



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : énergétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Soltane Nour El Houda**

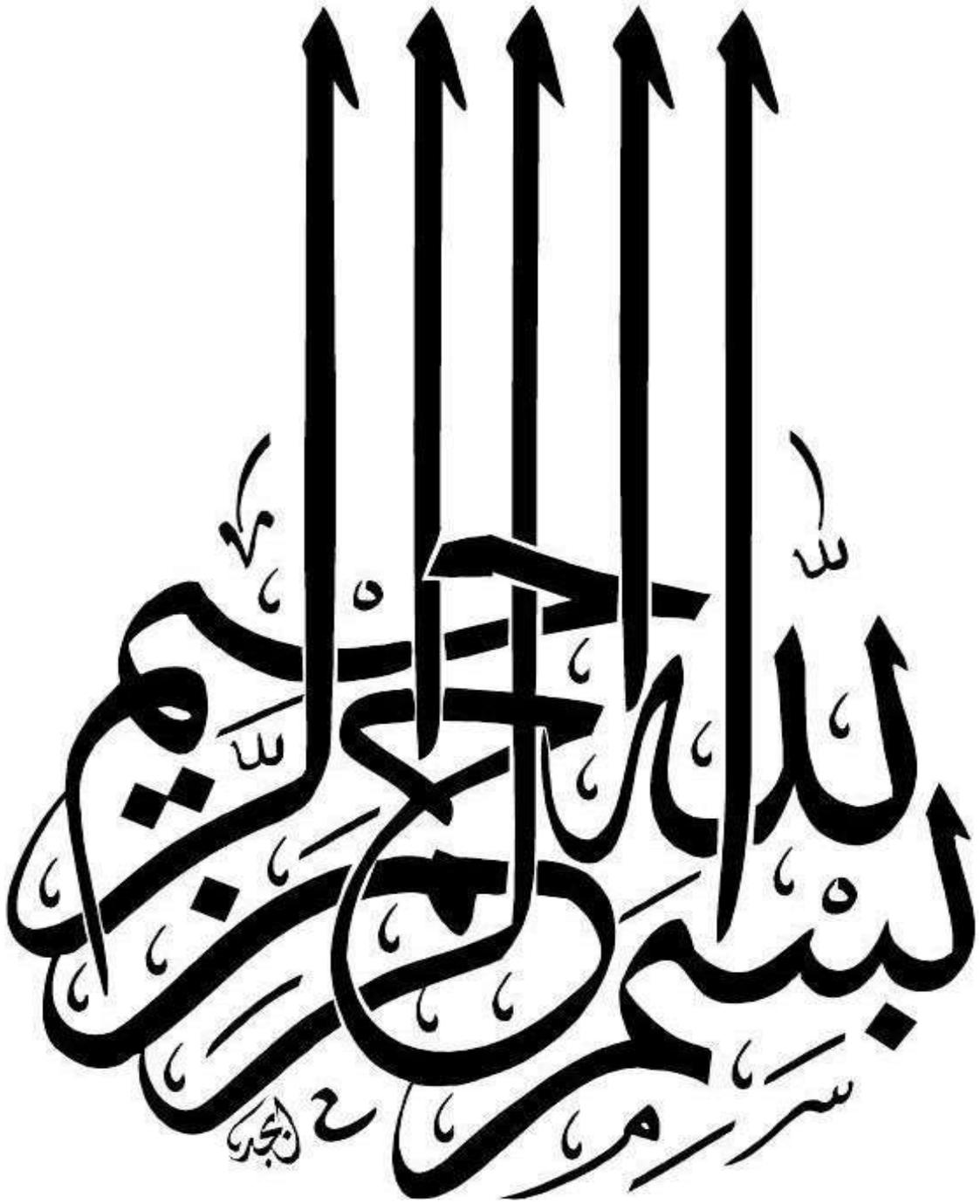
Le : [Click here to enter a date.](#)

## Etude des phénomènes de transfert thermique dans les conduits passif et actif d'un capteur solaire plan à air

---

### Jury :

|     |                  |       |                      |                   |
|-----|------------------|-------|----------------------|-------------------|
| Pr. | Atmani Rachid    | Grade | Université de Biskra | <b>Président</b>  |
| Pr. | Moummi Nouredine | Grade | Université de Biskra | <b>Rapporteur</b> |
| Dr. | Sedira Lakhdar   |       | Université de Biskra | <b>Examineur</b>  |



*Au nom d'Allah, le Miséricordieux, le Compatissant*  
*In the name of Allah, the Merciful, the Compassionate*

## *Remerciements*

*Je remercie en premier lieu notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à :  
Dr N. MOUMMI qui a dirigé ce travail, pour son aide continue, sa disponibilité et ses précieux conseils.*

*Que Monsieur le Président de jury et ainsi que ses membres d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.*

*En fin, Je remercie également tous mes très chers amis de Biskra, qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.*

*Nour Elhouda Soltane*

## *Dédicaces*

Avant toute chose, Je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné santé, courage et patience tout au long de mes études C'est avec un grand honneur que je dédie ce modeste travail aux deux personnes qui se sont sacrifiées pour que je grandisse avec un savoir-faire et qui m'ont appris à ne jamais baissé les bras ....

À ma mère Saida, la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie, qui m'a apporté son appui durant toutes mes années d'étude, pour son sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité.

À mon père Mohamed pour son soutien moral pour tout ce qu'il a fait durant mes années d'études que j'honore ce succès.

Je dédie ce travail également à mes chers frères : Yacine, Amir, Mostafa

à mes chères sœurs : Ahlem , Maryam

à toute ma famille et à tous mes proches chacun avec son nom

A mes chers amies : Houda , Khadidja ...

A tous ceux qui me sont chers de la spécialité génie mécanique-énergétique (2019 /2020)

A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à accomplir ce modeste mémoire.

Que dieu les protège tous

*Nour Elhouda Soltane*



## Table des matières

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 1. Remerciements .....      | I   |
| 2. Dédicaces .....          | II  |
| 3. Table des matières ..... | III |
| 4. Liste des figures .....  | IV  |
| 5. Liste des tableaux ..... | XIV |
| 6. Nomenclature .....       | XIV |

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 2 |
|----------------------------|---|

## CHAPITRE N°I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| I.1. Introduction.....          | 5  |
| I.2. Etude bibliographique..... | 5  |
| I.3. Conclusion .....           | 17 |

## CHAPITRE N°II : système de conversion de l'énergie solaire thermique

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction .....                                  | 19 |
| II.2. Principe .....                                      | 19 |
| II.3. Technologie .....                                   | 19 |
| II.3.1. Les capteurs solaires thermiques plans .....      | 19 |
| a- Les capteurs plans vitrés.....                         | 19 |
| b- Les capteurs non-vitrés.....                           | 20 |
| II.3.2. Les capteurs à tubes sous vides.....              | 20 |
| II.3.2..Les capteurs solaires cylindro-paraboliques ..... | 21 |
| II.3.4. Les capteurs solaires paraboliques.....           | 22 |
| II.4. Conclusion.....                                     | 23 |

## CHAPITRE N°III: Technologie d'un capteur solaire plan et paramètres de fonctionnement.

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction .....   | 25 |
| III.2 Capteur plan à air (capteur aérothermique) .....                                   | 25 |
| III.3 Principaux composants et différentes caractéristiques d'un capteur plan à air..... | 25 |

|   |    |
|---|----|
| III.3.1 Les couvertures .....   | 25 |
| - Le verre .....  | 26 |
| - Polycarbonates .....  | 26 |
| III.3.2 Absorbeur .....   | 27 |
| III.3.3 Isolant .....   | 28 |
| III.3.4 Fluide caloporteur .....                                      | 29 |
| III.4. Les paramètres influant l'efficacité d'un capteur solaire..... | 29 |
| III.4.1. Les paramètres externes... .....                             | 29 |
| III.4.2. Les paramètres internes .....                                | 29 |
| III.5.Conclusion.....   | 30 |

## **CHAPITRE N° IV: modélisation thermique sur le capteur solaire plan**

|  |    |
|--|----|
| IV .1.Introduction .....   | 32 |
| IV.2. Echanges thermiques dans un capteur solaire plan à air ..... | 32 |
| IV.2.1. 1 <sup>er</sup> cas: capteur plan simple vitrage .....     | 32 |
| IV.2.1.1. Schéma analogique global des échanges thermiques .....   | 32 |
| IV.2.1.2. Bilan des échanges de chaleur .....                      | 32 |
| • Pour la couverture transparente (vitre d'indice $v$ ) .....      | 32 |
| • Pour l'absorbeur (indice $ab$ ) .....                            | 32 |
| • Pour le fluide caloporteur (air d'indice $f$ ).....              | 32 |
| • Pour l'isolant (d'indice $pal$ ).....                            | 33 |
| IV.2.1.3 L'analogie électrique .....                               | 35 |
| IV.2.2. 2 <sup>e</sup> cas: capteur plan double vitrage.....       | 36 |
| IV.3. Calculs des pertes thermique (simple et double vitrage)..... | 36 |
| IV.4. Conclusion .....   | 38 |

---

**CHAPITRE N° V: Résultats obtenus**

|  |    |
|--|----|
| V.1.Introduction .....   | 40 |
| V.2. Variation des coefficients des changes thermique .....  | 40 |
| V.2.1.cas simple vitrage .....   | 40 |
| • V.2.1.1.Influence de la température ambiante .....   | 40 |
| • V.2.1.2.Influence de la vitesse du vent .....  | 43 |
| V.2.2.cas double vitrage .....   | 47 |
| • V.2.2.1.Influence de la température ambiante .....   | 47 |
| • V.2.2.2.Influence de la vitesse du vent .....  | 47 |
| V.3. Comparaison de certains coefficients dans le cas d'un capteur solaire à double et simple vitrage..... | 51 |
| • V.3.1.Influence de la température ambiante .....   | 51 |
| • V.3.2.Influence de la vitesse du vent .....  | 53 |
| V.4. Conclusion.....   | 55 |
| Conclusion générale .....  | 57 |
| Référence bibliographique .....  | 59 |
| Résumé .....   | 62 |

## Liste des figures:

|                       | Figure      | Dénomination   | Page | Référence |
|-----------------------|-------------|--|------|-----------|
| Etude bibliographique | <b>I.1</b>  | Variation du rendement instantané en fonction du rayonnement global                            | 05   | [1]       |
|                       | <b>I.2</b>  | Variation du rendement instantané avec la température ambiante                                 | 05   | [1]       |
|                       | <b>I.3</b>  | Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur | 06   | [1]       |
|                       | <b>I.4</b>  | Capteur plan à air muni de rugosités cylindriques  | 07   | [2]       |
|                       | <b>I.5</b>  | Les différents arrangements des chicanes cylindriques  | 07   | [2]       |
|                       | <b>I.6</b>  | Schéma du modèle expérimental  | 08   | [3]       |
|                       | <b>I.7</b>  | Evolution de la température de l'absorbeur en fonction du débit .                              | 08   | [3]       |
|                       | <b>I.8</b>  | Evolution de la température de l'air à la sortie du capteur en fonction du débit               | 09   | [3]       |
|                       | <b>I.9</b>  | Evolution de l'énergie utile récupérée par le capteur en fonction du débit                     | 09   | [3]       |
|                       | <b>I.10</b> | Evolution du rendement du capteur en fonction du débit   | 10   | [3]       |
|                       | <b>I.11</b> | Variation du rendement en fonction du paramètre réduit $(T_f - T_a)/IG$                        | 10   | [3]       |
|                       | <b>I.12</b> | Schéma des six modèles de CS   | 11   | [4]       |
|                       | <b>I.13</b> | Comparaison des rendements thermiques des modèles de capteurs étudiés                          | 12   | [4]       |

|  |             |  |    |        |
|--|-------------|--|----|--------|
|  | <b>I.14</b> | Comparaison des températures de moyennes de sorties de l'air des modèles de capteurs étudiés | 12 | [4]    |
|  | <b>I.15</b> | Variation de l'éclairement incident  | 13 | [5]    |
|  | <b>I.16</b> | Variations des T° d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et de sa T°moyenne théorique   | 13 | [5]    |
|  | <b>I.17</b> | Variation temporelle du rendement instantané   | 14 | [5]    |
|  | <b>I.18</b> | Evolution de l'éclairement solaire en fonction du temps                                      | 14 | [5]    |
|  | <b>I.19</b> | Variation des températures de sortie du fluide caloporteur avec le temps                     | 15 | [5]    |
|  | <b>I.20</b> | Rendement instantanés  | 15 | [5]    |
|  | <b>I.21</b> | Représentation des trois types de capteurs solaires à air expérimentés                       | 16 | [6]    |
|  | <b>I.22</b> | Evolution de la température de sortie en fonction du temps pour divers types de CS           | 17 | [6]    |
| système de conversion de l'énergie solaire thermique | <b>II.1</b> | Le capteur plan vitré  | 19 | [8][9] |
|  | <b>II.2</b> | capteur solaire non vitré  | 20 | [8]    |
|  | <b>II.3</b> | Capteur sous vide  | 21 | [11]   |

|   |              |   |    |      |
|---|--------------|---|----|------|
|   | <b>II.4</b>  | Le capteur solaire cylindro –parabolique  | 22 | [13] |
|   | <b>II.5</b>  | Le capteur solaire parabolique  | 22 | [16] |
| Technologie et paramètres de fonctionnement d'un CSP    | <b>III.1</b> | Schéma d'un capteur plan à air  | 25 | [18] |
|   | <b>III.2</b> | Schéma représentant les différents facteurs (Transmission, Absorption et Réflexion) dans le verre | 26 | [17] |
| Modélisation thermique des échanges thermiques d'un CSP | <b>IV.1</b>  | Schéma des échanges thermiques dans un CSP- une vitre   | 32 | [21] |
|   | <b>IV.2</b>  | analogie électrique.  | 35 | [22] |
|   | <b>IV.3</b>  | analogie électrique.  | 36 | /    |
|   | <b>IV.4</b>  | analogie électrique (simple vitrage)  | 37 | /    |
|   | <b>IV.5</b>  | analogie électrique (double vitrage)  | 37 | /    |
|   | <b>V.1</b>   | Variation du coefficient d'échange radiatif vitre-absorbeur                                       | 40 | /    |
|   | <b>V.2</b>   | Variation du coefficient d'échange convectif du vent  | 41 | /    |
|   | <b>V.3</b>   | Variation du coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre                        | 41 | /    |

|                   |   |   |    |   |
|-------------------|---|---|----|---|
|                   | <b>V.4</b>  | Variation du coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voute céleste                                  | 42 | / |
| Résultats obtenus | <b>V.5</b>  | Variation des pertes avant en fonction température ambiante.  | 42 | / |
|                   | <b>V.6</b>  | Variation du Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant. | 43 | / |
|                   | <b>V.7</b>  | Variation du coefficient d'échange radiatif vitre -l'absorbeur.   | 43 | / |
|                   | <b>V.8</b>  | Variation du Coefficient d'échange convectif du vent.   | 44 | / |
|                   | <b>V.9</b>  | Variation du coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre                                      | 45 | / |
|                   | <b>V.10</b>   | Variation du coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voute céleste                                  | 45 | / |
|                   | <b>V.11</b>   | Variation des pertes avant en fonction température ambiante   | 46 | / |
|                   | <b>V.12</b>   | Variation du Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant  | 46 | / |
|                   | <b>V.13</b>   | Variation du coefficient d'échange par convection entre la vitre 1 et l'ambiance                                | 47 | / |
|                   | <b>V.14</b>   | Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre la vitre 2 et la vitre 1                               | 47 | / |
|                   | <b>V.15</b>   | Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre le ciel et sa face supérieur (vitre 1)                 | 48 | / |
| <b>V.16</b>       | Variation des pertes avant en fonction température ambiante | 48  | /  |   |

|             |   |    |   |
|-------------|---|----|---|
| <b>V.17</b> | Variation du coefficient d'échange par convection entre la vitre 1 et l'ambiance                | 49 | / |
| <b>V.18</b> | Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre la vitre 2 et la vitre 1               | 50 | / |
| <b>V.19</b> | Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre le ciel et sa face supérieur (vitre 1) | 50 | / |
| <b>V.20</b> | Variation des pertes avant en fonction température ambiante                                     | 51 | / |
| <b>V.21</b> | Variation des pertes avant en fonction température ambiante                                     | 52 | / |
| <b>V.22</b> | Variation du coefficient d'échange convectif du vent  | 52 | / |
| <b>V.23</b> | Variation du coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste                  | 53 | / |
| <b>V.24</b> | Variation des pertes avant en fonction température ambiante                                     | 54 | / |
| <b>V.25</b> | Variation d'échange convectif du vent   | 54 | / |
| <b>V.26</b> | Variation d'échange radiatif entre la vitre et la voute céleste                                 | 55 | / |

