{vit} * \alpha_{pv}) \tag{III.21}$$

L'équation (III.15) devient :

$$a_2 T_{vext} + b_2 T_{vint} + c_2 T_{cel} = r_2 \tag{III.22}$$

λ_{cel} : La conductivité thermique du cellule

δ_{cel} : L'épaisseur de cellule

➤ Pour la cellule solaire :

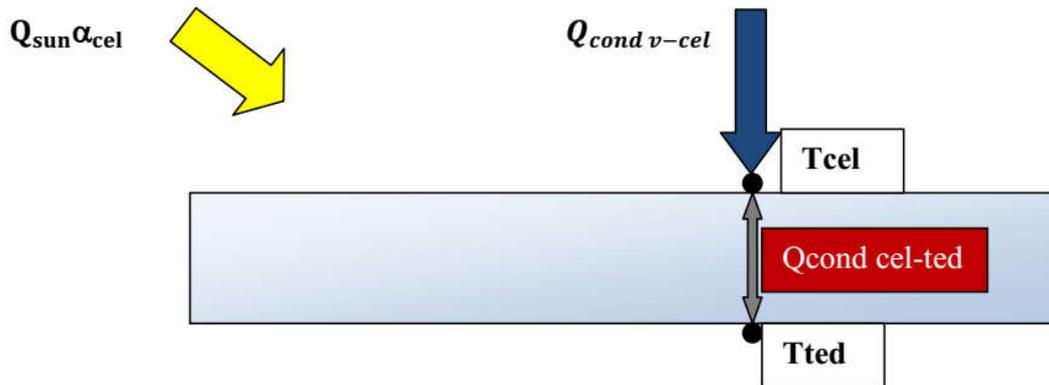


Figure III.7 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque

L'équation de l'énergie au niveau de la cellule photovoltaïque est comme suit :

$$Q_{sun} + Q_{cond\ v-cel} - Q_{cond\ cel-ted} - Q_{ele} = 0 \quad \text{III. 23}$$

$$A_v I \tau_p \alpha_{cel} + h_{cond\ ve-cel} A_{cel} (T_{vint} - T_{cel}) - h_{cond\ cel-ted} A_{cel} (T_{cel} - T_{ted}) - Q_{ele} = 0 \quad \text{III. 24}$$

On note:

$$a_3 = -(h_{cond\ v_cel} * A_v) \quad \text{III. 25}$$

$$b_3 = (h_{cond\ v_cel} + h_{cond\ cel_ted}) * A_{cel} \quad \text{III. 26}$$

$$c_3 = -h_{cond\ cel_ted} * A_{cel} \quad \text{III. 27}$$

$$r_3 = (A_v * I(i) * \tau_{vit} * \alpha_{cel}) - Q_{élé}; \quad \text{III. 28}$$

L'équation (III.23) devient :

$$a_3 T_{vint} + b_3 T_{cel} + c_3 T_{ted} = r_3 \quad \text{III. 29}$$

$$h_{cond-cel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \quad \text{III. 30}$$

$$h_{cond\ cel-ted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \quad \text{III. 31}$$

$$Q_{ele} = \frac{Q_{sun}}{\alpha_{cel}} \eta_{ref} \exp(\beta(T_{cel} - T_{ref})) \quad \text{III. 32}$$

η_{ref} : Est le rendement de référence est mesuré pour une température de référence T_{ref} prise égale à 25°C.

β : Le coefficient de température qui représente la relation entre le rendement de la cellule solaire et la température (environ 0.004 pour une cellule solaire au silicium) [58].