## Liste des tableaux

| N° du tableau         | Désignation  | N° de la page |
|-----------------------|--|---------------|
| <b>Tableau .II.1</b>  | Caractéristiques du capteur solaire cylindro-parabolique .   | <b>21</b>     |
| <b>Tableau .II.2</b>  | Caractéristiques du capteur solaire parabolique .  | <b>22</b>     |
| <b>Tableau .III.1</b> | Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible de l'infrarouge .             | <b>27</b>     |
| <b>Tableau .III.2</b> | Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface .                           | <b>27</b>     |
| <b>Tableau .III.3</b> | Conductivité $\lambda$ thermique des différents absorbeurs .   | <b>28</b>     |
| <b>Tableau .III.4</b> | Conductivité thermique , volume massique, Température maximale d'utilisation des différents isolants . | <b>28</b>     |

**Nomenclature:**

| Grandeur       | Désignation   | Unité                 |
|----------------|---|-----------------------|
| $I_g$          | L'irradiation tombante sur la surface totale de l'absorbeur                                       | W/m <sup>2</sup>      |
| $h_{v,nat}$    | coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre.                                    | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $T_{ab}$       | température de l'absorbeur  | K                     |
| L              | longueur de l'absorbeur   | m                     |
| $T_{amb}$      | température ambiante  | K                     |
| $h_{r,ab-v}$   | Coefficient d'échange radiatif entre la vitre et l'absorbeur                                      | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $T_v$          | température de vitre  | K                     |
| $U_{av-1}$     | Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre   | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $h_{v,v}$      | Coefficient d'échange convectif du vent   | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $V_v$          | La vitesse de vent.   | m/s                   |
| $h_{rc}$       | Le coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste                              | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $T_c$          | la température de ciel  | K                     |
| $h_{v,ab-f}$   | coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur                        | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $T_f$          | température de fluide   | K                     |
| $N_u$          | nombre de Nusselt   | /                     |
| $D_H$          | diamètre hydraulique  | m                     |
| l              | longueur de conduite  | m                     |
| e              | largeur de conduite   | m                     |
| $Re$           | le nombre de Reynolds   | /                     |
| $v_f$          | La vitesse de l'air   | m/s                   |
| $\nu$          | viscosité cinématique de l'air  | m <sup>2</sup> /s     |
| m              | débit massique  | Kg/s                  |
| $A_f$          | La section de passage de l'air.   | m <sup>2</sup>        |
| $h_{r,ab-pal}$ | Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $T_{pal}$      | température de plaque arrière   | K                     |
| $h_{v,pal-f}$  | coefficient d'échange convectif entre l'isolant et le fluide caloporteur                          | W/(m <sup>2</sup> .K) |
| $U_{ar}$       | Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur  | W/(m <sup>2</sup> .K) |

## Nomenclature

|          |                                  |             |
|----------|----------------------------------|-------------|
| $e_{is}$ | épaisseur de l'isolant           | m           |
| $R_{ci}$ | la résistance vers l'intérieur   | $(m^2.K)/W$ |
| $h_{ci}$ | convection vers l'intérieur      | $W/(m^2.K)$ |
| $R_v$    | la résistance de vitre           | $(m^2.K)/W$ |
| $q$      | Les pertes par unité de surface  | $W/(m^2.K)$ |
| $T_i$    | La température moyenne           | $K$         |
| $T_e$    | La température extérieur         | $K$         |
| $K_v$    | la conductivité thermique        | w/m.k       |
| $R_{ce}$ | la résistance vers l'extérieur   | $(m^2.K)/W$ |
| $h_{ce}$ | convection vers l'extérieur      | $W/(m^2.K)$ |
| $R_{ev}$ | la résistance entre deux vitres  | $(m^2.K)/W$ |
| $R_a$    | résistance                       | $(m^2.K)/W$ |
| $R$      | la résistance équivalent         | $(m^2.K)/W$ |
| $K_a$    | conduction entre les deux vitres | $w/(m^2.K)$ |
| $e_v$    | épaisseur de la vitre            | cm          |

### Lettres grecques

$\alpha_v$ : Coefficient d'absorptivité de la vitre

$\beta$ : Angle d'inclinaison (°)

$\sigma$  : Constant de Stephan-Boltzmann  $W/(m^2.k^4)$

$\varepsilon_v$ : Emissivité de la vitre.

$\varepsilon_{ab}$ : Emissivité de l'absorbeur.

$\tau_v$ : Transmissivité de vitre.

$\alpha_{ab}$ : Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur.

$\lambda_f$ : conductivité thermique de l'air (W/m.k)

$\rho_f$  : la masse volumique de l'air.

$\varepsilon_{pal}$ : Emissivité de la plaque métallique.

# Introduction Générale

### **Introduction:**

L'énergie sous ses diverses formes a joué un rôle de plus en plus important dans le progrès de l'industrie et d'économie. De par ses avantages économiques et environnementaux, l'énergie solaire transformée en chaleur dans l'industrie a trouvé de nombreuses applications dans le domaine de chauffage, séchage, production de froid, ... etc.

L'énergie solaire est aujourd'hui une des sources les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Cette énergie a l'avantage d'être propre et renouvelable avec 169 440 TWh par an d'ensoleillement, et l'Algérie est classée comme un des pays les plus abondants en énergie solaire. Son développement et son utilisation pourraient alléger l'utilisation des sources classiques qui s'avèrent être polluantes et nocives pour la planète.

L'un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur solaire, le capteur solaire joue un rôle de convertisseur du rayonnement solaire incident en chaleur. En général est constitué d'un couvert transparent, absorbeur, d'une ou plusieurs vitres et isolant sur la partie non réceptrice. L'évacuation de la chaleur reçue par l'absorbeur se fait par utilisation de divers fluides caloporteurs. Il ya plusieurs type des capteurs utilisé : les capteurs à concentration, les capteurs sous vide, les capteurs non vitré, les capteurs vitré.

Les performances de l'installation à laquelle appartient ce convertisseur dépendent essentiellement du rendement de ce dernier. En pratique, ce rendement est fonction de l'énergie utile qu'on cherche toujours à augmenter :

- par augmentation de la chaleur reçue par l'absorbeur en augmentant la part du rayonnement absorbé (revêtement de l'absorbeur d'une teinture noire mate)
- par diminution des pertes par conduction de chaleur vers les zones non réceptrices conduction (nécessité d'une bonne isolation) perte par convection et vers l'avant du capteur (nécessité d'un doublage des vitre) .

Ce travail est consacré à l'étude des phénomènes de transfert thermique dans les conduites passif et actif d'un capteur solaires plan a air.

Dans ce mémoire on présente cinq chapitres dont le premier et l'étude bibliographique des études menées relatifs à ce sujet. Le deuxième chapitre est principe de fonctionnement d'un

capteur solaire et les différents types de capteurs solaires. Le troisième chapitre est une étude générale sur les capteurs solaires plans à air et principaux composants et différentes caractéristiques. Le quatrième chapitre permet de comprendre le bilan thermique des échanges de chaleur qui ont lieu dans le système pour pouvoir calculer les coefficients d'échange de chaleur et de pertes thermiques.

Ensuite le cinquième chapitre expose les résultats obtenus à partir de la simulation menée. L'ensemble est précédé d'une introduction et terminé par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

Etude bibliographique.

## I.1. Introduction:

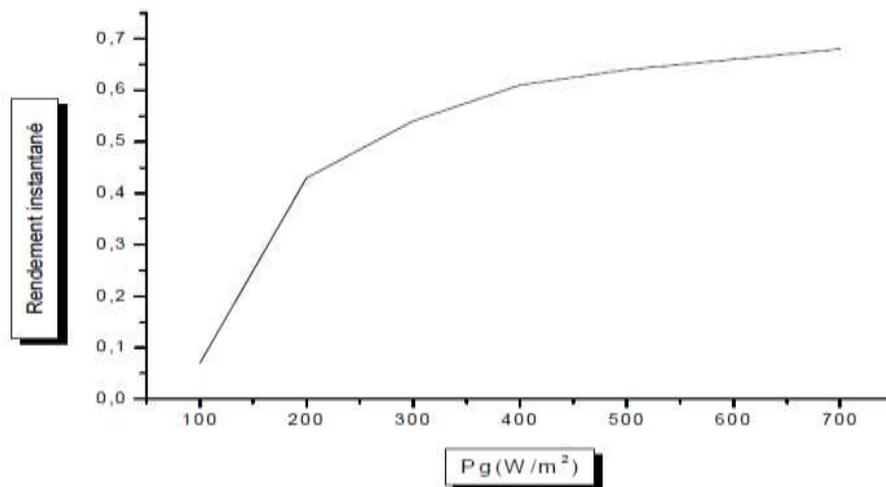
Dans ce chapitre nous présentons quelques travaux réalisés, rencontrés qui traitent les études relatives aux capteurs solaires plans.

## I.2. Etude bibliographique :

Le travail mené par S.SAADI [1] est une étude théorique et numérique des effets des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur solaire plan.

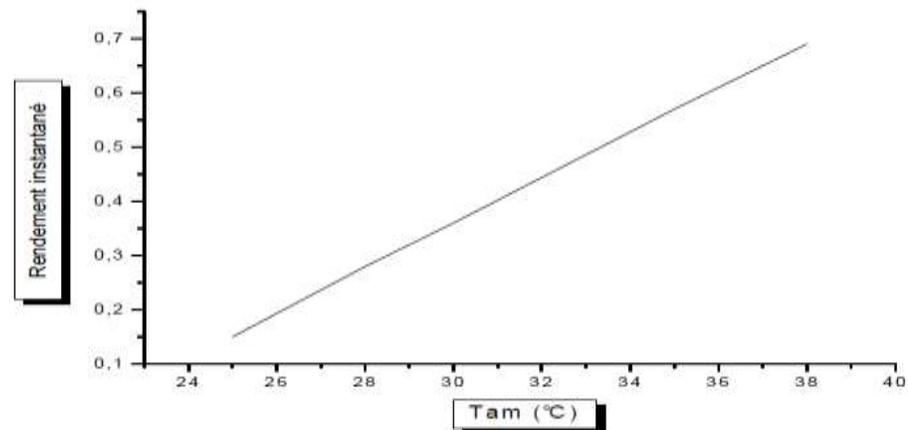
Quelques résultats obtenus sont :

- **Effet du rayonnement global :**



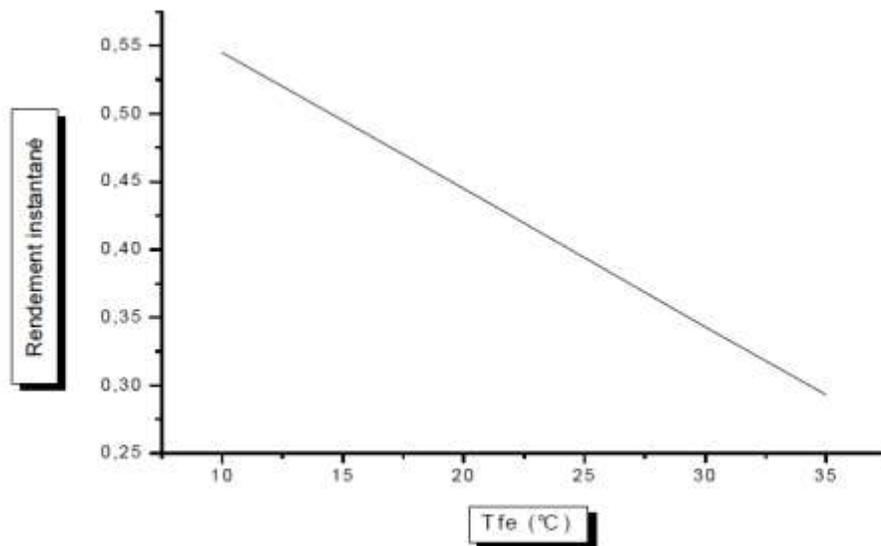
**Figure I.1.** Variation du rendement instantané en fonction du rayonnement global [1].

- **Effet de la température ambiante :**



**Figure I.2.** Variation du rendement instantané avec la température ambiante [1].

- **Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur**



**Figure I.3.** Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur [1].

Les résultats obtenus montrent également l'influence des propriétés optiques et thermo physiques des différents composants du capteur sur son rendement instantané. On notera ainsi que:

- L'emploi d'un absorbeur doté d'une chaleur spécifique, une conductivité thermique et une absorptivité élevées améliore le rendement instantané.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- L'isolant doit posséder une épaisseur et une chaleur spécifique élevée, ainsi qu'une faible conductivité thermique afin d'améliorer le rendement instantané du capteur.
- Le fluide caloporteur doit avoir d'une part une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées et d'autre part, une viscosité dynamique et une masse volumique réduites.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut:

- Maintenir une faible différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente afin de diminuer les pertes thermiques convectifs à l'avant du capteur.
- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

K. Aoues et Al [2] ont mené un travail théorique en vue d'améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant (Figure I.4).

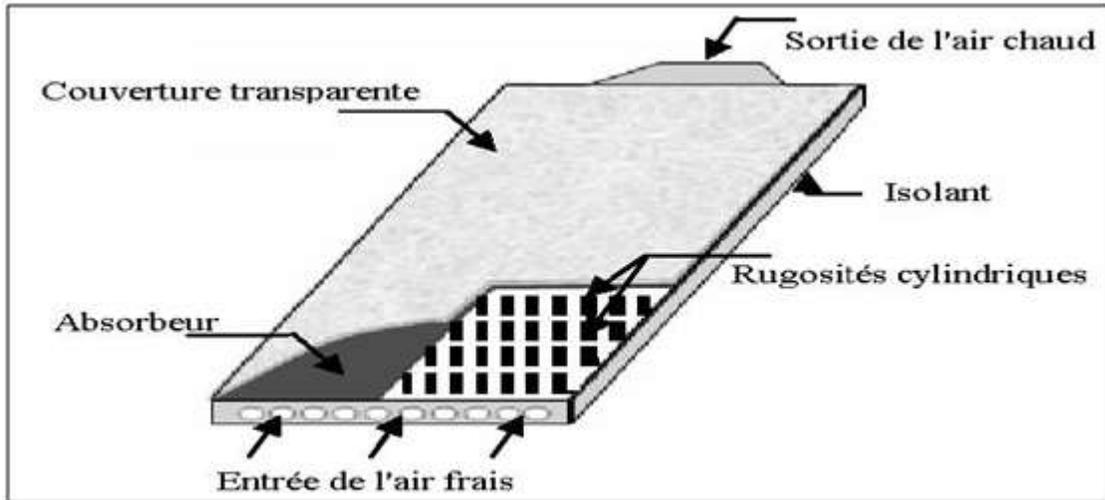


Figure I.4. Capteur plan à air muni de rugosités cylindriques [2].

Les auteurs ont étudié les trois cas suivants (Figure I.5):

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en rangées alignées.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces.

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce, et le plus bas pour le capteur lisse.

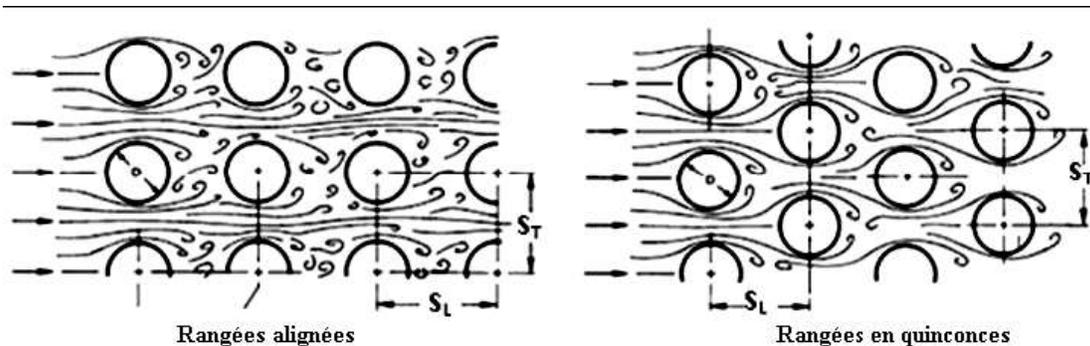
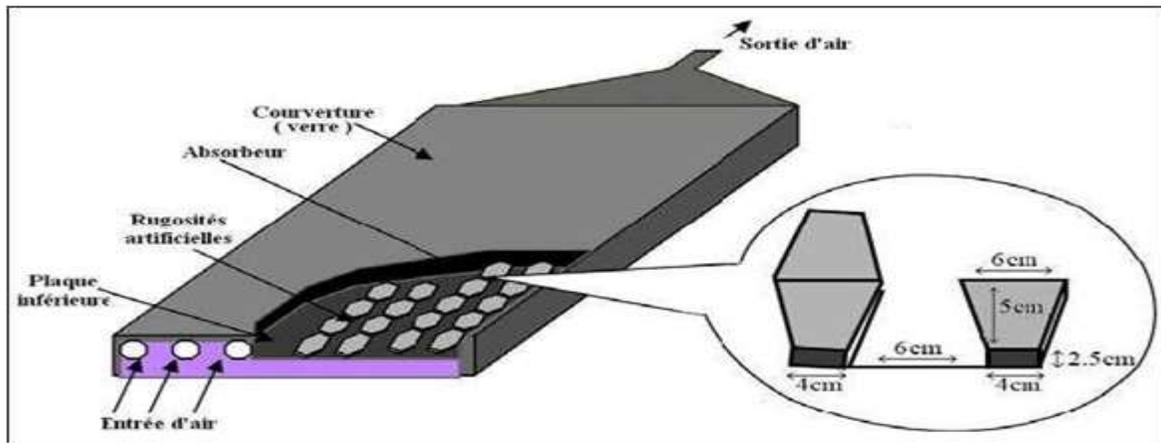


Figure I.5. Les différents arrangements des chicanes cylindriques [2].

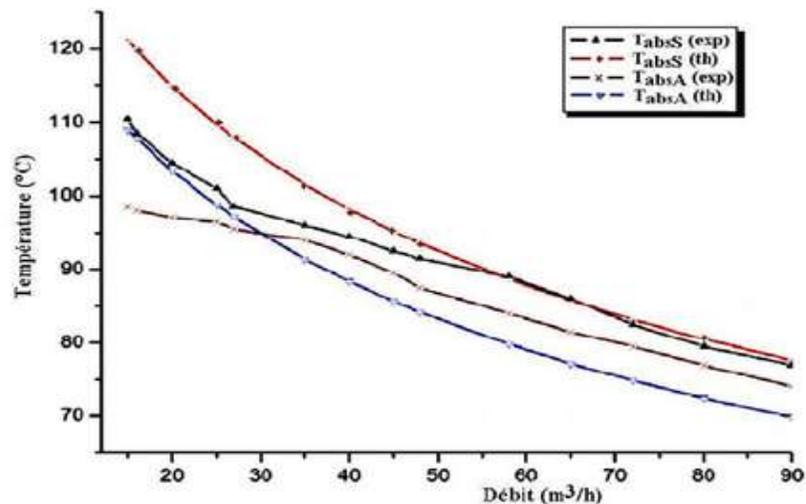
**A. Labeled et al [3]** ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'améliorer les performances du capteur solaire plan à air en introduisant un nouveau modèle de rugosité artificielle.

Le système étudié est un capteur solaire plan à air à simple passe composé d'une seule vitre, d'une plaque absorbante en acier galvanisé peinte en noir mat, d'une plaque arrière en acier galvanisé placé sur l'isolant et d'une isolation arrière. Les rugosités artificielles sont de petits canaux, dont la base est de forme trapézoïdale d'une hauteur de 25 mm, elles sont placées entre les deux plaques en acier galvanisé (**Figure I.6**).



**Figure I.6.** Schéma du modèle expérimental [3].

Les auteurs ont conclu que les chicanes introduites dans la veine d'air utile agissent favorablement sur le transfert thermique, cependant elles engendrent des pertes comparativement à un canal lisse. les résultats obtenus sont :



**Figure I.7.** Evolution de la température de l'absorbeur en fonction du débit [3].

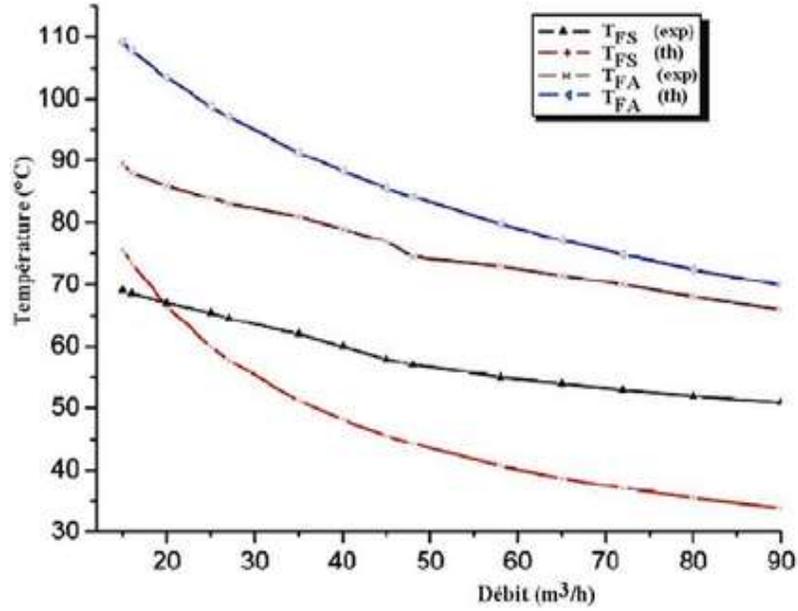


Figure I.8. Evolution de la température de l'air à la sortie du capteur en fonction du débit [3].

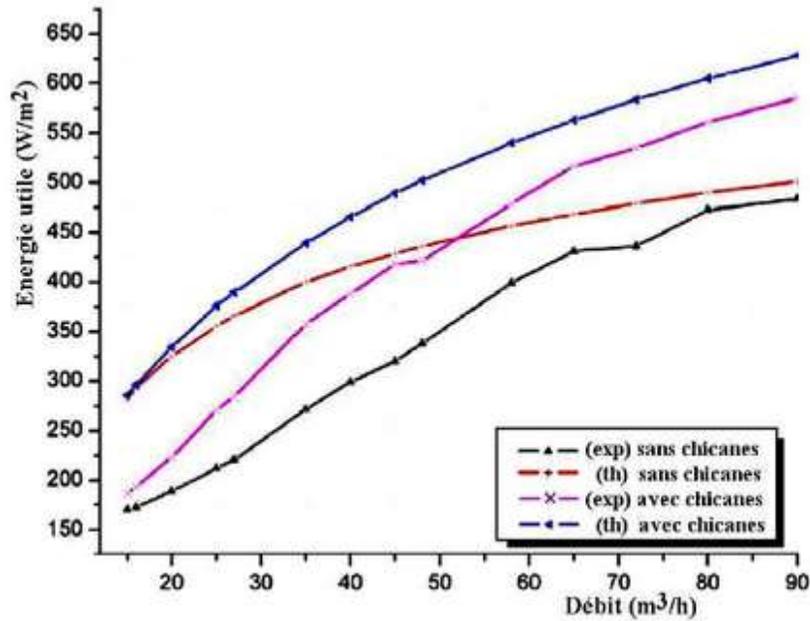


Figure I.9. Evolution de l'énergie utile récupérée par le capteur en fonction du débit [3].

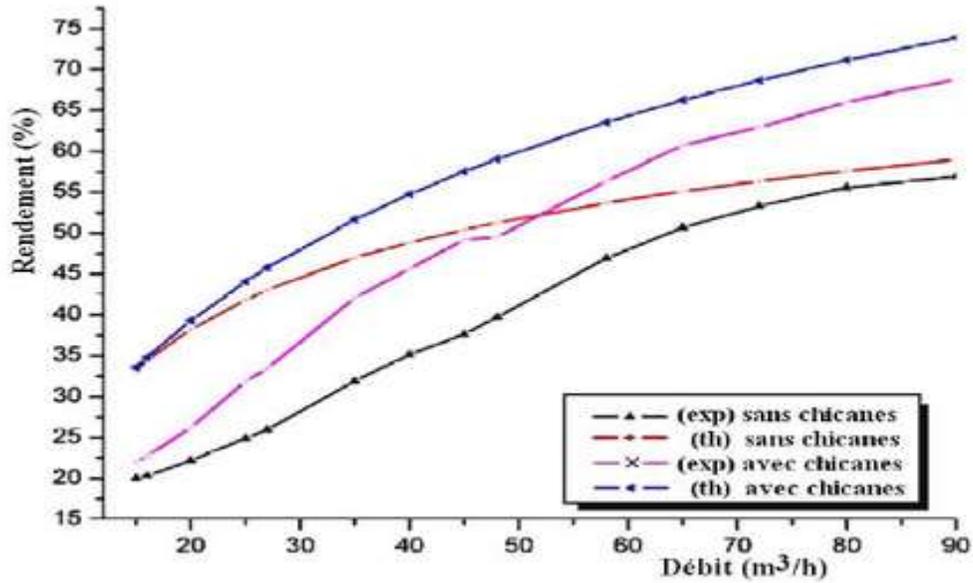


Figure I.10. Evolution du rendement du capteur en fonction du débit [3].

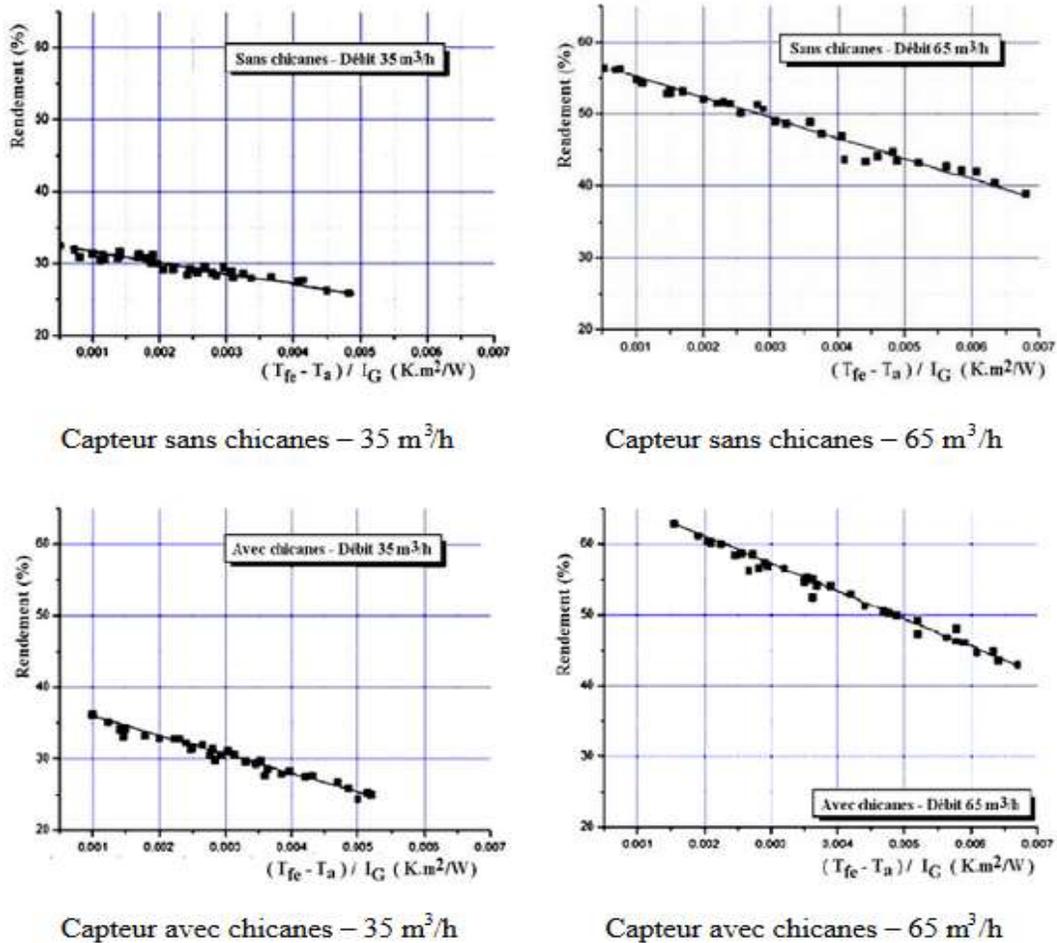


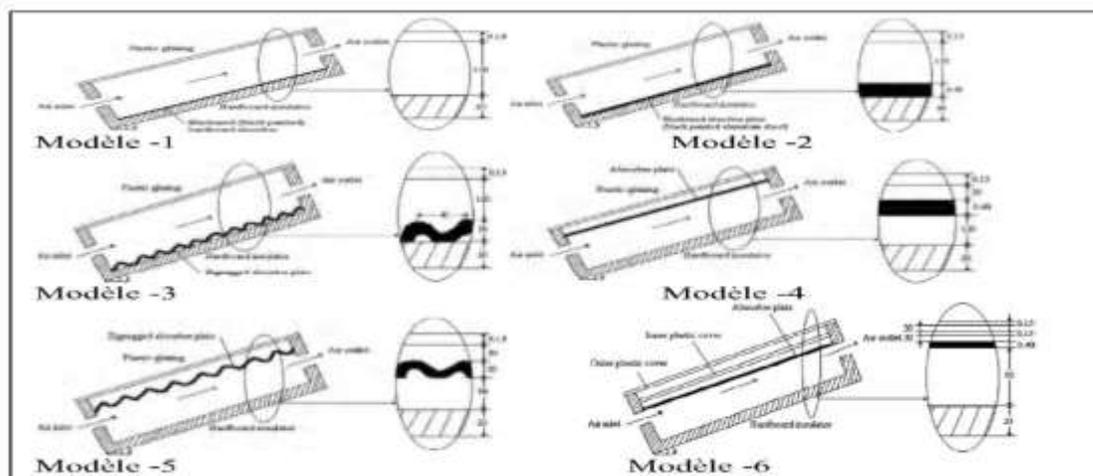
Figure I.11. Variation du rendement en fonction du paramètre réduit  $(T_{fe}-T_a)/I_G$  [3].

Les auteurs ont trouvé que Il ressort de l'étude menée, le rôle très favorable à l'augmentation de l'échange thermique du à la présence de ce type de chicanes placées dans la veine d'air utile.

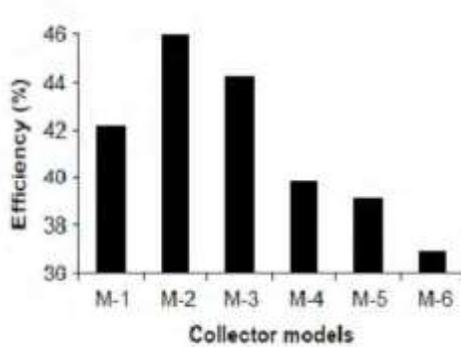
**T. Koyuncu [4]**, a étudié six modèles différents de capteurs solaires à air avec convection naturelle (**Figure .I.12**), pour le séchage des produits agricoles:

- Modèle (1) : simple vitrage en plastique, l'absorbeur est en carton dur à peinture noire sans effet de serre.
- Modèle (2) : simple vitrage en plastique, l'absorbeur est en tôle d'aluminium peinte en noire sans effet de serre.
- Modèle (3) : une seule vitre en plastique, l'absorbeur est en tôle d'aluminium en forme de zigzag, avec peinture noire, sans effet de serre.
- Modèle (4) : simple vitrage en plastique, l'absorbeur est en tôle d'aluminium peinte en noire avec effet de serre.
- Modèle (5) : à simple vitrage en plastique, l'absorbeur en tôle d'aluminium en forme de zigzag à peinture noire avec effet de serre.
- Modèle (6) : double vitre en plastique, l'absorbeur est en tôle d'aluminium peinte en noire avec effet de serre.