➤ Pour la couche de Tedlar :

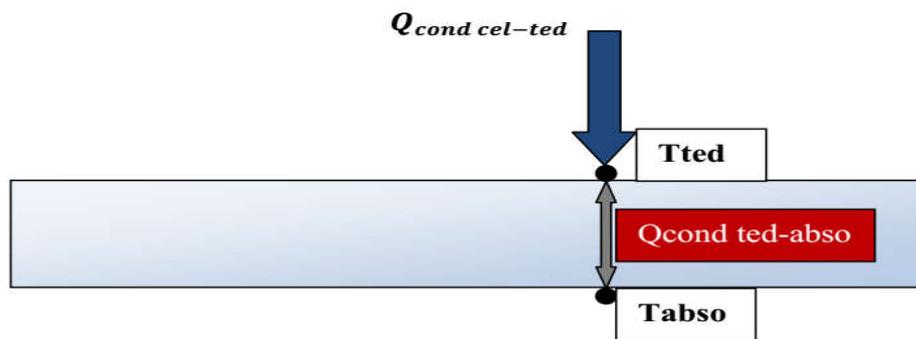


Figure III.8 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar

$$Q_{cond\ cel-ted} - Q_{cond\ ted-abso} = 0 \quad \text{III. 33}$$

$$h_{cond\ cel-ted} A_{ted} (T_{cel} - T_{ted}) - h_{cond\ ted-abso} A_{ted} (T_{ted} - T_{abso}) = 0 \quad \text{III. 34}$$

On note :

$$a_4 = h_{cond\ ted} * A_{ted} \quad \text{III. 35}$$

$$b_4 = -(h_{cond\ ted} + h_{cond\ ted_abso}) * A_{ted} \quad \text{III. 36}$$

$$c_4 = h_{cond\ ted_abso} * A_{ted} \quad \text{III. 37}$$

$$r_4 = 0 \quad \text{III. 38}$$

L'équation (III.33) devient :

$$a_4 T_{cel} + b_4 T_{ted} + c_4 T_{abso} = r_4 \quad \text{III. 39}$$

$$h_{cond\ ted-abso} = \frac{\lambda_{abso}}{\delta_{abso}} \quad \text{III. 40}$$

➤ Au niveau de la plaque absorbante :

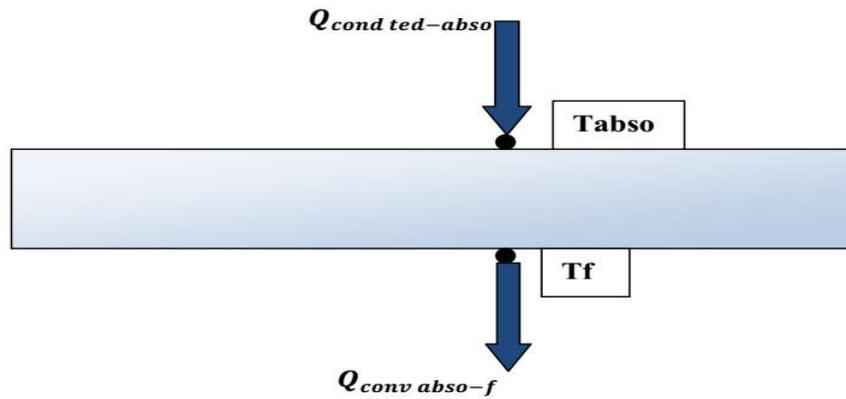


Figure III.9 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'absorbeur

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de la plaque absorbante est donnée comme suit :

$$Q_{cond ted-absor} - Q_{conv absor-f} = 0 \tag{III.41}$$

$$h_{cond ted-absor} A_{absor} (T_{ted} - T_{absor}) - h_{conv absor-f} A_{absor} (T_{absor} - T_f) = 0 \tag{III.42}$$

On note:

$$a_5 = h_{cond ted-absor} A_{absor} \tag{III.43}$$

$$b_5 = -(h_{cond ted-absor} + h_{conv absor-f}) A_{absor} \tag{III.44}$$

$$c_5 = h_{conv absor-f} A_{absor} \tag{III.45}$$

$$r_5 = 0 \tag{III.46}$$

L'équation (III.41) devient :

$$a_5 T_{ted} + b_5 T_{absor} + c_5 T_f = r_5 \tag{III.47}$$

➤ Pour le fluide caloporteur :