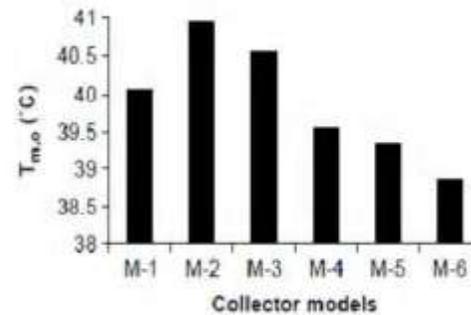
Il a montré que les capteurs à simple vitrage et sans effet de serre sont plus efficaces que ceux à double ou à triple vitrages **Figure. (I.13 et I.14)**. Ces dispositifs de conversion thermique de l'énergie solaire, sont plus appropriés dans les applications du séchage par l'énergie solaires.



**Figure .I.12.** Schéma des six modèles de CS [4].



**Figure I.13.** Comparaison des rendements thermiques des modèles de capteurs étudiés[4].



**Figure I.14.** Comparaison des températures de moyennes de sorties de l'air des modèles de capteurs étudiés [4].

Le travail fait par **A.BENKHELIFA [5]** est une modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau pour voir l'influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur, Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison du capteur solaire plan sur le taux du rayonnement solaire absorbé par ce dispositif et par conséquent sur son rendement instantané aussi. Il apparaît clairement que le rendement instantané du capteur solaire plan est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale.

En revanche, les résultats obtenus montrent qu'au-delà d'une certaine température de fonctionnement du capteur solaire plan, son rendement instantané diminue si la puissance absorbée par ce dispositif augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que l'écart de température entre la température de l'absorbeur et la température ambiante et les pertes thermiques vers le milieu extérieur vont augmenter.

En outre, ce travail nous a montré également que pour avoir un capteur solaire plan plus performant, le fonctionnement à des basses températures est préconisé et une inclinaison adaptée au lieu et selon les périodes estivales et hivernales est recommandée.

Les résultats sont présentés selon deux cas :

1.Premier cas : Capteur solaire plan incliné à  $32^\circ$  et orienté plein Sud :

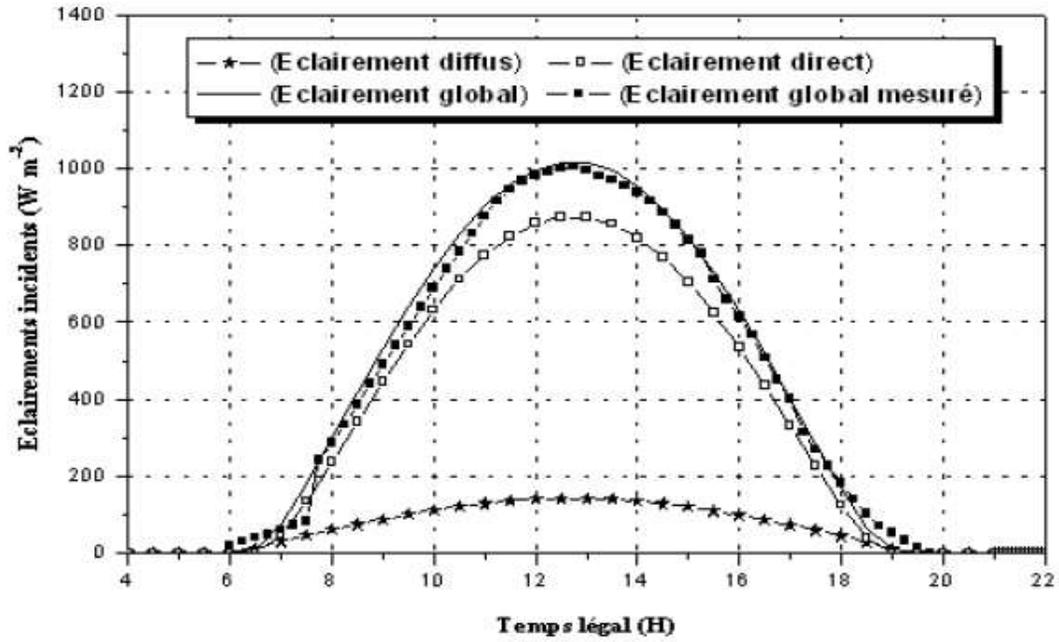


Figure I.15. Variation de l'éclairement incident [5].

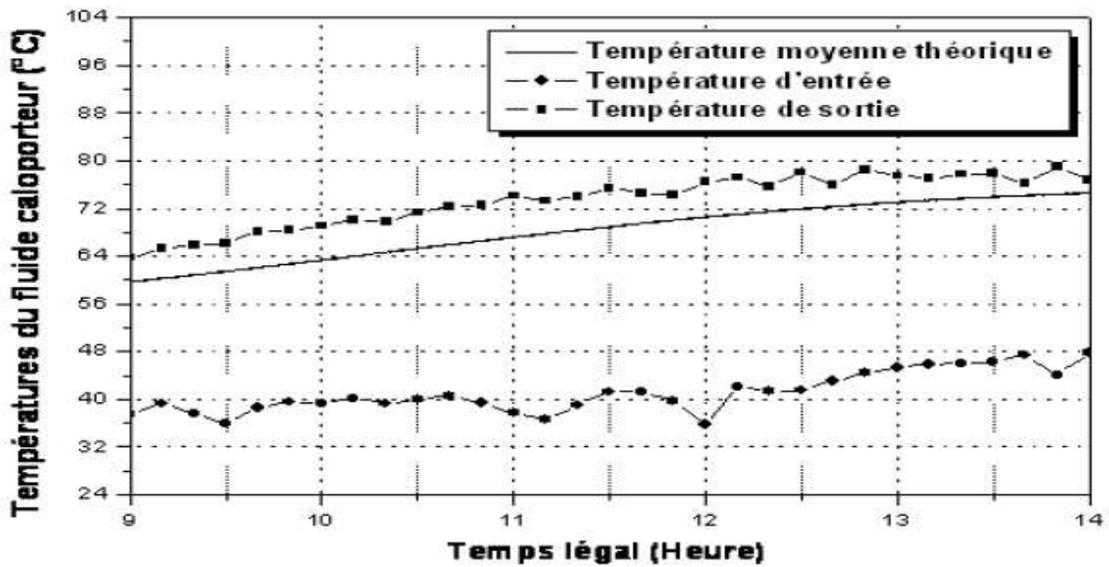
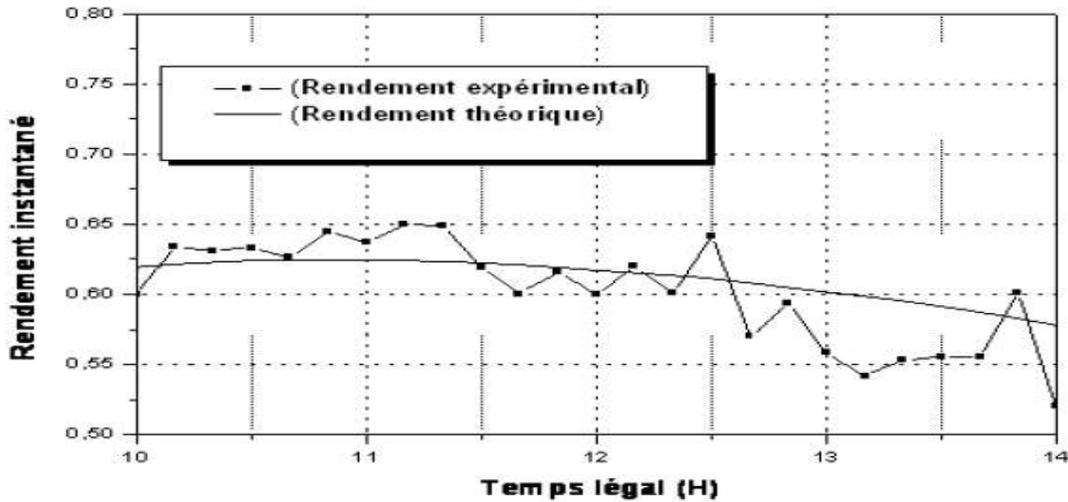


Figure I.16. Variations des  $T^\circ$  d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et de sa  $T^\circ$  moyenne théorique [5].

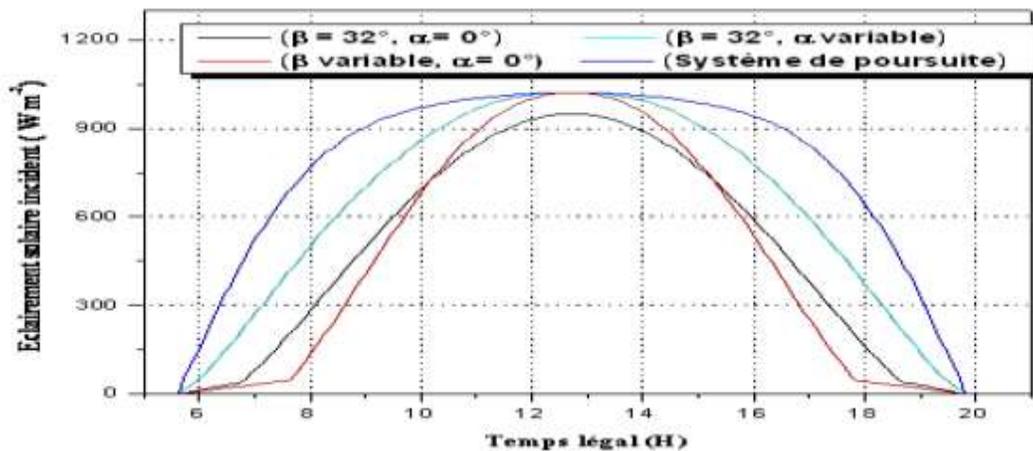


**Figure I.17.** Variation temporelle du rendement instantané [5].

2. Deuxième cas : Capteur solaire plan à inclinaisons et orientations Variables:

Dans cette partie nous avons étudié quatre différents cas :

- Capteur solaire plan incliné à la latitude du lieu ( $32^\circ$  dans notre cas) et orienté plein sud (l'azimut  $\alpha = 0$ ).
- Capteur solaire plan incliné à la latitude du lieu ( $32^\circ$  dans notre cas) et d'orientation variable (l'azimut  $\alpha$  est variable).
- Capteur solaire plan d'inclinaison variable ( $\beta$  variable) et orienté plein sud ( $\alpha = 0$ ).
- Capteur solaire plan d'inclinaison variable et d'orientation variable.



**Figure I.18.** Evolution de l'éclairement solaire en fonction du temps [5].

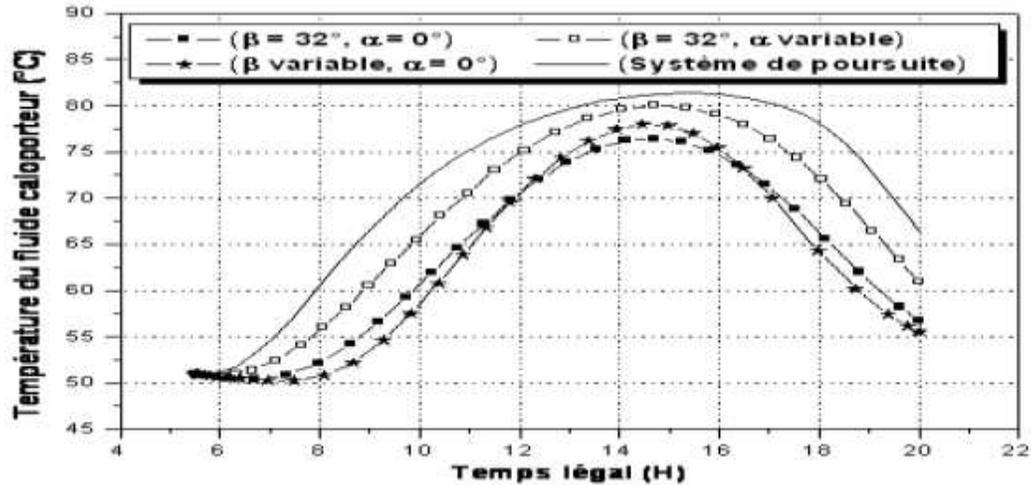


Figure I.19. Variation des températures de sortie du fluide caloporteur avec le temps [5].

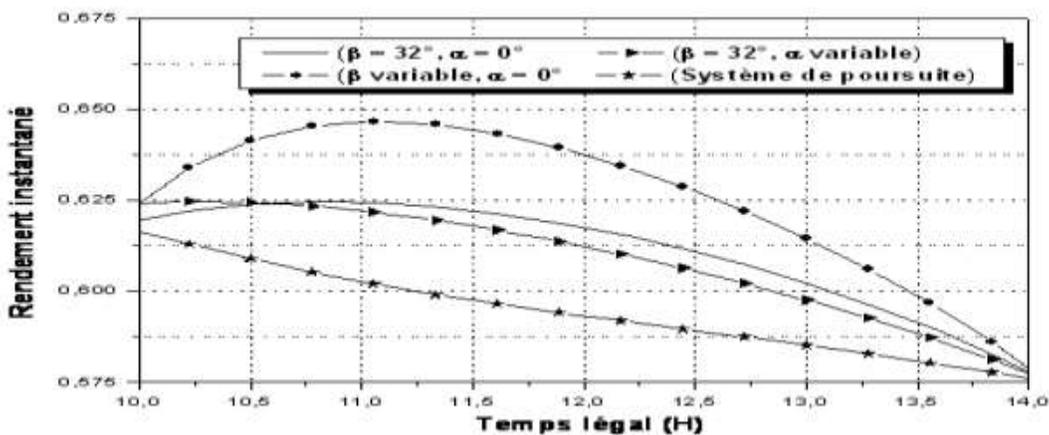
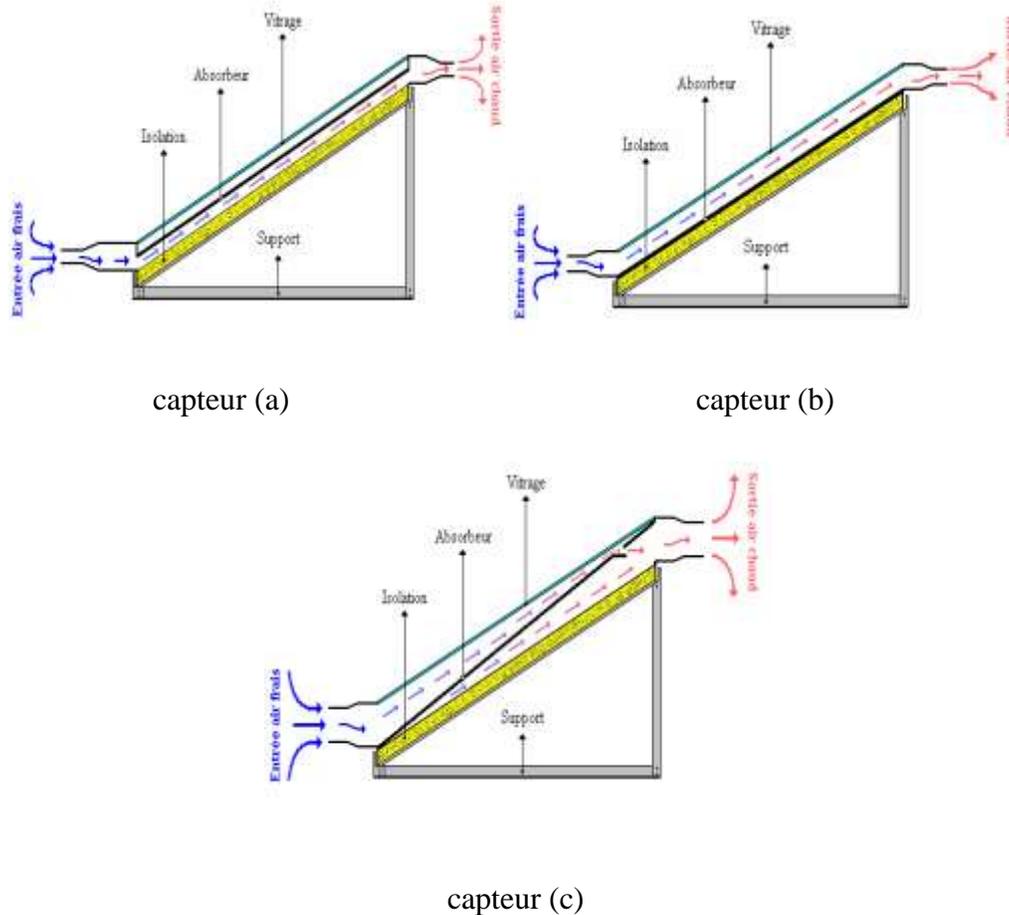


Figure I.20. Rendement instantanés [5].

F. Mokhtari et al [6], ont menés des études expérimentales effectuées sur les capteurs solaires à air destinés au séchage solaire. Les trois configurations de capteurs sont représentées sur la (figure .I.21).

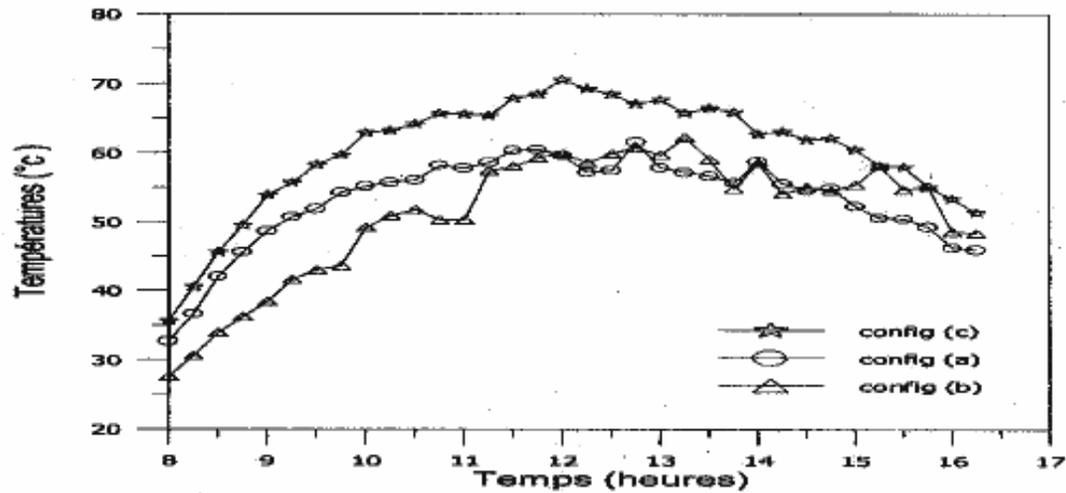
- La configuration (a): passage d'air sous l'absorbeur qui est en tôle peinte en noir,
- La configuration (b): le passage d'air se trouve au-dessus de la plaque absorbante (entre le vitrage et la plaque absorbante),
- La configuration (c): la plaque absorbante est placée sur la diagonale du capteur entre la couverture et l'isolant. L'entrée de l'air se trouve au dessus de l'absorbeur tandis que la sortie est située sous l'absorbeur. Elle est munie d'un orifice pour permettre l'évacuation de l'air chaud.



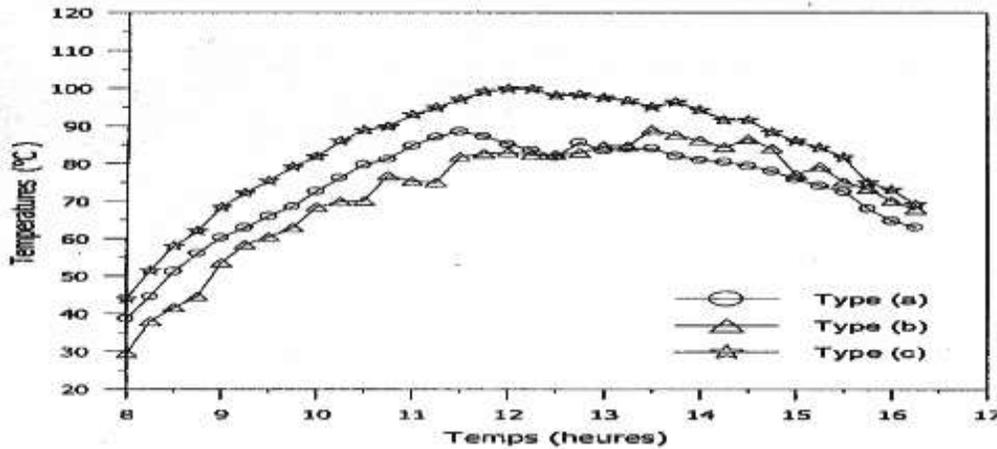
**Figure I.21.** Représentation des trois types de capteurs solaires à air expérimentés [6].

Des mesures sont effectuées sur chaque capteur. On présente ici l'évolution des températures de sortie de l'air chaud en fonction du débit d'air pour deux modes de circulation ; convection naturelle et convection forcée.

Le capteur avec la configuration (c) a une efficacité meilleure; la température de sortie en convection naturelle dépasse les  $98^{\circ}\text{C}$  et en convection forcée la température atteint les  $70^{\circ}\text{C}$ . D'après l'auteur ceci est dû à l'inclinaison de la plaque absorbante et à l'ouverture conçue sur sa partie supérieure. Les deux autres capteurs ont pratiquement la même efficacité.



Profil des températures de sortie (**Convection naturelle** : Journée 25-05-01).



Profil des températures de sortie (**Convection forcée** : Journée 29-05-01).

**Figure I.22.** Evolution de la température de sortie en fonction du temps pour divers types de CS

[6].

### I.3. Conclusion:

Cette étude bibliographique ,dans laquelle on n'a présenté que certains travaux types menés sur différents types de capteurs solaires, nous a permis de voir qu'il existe plusieurs facteurs sur lesquels on peut agir pour améliorer leur efficacité .

## *Chapitre II*

Principe de la conversion de l'énergie solaire thermique.

## II.1. Introduction:

Ce chapitre permet de comprendre le principe de fonctionnement des capteurs solaires et leurs différents types.

## II.2. principe :

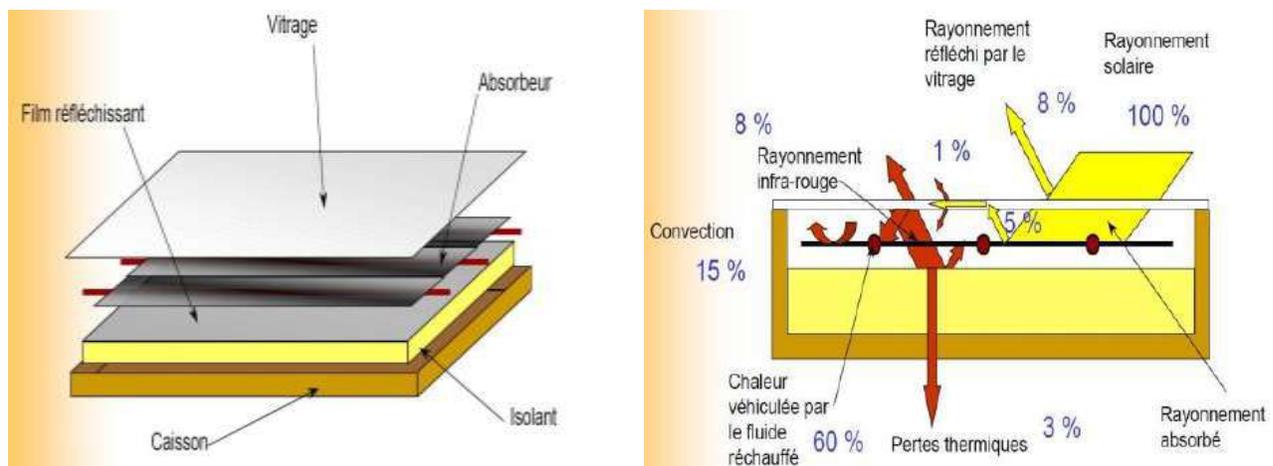
Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...) qui absorbe et véhicule une partie de l'énergie captée par l'absorbeur. L'énergie solaire (rayonnement) est captée par la surface absorbante du capteur solaire.

## II.3. Technologies:

### II.3.1. Les capteurs solaires thermiques plans :

**a- Les capteurs plans vitrés :** Ce type de capteur solaire thermique utilise l'effet de serre pour capter l'énergie thermique du soleil. Il est utilisé pour des niveaux de températures de 35° a 90°C [7, 8, 9]. Le capteur plan vitré est composé :

- d'un caisson
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques.
- d'un faisceau de tubes cylindriques.
- une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre.
- un vitrage fixé sur le caisson.



**Figure. II.1.** Le capteur plan vitré [8][9].

**b- Les capteurs non-vitrés:** Ce capteur est le plus simple, son application est le chauffage de piscine en plein air, il ne permet pas la production d'ECS (Eau chaude sanitaire) sauf dans les pays chauds. Il s'agit d'un seul absorbeur en matière synthétique pour les applications à basse températures en métal revêtu d'une couche sélective, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres, la température de fonctionnement est généralement inférieure à 30°C [8].

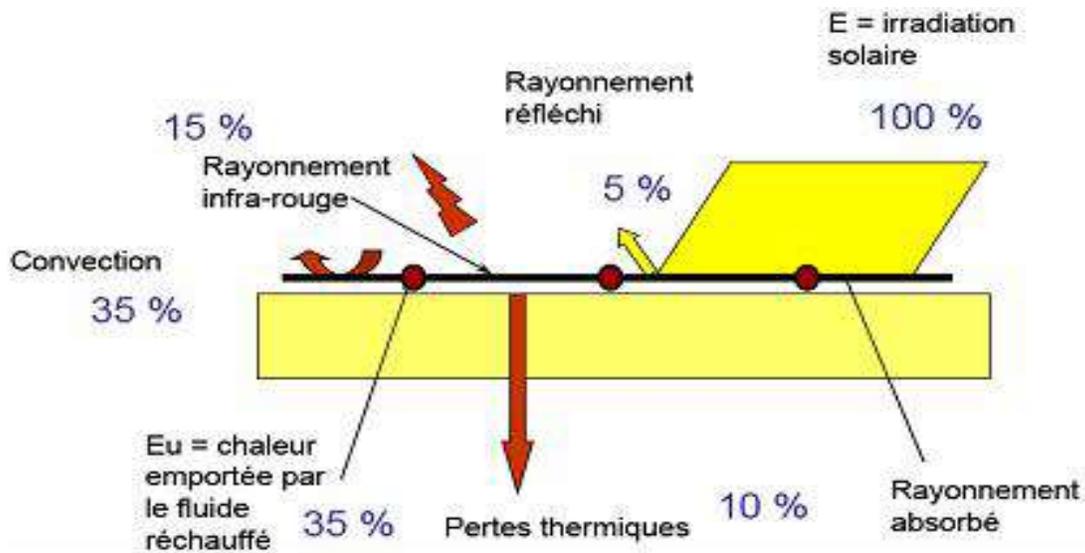
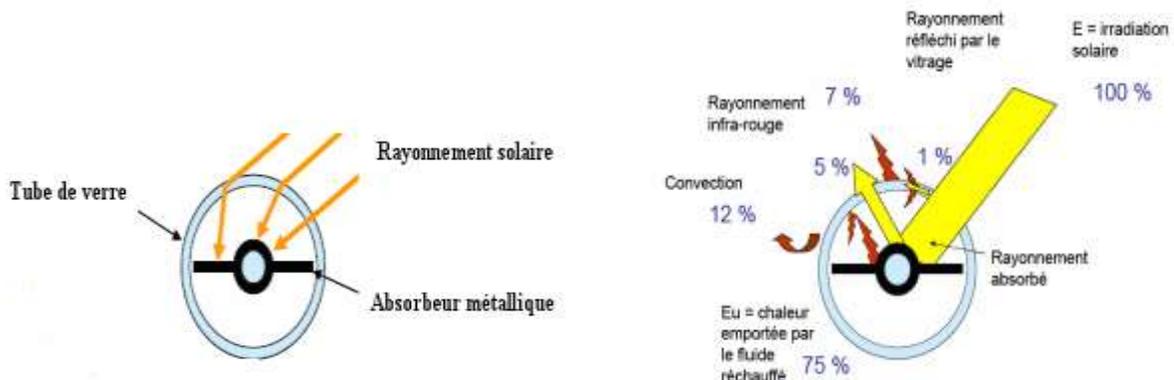


Figure. II.2. capteur solaire non vitré [8].

### II .3.2. Les capteurs à tubes sous vides:

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement [10].



**Figure. II.3.** Capteur sous vide [11] .

- Il y a 4 familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique spécifique:

- a. Le capteur à tube sous vide à circulation directe
- b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc"
- c. Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"
- d. Le capteur à tube sous vide "Schott" .

### II.3.3.Les capteurs solaires cylindro-paraboliques :

Le capteur cylindro-parabolique est constitué d'un miroir cylindro-parabolique linéaire qui collecte et concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur placé le long de sa ligne focal Pour les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques, les facteurs de concentration atteignent 80. La structure portante est munie de joints de dilatation assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales des divers composants. Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur.de cette manière, la radiation est réfléchi au foyer de la parabole et concentre sur un tub récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur. L'ensemble de concentrateur cylindro-parabolique est mobile, il est orienter selon un axe nord sud et suit la course de soleil d'est on ouste [13].

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Puissance:                     | Moyennes et grandes centrales: |
| Température de fonctionnement: | 200°C – 500°C                  |
| Réflecteurs:                   | Parabolique (suivi 1 axe)      |
| Récepteurs:                    | Linéaire mobile                |
| Fluides caloporteurs:          | Eau, sels fondus, huile, air   |

**Tableau II.1.** Caractéristiques du capteur solaire cylindro-parabolique[14].

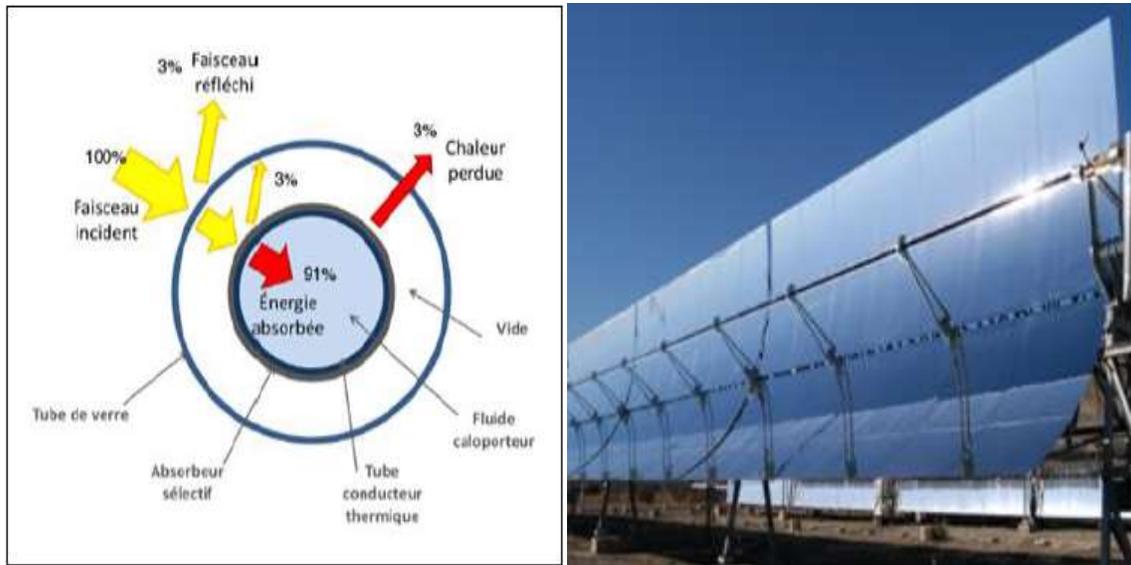


Figure II.4. Le capteur solaire cylindro –parabolique [13].

### II.3.4. Les capteurs solaires paraboliques :

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome et suivent le soleil et permettent de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante[15].

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Puissance:                     | Moyennes et grandes centrales: |
| Température de fonctionnement: | 300°C – 1000°C                 |
| Réflecteurs:                   | Parabole (suivi 2 axes)        |
| Récepteurs:                    | Central et mobile              |
| Fluides caloporteurs:          | air                            |

Tableau II.2. Caractéristiques du capteur solaire parabolique [14].