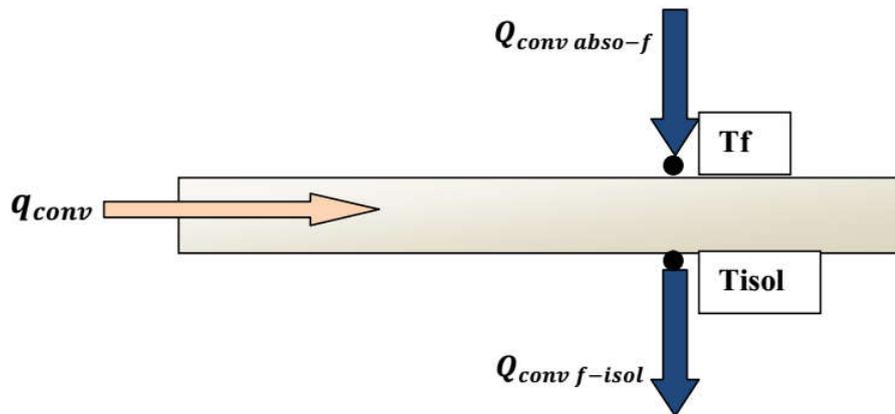


Figure III.10 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau du fluide caloporteur

L'équation de l'énergie pour le fluide caloporteur est donnée comme suit :

$$Q_{conv\ abso-f} - Q_{conv\ f-isol} = q_{conv} \tag{III. 48}$$

$$h_{conv\ abso-f} A_f (T_{abso} - T_f) - h_{conv\ f-isol} A_f (T_f - T_{isol}) = q_{conv} \tag{III. 49}$$

On note:

$$a_6 = h_{conv\ abso-f} A_f \tag{III. 50}$$

$$b_6 = -(h_{conv\ abso-f} A_f + h_{conv\ f-isol} A_f + (M \cdot c_{pm} / w)) \tag{III. 51}$$

$$c_6 = h_{conv\ f-isol} A_f \tag{III. 52}$$

$$r_6 = -(M \cdot c_{pm} \cdot T_a(i) / w) \tag{III. 53}$$

L'équation (IV.48) devient :

$$a_6 T_{abso} + b_6 T_f + c_6 T_{isol} = r_6 \tag{III. 54}$$

Avec : $q_{conv} = m C_p (T_{f0} - T_{fi})$

La température moyenne de l'air est évaluée par une pondération entre la température d'entrée d'air, T_{fi} , et la température de sortie d'air, T_{f0} . Cette température moyenne peut être évaluée par : [12]

$$T_f = \omega T_{f0} + (1 - \omega) T_{fi} \tag{III. 55}$$

ω : Facteur de pondération de température moyenne qui vaut généralement 0,74. [5]

On prend :

$$T_{fi} = T_a$$

L'équation devient :

$$T_f = \omega T_{f0} \quad \omega T_{fi} + T_{fi} \Rightarrow T_{f0} \quad T_{fi} = \frac{T_f - T_{fi}}{\omega} I \tag{III. 56}$$

Alors :

$$q_{conv} = m C_p \frac{T_f - T_a}{\omega} \tag{III. 57}$$

L'équation (III. 45) peut s'écrire sous la forme suivant :

$$h_{conv\ abso-f} A_f (T_{abso} - T_f) - h_{conv\ f-isol} A_f (T_f - T_{isol}) - m C_p (T_f - T_a) / \omega = 0 \tag{III. 58}$$

➤ Pour la couche d'isolant :

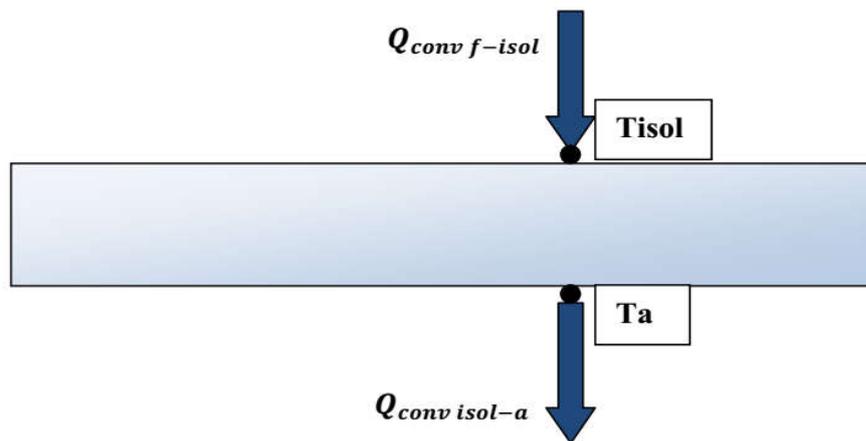


Figure III.11 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche d'isolant

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant est donnée par :