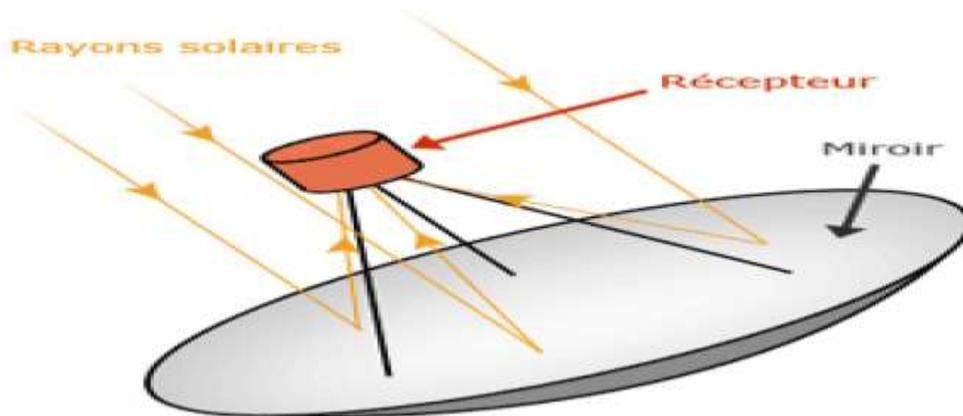


Figure II.5. Le capteur solaire parabolique [16].

**II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons fait une étude approfondie sur l'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire qui est le capteur solaire.

Cette partie est divisée essentiellement en deux, au début on a parlé du principe de fonctionnement d'un capteur solaire, à la fin nous avons cité les différents types de capteurs solaires. Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

# *Chapitre III*

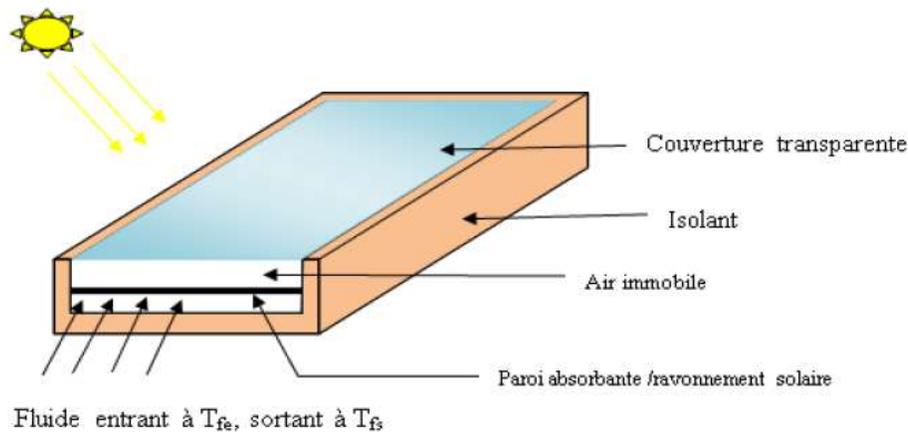
Technologie et paramètres de fonctionnement  
d'un capteur solaire plan.

### III.1. Introduction:

Dans ce chapitre nous étudions la technologie de conception et les différents éléments de conception et d'environnement qui affectent leur fonctionnement. Ces systèmes sont des convertisseurs de l'énergie solaire en chaleurs. Ils sont caractérisés par leur forme géométrique et peuvent être à air ou à eau.

### III.2. Capteur plan à air (capteur aérothermique) [17]:

Les capteurs plans à air sont munis d'un absorbeur et d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur.



**Figure. III.1.** Schéma d'un capteur plan à air [18].

Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur. C'est le principe de « l'effet de serre ». Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

### III.3. Principaux composants et différentes caractéristiques d'un capteur plan à air:

**III.3.1. Les couvertures :** L'utilisation des couvertures transparentes permet de réduire les pertes thermiques par convection et par rayonnement vers l'extérieur, et elle permet aussi de piéger le rayonnement.

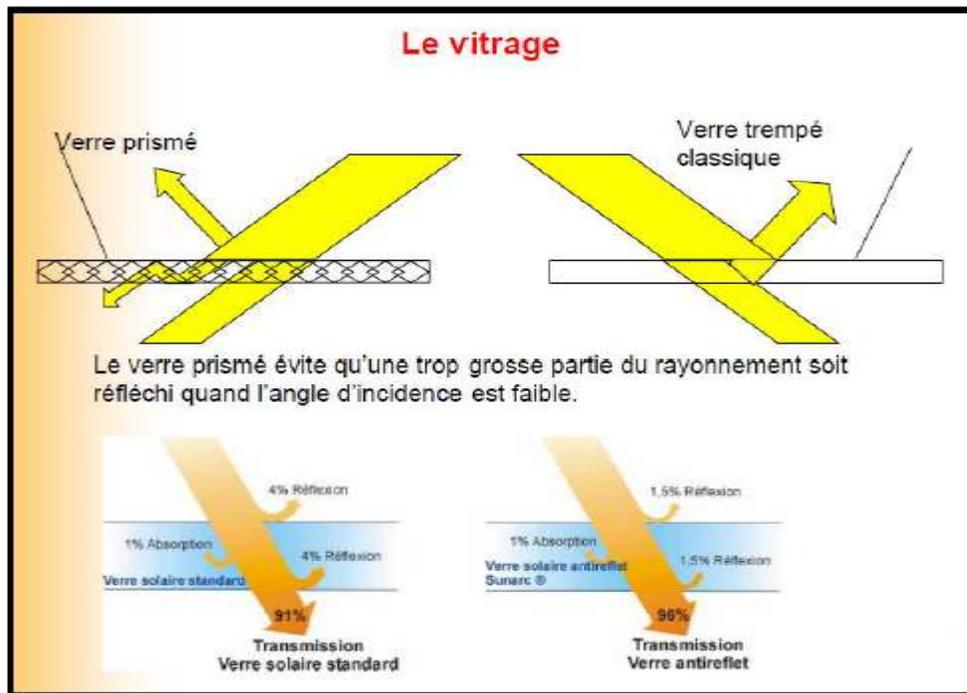
On distingue deux types de couvertures transparentes :

- **Le verre** : Ce type de couverture laisse passer entre 84% et 92 % du rayonnement solaire sous une incidence normale. Pour une lame de verre de 3mm d'épaisseur, la transmission du verre au rayonnement solaire dépend de la contenance de ce matériau en oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Le verre peut subir des transformations afin d'améliorer ses qualités. Le verre trempé a une très bonne résistance aux chocs (chute de grêle). L'ajout de couches d'oxydes métalliques permet d'obtenir des verres sélectifs qui retiennent d'autant mieux les infrarouges (effet de serre).

Il est possible d'obtenir des verres à haute transmission énergétique ( $t = 0,92$ ) en éliminant la plupart des oxydes de fer lui donnant sa couleur verte.

On utilise aussi des verres polis ou prismes qui réfléchissent moins les rayonnements dont les angles d'incidences sont supérieurs à  $45^\circ$ .



**Figure. III.2.** Schéma représentant les différents facteurs (Transmission, Absorption et Réflexion) dans le verre [17].

- **Polycarbonates** : Sont des dérivés de matière plastique à double et à triple lames très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermique par convection vers l'avant, leur coefficient de transmission au rayonnement solaire est de l'ordre de 83 % sous une incidence normale à l'état neuf qui diminue légèrement avec le

temps (79% au bout de cinq ans ). Les polycarbonates présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs mécaniques et une faible densité, qui leurs permettent d'avoir une faible inertie thermique.

| Matériaux                  | Transmissivité à incidence normale                 |  |
|----------------------------|--|--|
|                            | Gamme de longueur d'onde : 0,4 – 2,5 $\mu\text{m}$ | Gamme de longueur d'onde : 2,5 – 4 $\mu\text{m}$ |
| Le verre                   | 0,83 – 0,91  | 0,00 – 0,03                                      |
| Les plastiques en feuilles | 0,76 – 0,92  | 0,02 – 0,06                                      |
| Les plastiques en films    | 0,85 – 0,87  | 0,2 – 0,26                                       |

**Tableau .III.1.** Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible de l'infrarouge [17].

**III.3.2. Absorbeur :** c'est l'élément principal dans le fonctionnement d'un capteur plan, c'est une surface constituée d'un corps noir qui a trois fonctions :

- Absorber le rayonnement solaire,
- Le transformer en chaleur,
- Transmettre cette chaleur au fluide caloporteur,

Le choix d'un absorbeur revient à l'analyse de :

- Facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- Bonne conductivité thermique.
- Faible inertie thermique.

| Couleur          | $\alpha$ | $\rho$ | $\varepsilon$ | $\alpha/\varepsilon$ |
|------------------|----------|--------|---------------|----------------------|
| Peinture blanche | 0,2      | 0,8    | 0,91          | 0,22                 |
| Peinture vert    | 0,5      | 0,5    | 0,9           | 0,56                 |
| Peinture noire   | 0,96     | 0,04   | 0,9           | 1,00                 |

**Tableau .III.2.** Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface [17].

Les matériaux utilisés sont :

- Le cuivre : c'est le meilleur absorbeur, mais le plus coûteux.
- L'aluminium : sa légèreté et sa conductivité sont :

appréciable, il est parmi les métaux qui résiste à la corrosion grâce à la couche d'alumine (ALO) ou (AL2O3), sa surface est recouverte d'une couche mince de peinture noir, afin d'augmenter le pouvoir d'absorption.

- Les matières plastiques : ont l'avantage par rapport aux métaux, d'être plus légères et insensibles à la corrosion.

| Matériaux | Température en °C | Conductivité thermique ( $\lambda$ ) en $W/m.K$ |
|-----------|-------------------|---|
| Aluminium | 100               | 0,49  |
|           | 200               | 0,55  |
| Cuivre    | 20                | 0,934   |
|           | 100               | 0,908   |
|           | 200               | 0,890   |
| Magnésium | 100               | 0,370   |

**Tableau .III.3.** Conductivité  $\lambda$  thermique des différents absorbeurs [17].

**III.3.3. Isolant :** Il permet de diminuer les pertes et ralentit le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- Une faible conductivité thermique.
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de services

| Désignation     | $\lambda(W/m.K)$ | $\rho(Kg/m^3)$ | Température maximale d'utilisation | Observation           |
|-----------------|------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------|
| Laine de verre  | 0.034 à 0.053    | 70             | 150                                | Sensible à l'humidité |
| Mousse de verre | 0.57             | 123            | 150                                | Sensible à l'humidité |
| Bois            | 0.13 à 0.4       | 123            | 150                                |                       |
| Liège exposé    | 0.045            | 100            |                                    |                       |
| Polystyrène     | 0.042            | 15             | 85                                 | Moulé comprimé        |
| Polyuréthane    | 0.035            | 35             | 85                                 | Moulé comprimé        |

**Tableau .III.4.** Conductivité thermique , volume massique, Température maximale d'utilisation des différents isolants [17].

**III.3.4. Fluide caloporteur :** La chaleur collectée par l'absorbeur est transportée par l'intermédiaire du fluide d'échange thermique : appelé fluide caloporteur qui est soit de l'air. Les capteurs solaire plans à air présentent de faibles performances thermiques comparativement aux capteurs à liquide, mais ils ont un avantage par rapport à ces derniers qui est l'absence des problèmes de gel et de corrosion et la facilité des travaux d'entretien ce qui donne au capteur une durée de vie importante.

### **III.4. Les paramètres influant l'efficacité d'un capteur solaire [19]:**

Le rendement d'un capteur solaire thermique est influencé par différents paramètres :

#### **III.4.1. Les paramètres externes :**

1- Les paramètres d'ensoleillement :

- Eclairement énergétique dû au rayonnement global.
- Position du soleil et durée d'insolation.
- L'heure de la journée et la saison.
- La position géographique du lieu considéré (latitude).

2- Température ambiante.

3- Vitesse du vent.

#### **III.4.2. Les paramètres internes [19]:**

1- Les paramètres de position :

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suivant le soleil.

2- Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

- L'absorbeur :

- Les propriétés thermo-physiques et optiques.
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.
- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

- La surface sélective
  - Propriétés optiques.
- Couverture transparente
  - Propriétés optiques et thermo-physiques.
  - Epaisseur.
  - Le nombre de vitrage et la forme.
- L'isolant
  - Propriétés thermo-physiques et optiques.
  - Epaisseur.
- Fluide caloporteur
  - Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
  - Température d'entrée.
  - Propriétés thermo-physiques.

### **III.5. Conclusion :**

Nous avons vu dans ce chapitre une étude générale sur les capteurs solaires plans à air et principaux composants et différentes caractéristiques, ses composantes, les paramètres influant sur leur efficacité.

# *Chapitre IV*

Modélisation thermique des échanges  
thermiques d'un le CSP.

### IV.1.Introduction:

Ce chapitre permet de comprendre le bilan thermique des échanges de chaleur qui ont lieu dans le système pour pouvoir calculer les coefficients d'échange de chaleur et de perte. Les pertes à l'arrière sont négligées dans cette étude.

### IV.2. Echanges thermiques dans un capteur solaire plan à air:

#### IV.2.1 .1<sup>er</sup> cas: capteur plan simple vitrage :

#### IV.2.1 .1.Schéma analogique global des échanges thermiques

Les échanges thermiques dans un capteur solaire plan à air à une passe, constitué d'une seule vitre de protection située au-dessus de l'absorbeur peuvent être schématisés selon la figure suivante [21]:

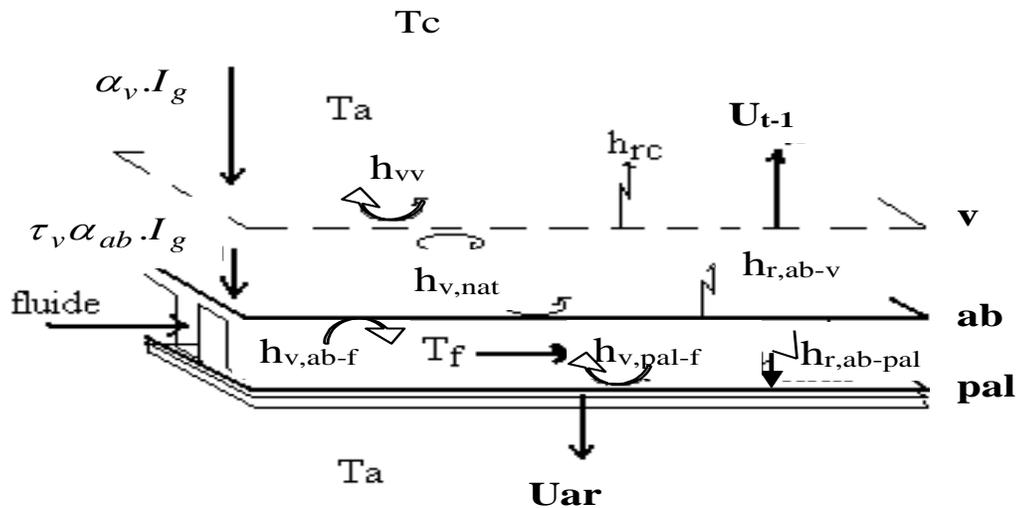


Figure. IV.1. Schéma des échanges thermiques dans un CSP- une vitre [21].

#### IV.2.1.2.Bilan des échanges de chaleur:

L'application nous donne les équations suivantes :

- Pour la couverture transparente (vitre d'indice v):

$$\alpha_v I_g + \left( \frac{h_{v,nat}}{2} + h_{r,ab-v} \right) (T_{ab} - T_v) = U_{av-1} (T_v - T_{amb}) \quad (IV.1)$$

- Pour l'absorbeur (indice ab) :

$$(\tau_v \alpha_{ab}) I_g = \left( \frac{h_{v,nat}}{2} + h_{r,ab-v} \right) (T_{ab} - T_v) - h_{v,ab-f} (T_{ab} - T_f) - h_{r,ab-pal} (T_{ab} - T_{pal}) \quad (IV.2)$$

- Pour le fluide caloporteur (air d'indice f):

$$h_{v,ab-f} (T_{ab} - T_f) = Q_u + h_{v,pal-f} (T_f - T_{pal}) \quad (IV.3)$$

- Pour l'isolant (d'indice pal):

$$h_{v,pal-f}(T_f - T_{pal}) + h_{r,ab-pal}(T_{ab} - T_{pal}) = U_{ar}(T_{pal} - T_{amb}) \quad (IV.4)$$

$\alpha_v$ : Coefficient d'absorptivité de la vitre.

$I_g$  : L'irradiation tombante sur la surface totale de l'absorbeur.

$h_{v,nat}$ : coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre.

$$\square_{v,nat} = 1.42 \left( \frac{(T_{ab} - T_{amb}) \sin \beta}{L} \right)^{1/4} \quad (IV.5)$$

$T_{ab}$ : température de l'absorbeur.

$T_{amb}$ : température ambiante.

$\beta$ : l'angle d'inclinaison.

L: longueur de l'absorbeur.

$h_{r,ab-v}$ : Coefficient d'échange radiatif entre la vitre et l'absorbeur.

$$h_{r,ab-v} = \sigma (T_v^2 + T_{ab}^2) (T_v + T_{ab}) / \left( \frac{1}{\varepsilon_v} + 1/\varepsilon_{ab} - 1 \right) \quad (IV.6)$$

$\sigma$ : Constant de Stefan Boltzmann.

$T_v$ : température de vitre.

$\varepsilon_v$ : Emissivité de la vitre.

$\varepsilon_{ab}$ : Emissivité de l'absorbeur.

$U_{av-1}$ : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre [W/°K.m<sup>2</sup>]

$$U_{av-1} = h_{vv} + h_{rc} \quad (IV.7)$$

$h_{v,v}$  : Coefficient d'échange convectif du vent.

$$h_{v,v} = 5.67 + 3.86 \cdot V_v \quad (IV.7.1)$$

$V_v$  : La vitesse de vent.

$h_{rc}$  : Le coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste.

$$h_{rc} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_v (1 + \cos \beta) (T_v + T_c) (T_v^2 + T_c^2) \quad (IV.7.2)$$

$T_c$ : la température de ciel.

$$T_c = 0,0552 T_{amb}^{1.5} \quad (IV.7.2.1)$$

$\tau_v$ : Transmissivité de vitre.

$\alpha_{ab}$ : Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur.

$h_{v,ab-f}$ : coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

$$h_{v,ab-f} = \frac{N_u \lambda_f}{D_H} \quad (IV.8)$$

$T_f$ : température de fluide.

$\lambda_f$ : conductivité thermique de l'air (W/m. k).

$N_u$ : nombre de Nusselt.

$$N_u = 0.0158. Re_e^{0.8} \text{ Pour } \frac{L}{D_H} > 10 \quad (IV.8.1)$$

$D_H$ : diamètre hydraulique.

$$D_H = \frac{2.l.e}{1+e} \quad (IV.8.2)$$

$l$  : longueur de conduite.

$e$  : largeur de conduite.

$$Re = \frac{v_f D_H}{\nu} \quad (IV.8.3)$$

$Re$ : le nombre de Reynolds.

$v_f$ : La vitesse de l'air.

$\nu$ : viscosité cinématique de l'air.

$$v_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f \cdot A_f} \quad (IV.8.3.1)$$

$\dot{m}$  : débit massique.

$\rho_f$  : la masse volumique de l'air.

$A_f$  : La section de passage de l'air.

$$A_f = l.e \quad (IV.8.3.1.2)$$

$$h_{r,ab-pal} = \sigma \frac{(T_{ab}^2 + T_{pal}^2)(T_{ab} + T_{pal})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + 1/\varepsilon_{pal} - 1\right)} \quad (IV.9)$$

$h_{r,ab-pal}$ : Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant [W/°K.m<sup>2</sup>].

$T_{pal}$ : température de plaque arrière.

$\varepsilon_{pal}$ : Emissivité de la plaque métallique.

$h_{v,pal-f}$ : coefficient d'échange convectif entre l'isolant et le fluide caloporteur [W/°K. m<sup>2</sup>].

$$h_{v,pal-f} = h_{v,ab-f} = \frac{N_u \lambda_f}{D_H} \quad (IV.10)$$

$U_{ar}$ : Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur [ $W/^\circ K.m^2$ ].

$$U_{ar} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{vv}}} \quad (IV. 11)$$

$e_{is}$ : épaisseur de l'isolant.

### IV.2.1.3. L'analogie électrique [22]:

n peut utiliser l'analogie électrique pour déterminer l'expression du coefficient de pertes global en fonction des coefficients d'échange convectifs et radiatifs, tel que :

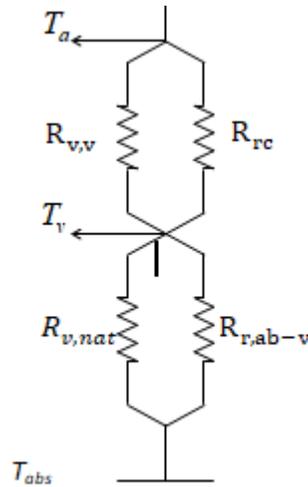


Figure. IV.2. analogie électrique[22].

$$R_{v,v} = \frac{1}{h_{v,v}} \quad (IV. 12.1)$$

$$R_{rc} = \frac{1}{h_{rc}} \quad (IV. 12.2)$$

$$R_{v,nat} = \frac{1}{\square_{v,nat}} \quad (IV. 12.3)$$

$$R_{r,ab-v} = \frac{1}{h_{r,ab-v}} \quad (IV. 12.4)$$

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{1}{R_{v,v}} + \frac{1}{R_{rc}} \quad (IV. 12.5)$$

$$\frac{1}{R_{eq2}} = \frac{1}{R_{v,nat}} + \frac{1}{R_{r,ab-v}} \quad (IV. 12.6)$$

$$R_{eq} = R_{eq1} + R_{eq2} = \frac{1}{h_{v,v} + h_{rc}} + \frac{1}{\square_{v,nat} + h_{r,ab-v}} \quad (IV. 12.7)$$

L'expression du coefficient de pertes global est donc :

$$\frac{1}{R_{eq}} = U_L = \left( \frac{1}{h_{v,v} + h_{rc}} + \frac{1}{h_{v,nat} + h_{r,ab-v}} \right)^{-1} \quad (IV.13)$$

#### IV.2.2.2<sup>er</sup> cas: capteur plan double vitrage [23]:

Les coefficients des échanges de chaleur dans ce type de capteur peuvent être calculés à partir du bilan qui tient compte de la deuxième vitre. Le schéma analogique des échanges est le suivant. Une comparaison entre les deux cas sera donnée au chapitre suivant.

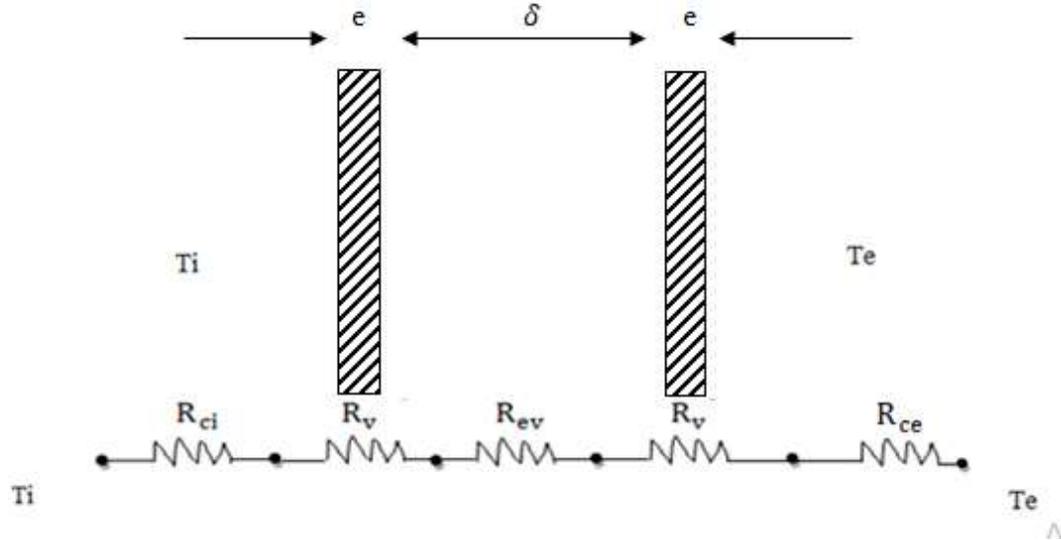


Figure. IV.3. analogie électrique.

#### IV.3 Calculs des pertes thermiques (Simple et double vitrage) :

Soit un capteur à air composé d'une vitre et d'un absorbeur de même surface entre lesquels circule un courant d'air de température moyenne  $T_i = 80^\circ\text{C}$ . La température extérieure est  $T_e = 15^\circ\text{C}$ .

a) calculons les pertes de chaleur en considérant que :

- l'épaisseur de la vitre  $e = 0.3 \text{ cm}$

- la conductivité thermique du verre  $K_v = 0.75 \text{ w/m.k}$

b) comparons ces pertes avec celles d'un capteur muni d'un double vitrage de même caractéristiques sachant que la distance entre les deux vitres est  $\delta$  et que le transfert de chaleur se fait par

a) convection : vers l'extérieur  $h = 22 \text{ w/m.k}$

Vers l'intérieur  $h = 6 \text{ w/m.k}$

b) par conduction entre les deux vitres :  $K_a = 0.024$

1. cas du simple vitrage :

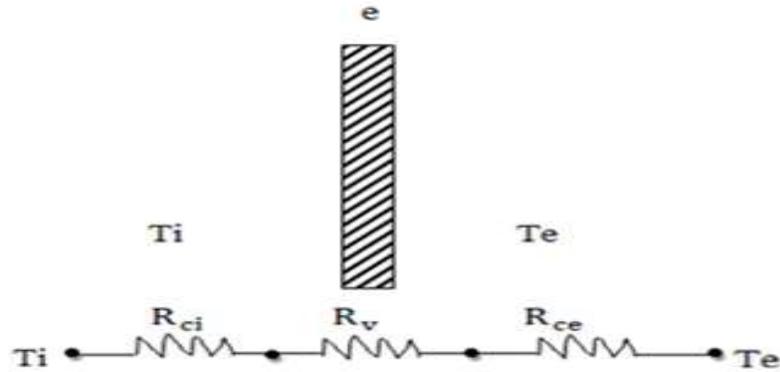


Figure. IV.4. Analogie électrique (simple vitrage)

$$R_{ci} = \frac{1}{h_{ci}} = \frac{1}{6} = 0.167$$

$$R_v = \frac{e}{k_v} = \frac{0.3 \times 10^{-2}}{0.75} = 0.004$$

$$R_{ce} = \frac{1}{h_{ce}} = \frac{1}{22} = 0.045$$

Les pertes par unité de surface sont :  $q = \frac{T_i - T_e}{R_v + R_{ci} + R_{ce}} = 300 \text{ w/m}^2$

2. cas du double vitrage:

$$R = R_{ci} + 2R_v + R_{ce} + R_{ev}$$

$$R_{ev} = \frac{\delta}{R_a} = 0.416$$

$$q = \frac{T_i - T_e}{R} = 102 \text{ w/m}^2$$

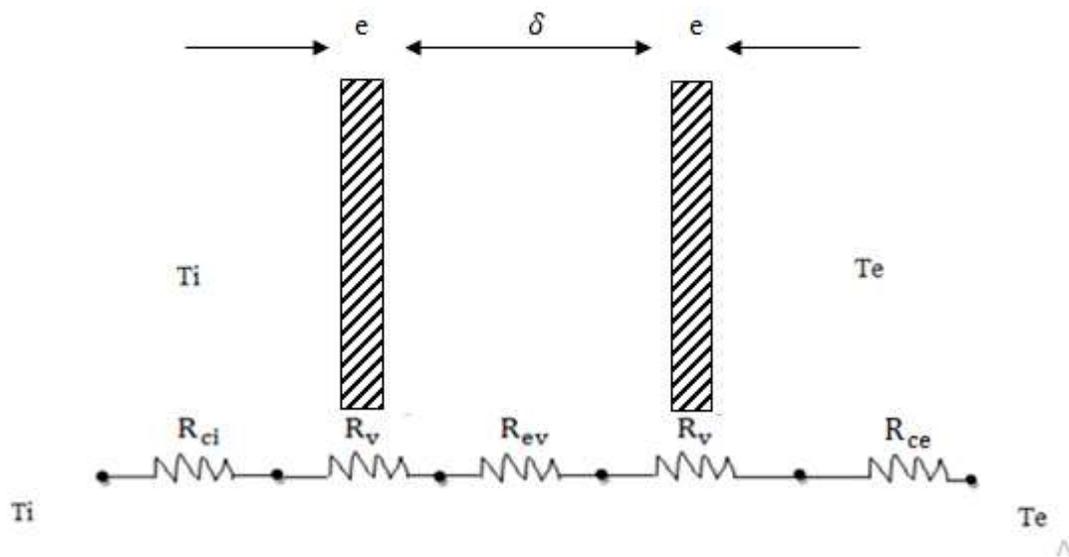


Figure. IV.5. analogie électrique (double vitrage).

**IV.4. Conclusion :**

Nous avons vu dans ce chapitre une étude théorique et modélisation thermique sur le capteur solaire plan afin de pouvoir évaluer ses pertes pour deux types différents (capteur plan simple vitrage et capteur plan double vitrage).

# Chapitre V

Résultats obtenus

## V.1.Introduction :

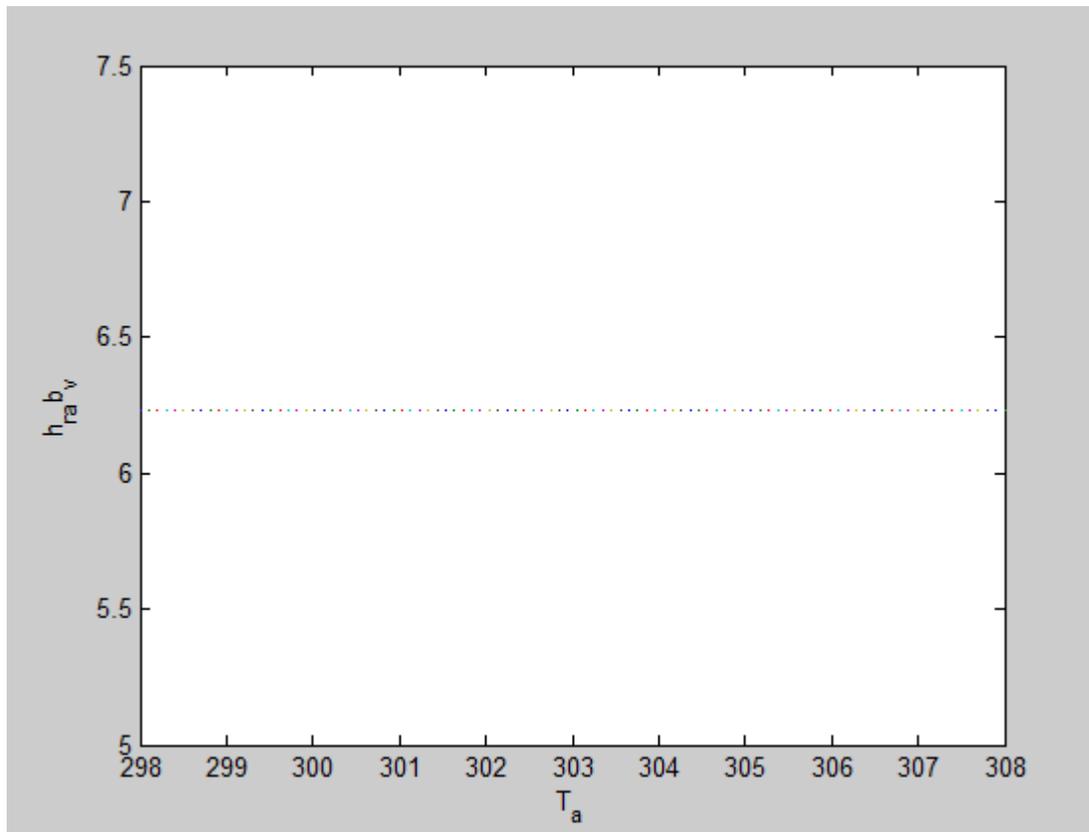
Dans ce chapitre sont présentés les résultats des calculs effectués. Les calculs des différents paramètres relatifs aux échanges dans le capteur solaire plan à air sont analysé et modélisé en utilisant un code programmé en MATLAB. Cette étude englobe l'étude des coefficients des échanges thermiques dans deux cas simple vitrage et double vitrage. Également,