$$Q_{conv\ f-isol} - Q_{conv\ isol-a} = 0 \tag{III. 59}$$

$$h_{conv\ f-isol} A_{isol} (T_f - T_{isol}) - h_{conv\ isol-a} A_{isol} (T_{isol} - T_{al}) = 0 \tag{III. 60}$$

On note :

$$a_7 = h_{\text{convf_isol}} * A_{\text{isol}} \quad \text{III. 61}$$

$$b_7 = -(h_{\text{convf_isol}} * A_{\text{isol}} + h_{\text{vent}} * A_{\text{isol}}) \quad \text{III. 62}$$

$$r_7 = -h_{\text{vent}} * A_{\text{isol}} * T_a(i) \quad \text{III. 63}$$

L'équation (IV.59) devient :

$$a_7 T_f + b_7 T_{\text{isol}} = r_7 \quad \text{III. 64}$$

Selon les bilans, on peut former la matrice suivante :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_5 & b_5 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 & b_6 & c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & b_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{\text{vext}} \\ T_{\text{vint}} \\ T_{\text{cel}} \\ T_{\text{ted}} \\ T_{\text{abso}} \\ T_f \\ T_{\text{isol}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \end{pmatrix}$$

La matrice ci-dessus est itérativement résolue. La solution commence par une première estimation pour les températures inconnues, T_{vext} , T_{vint} , T_{cel} , T_{ted} , T_{abso} , T_f , et T_{isol} . Puis, la matrice est résolue pour obtenir les températures convergées.

III.5 Résolution numérique du système :

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes et des paramètres internes:

- Les températures au niveau de chaque couche du composant du panneau.

La résolution du système est effectuée par la méthode itérative générale.

III.5.1 la méthode itérative :

Nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'instant initial, et avec l'algorithme de calcul. Nous obtenons un système d'équations matricielles, dont la résolution permet de calculer nos inconnues.

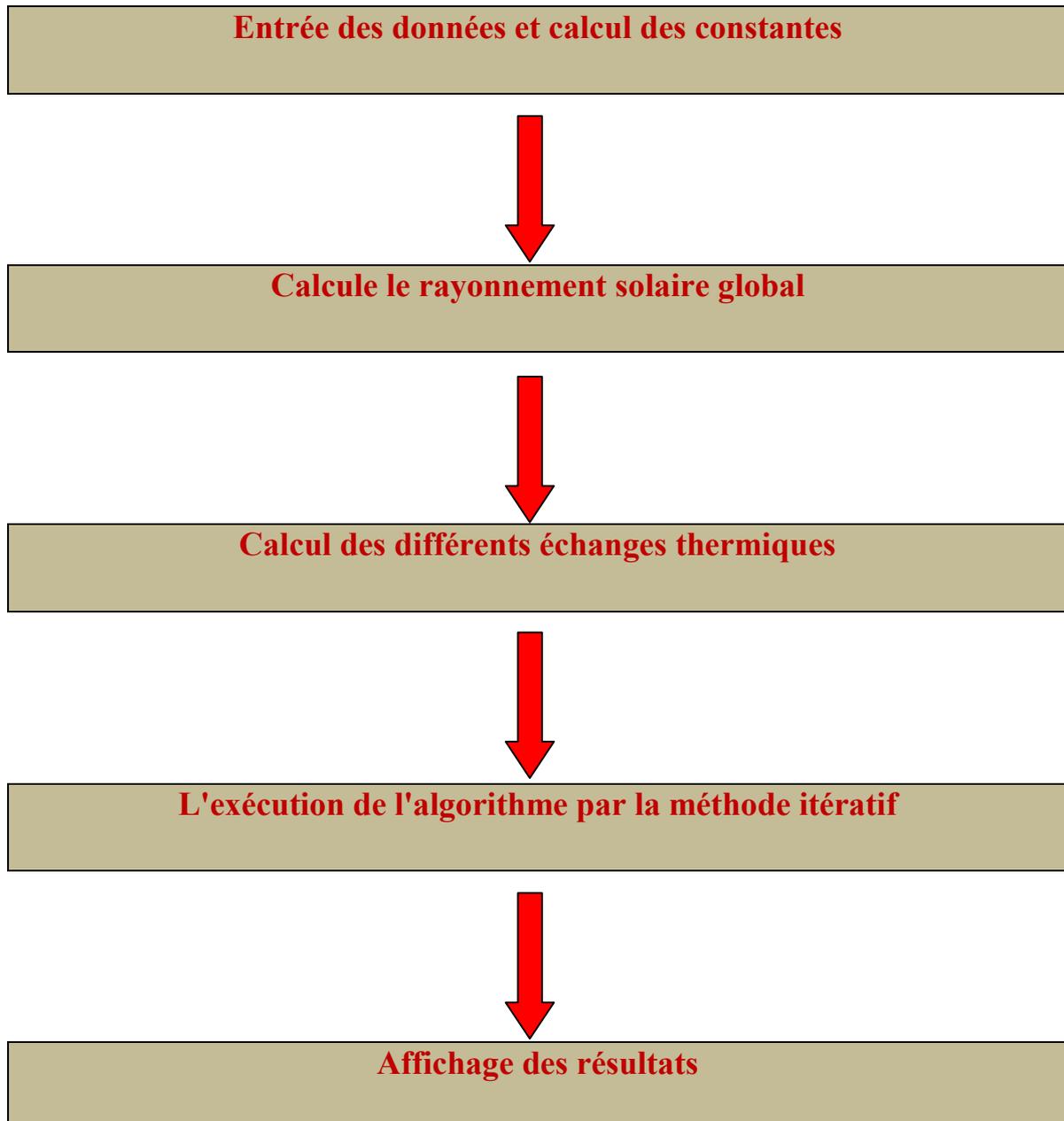
III.5.2 Traitement informatique :

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

- Entrée des données et calcul des constantes.
- la température ambiante.
- Calcul le rayonnement solaire global.
- Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir:
 - 1) Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers les composants du module PV, l'absorbeur, et l'isolant.
 - 2) Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- Nous supposons au départ que chaque composant du panneau est à la température ambiante T_a .
- Calcul de coefficient d'échange thermique par rayonnement entre:
La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.
- Calcul les coefficients d'échange thermique par convection entre :
 - a. La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.
 - b. L'absorbeur et le fluide caloporteur.
 - c. L'isolant et le fluide caloporteur.
- Calcul des coefficients d'échange thermique par conduction entre les différentes couches du PV/T.
- L'exécution de l'algorithme.

Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en MATLAB 7.

III.5.3 Plan de travail :



III.6 Données du problème :

Dans notre problème, la température ambiante est prise comme variable en fonction du rayonnement solaire.

Rayonnement solaire (W/m ²)	Température ambiante (k) [11]
500	299.2
550	302.6
600	306.3
650	310.3
700	312.2
750	313

Tableau (III.2): Les valeurs de rayonnement solaire et les températures ambiantes.

	Vitrage	Absorbeur	Cellule
Absorptivité	0.60	/	0.95
Transmissivité	0.84	/	/
Emissivité	0.90	0.95	/

Tableau (III.3): les valeurs des coefficients du rayonnement solaire du vitrage et l'absorbeur et la cellule

Données géométriques :

Elément de Construction	Longueur (M)	Surface (M ²)	Epaisseur (M)
Verre	1	1	0.003
Cellule	1	1	0.002

Tedlar	1	1	0.003
L'absorbeur	1	1	0.0028
Espace du fluide	1	1	/
L'isolant	1	1	/

Tableau (III.4) : Des données géométriques pour résoudre le problème