## V.2. Variation des coefficients des changes thermique :

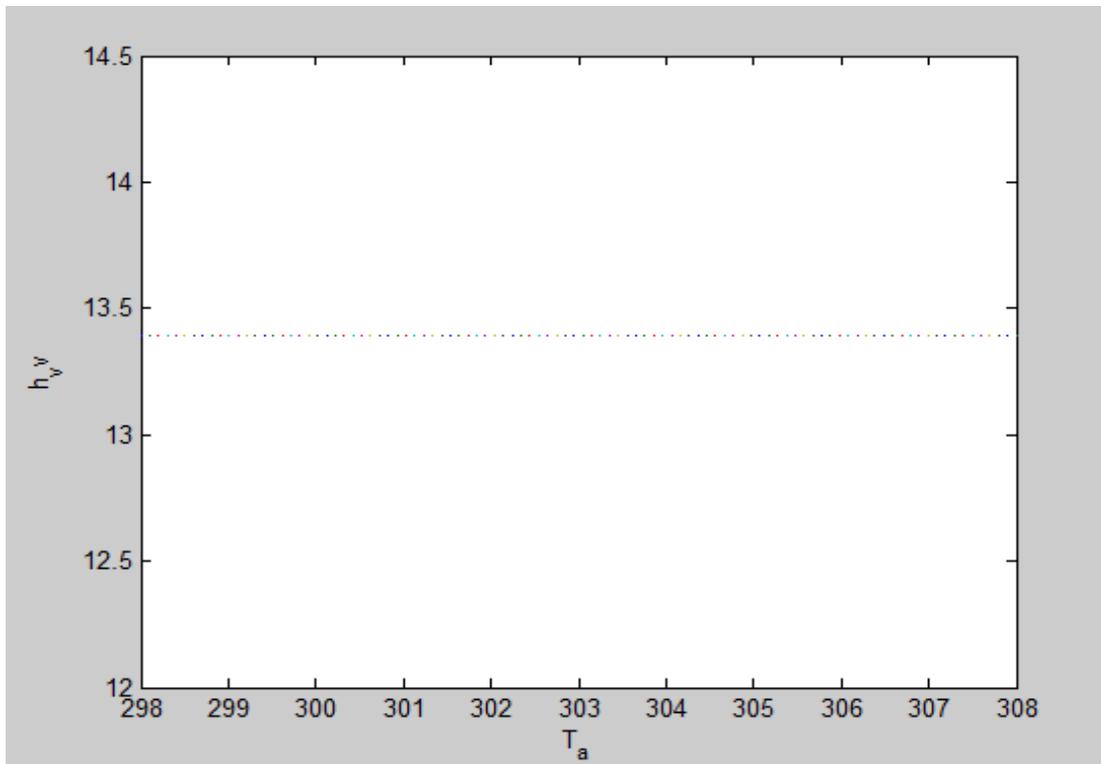
### V.2.1.cas simple vitrage:

#### V.2.1.1.Influence de la température ambiante :

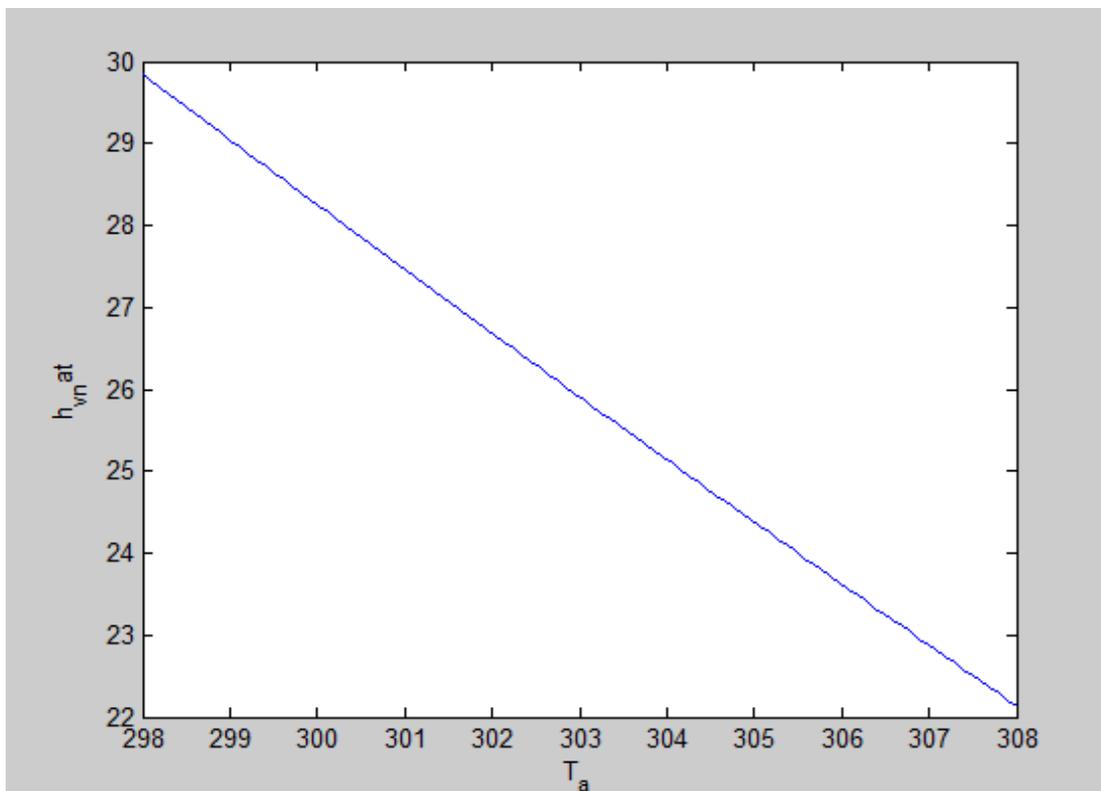
Les courbes qui suivent montrent la variation des différents coefficients de pertes thermiques en fonction de la température ambiante.



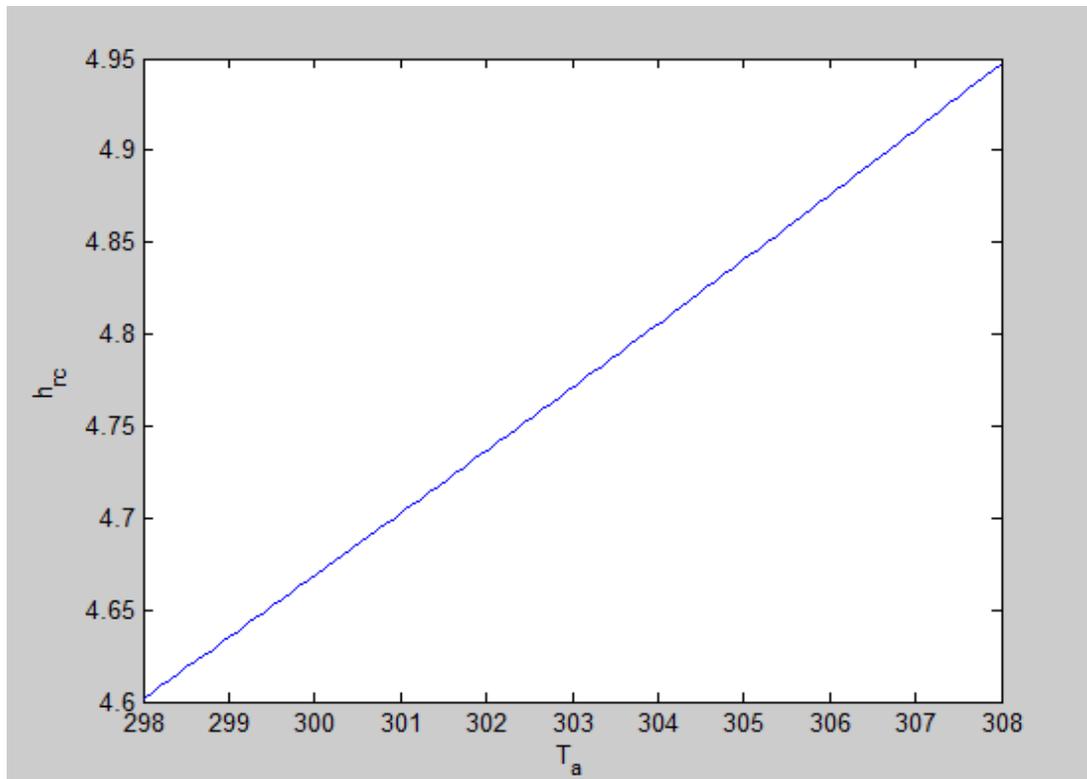
**Figure. V.1.** Variation du coefficient d'échange radiatif vitre -l'absorbeur.



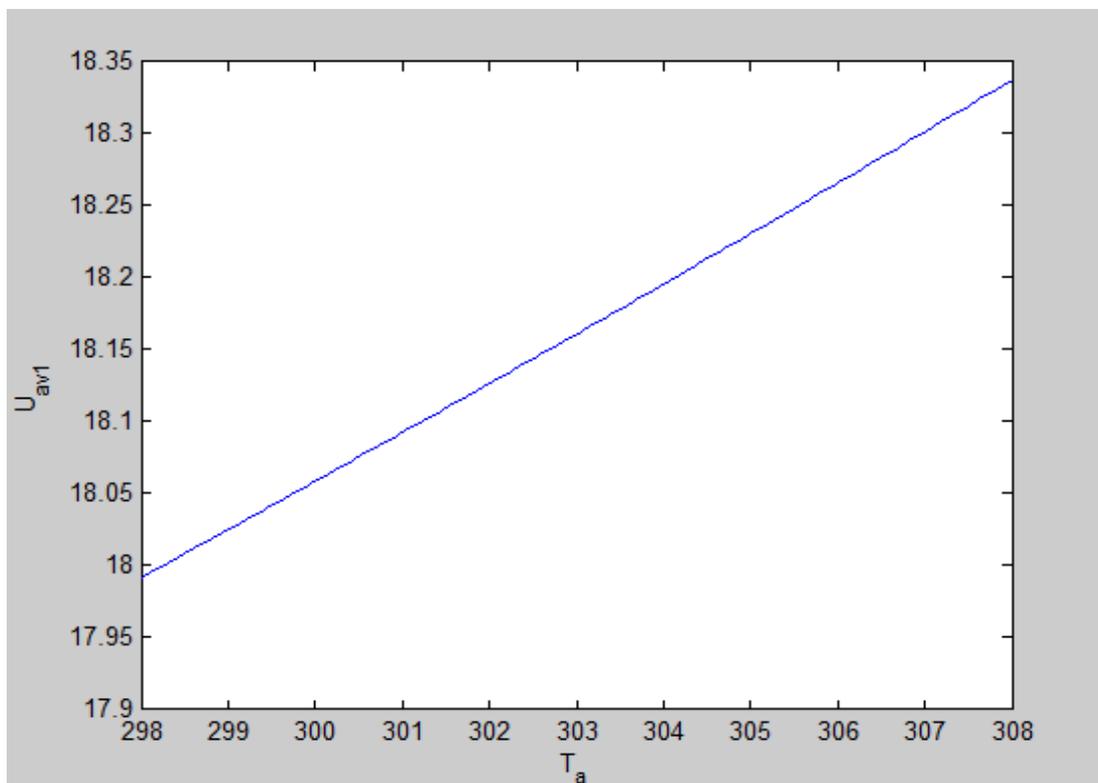
**Figure. V.2.** Variation du Coefficient d'échange convectif du vent.



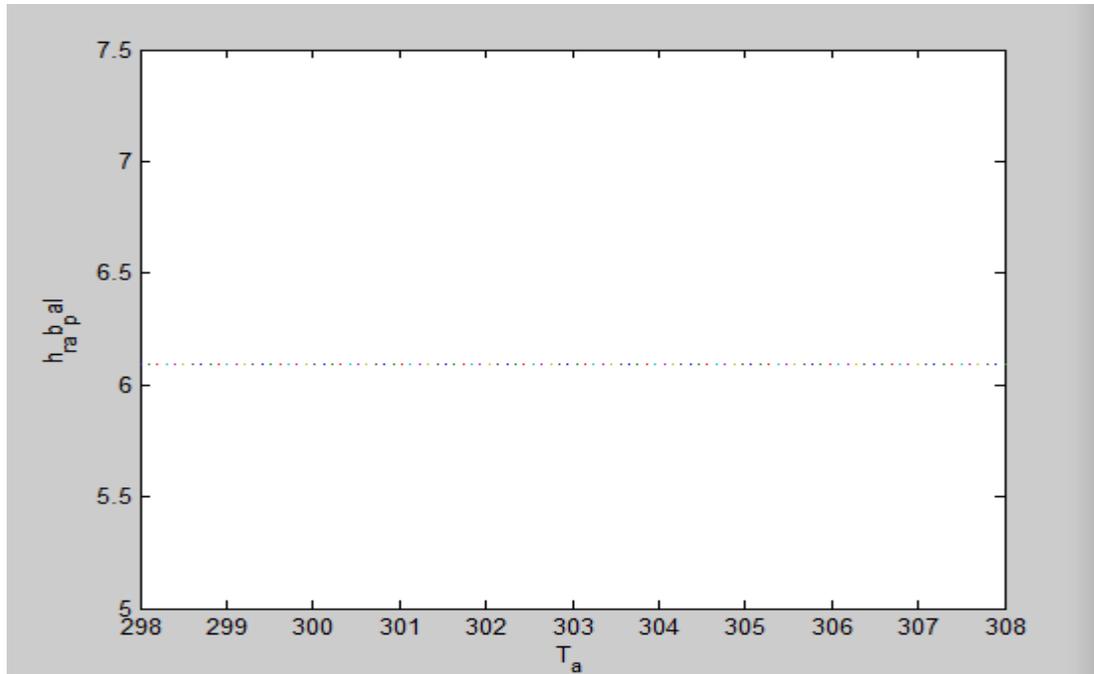
**Figure . V.3.** variation du coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre.



**Figure. V.4.** variation du coefficient d'echange radiatif entre la vitre et la voute céleste.



**Figure. V.5.** Variation des pertes avant en fonction température ambiante.



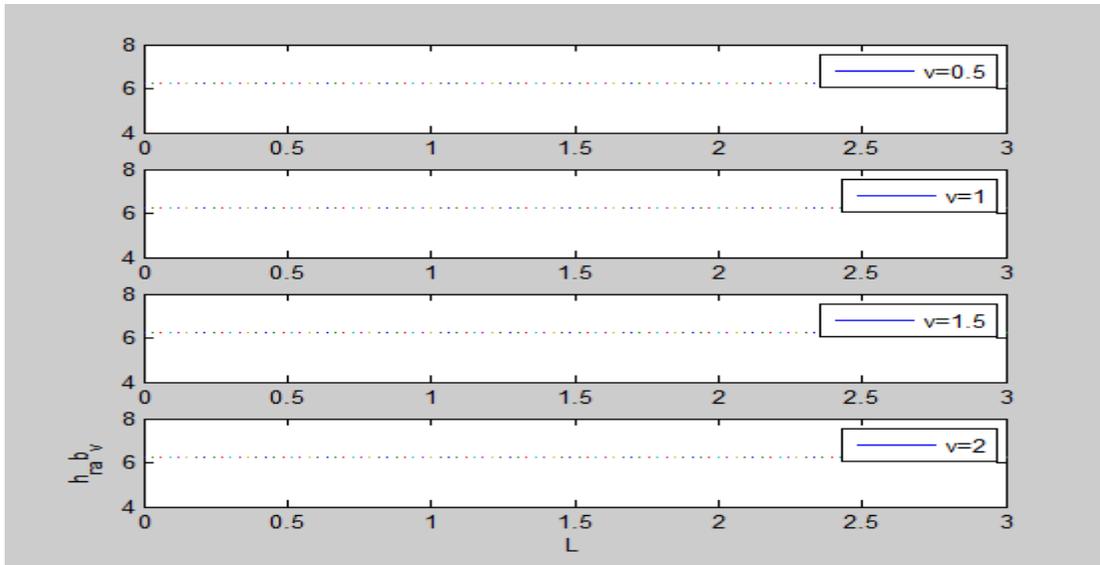
**Figure. V.6.** Variation du Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant.

### Interprétation

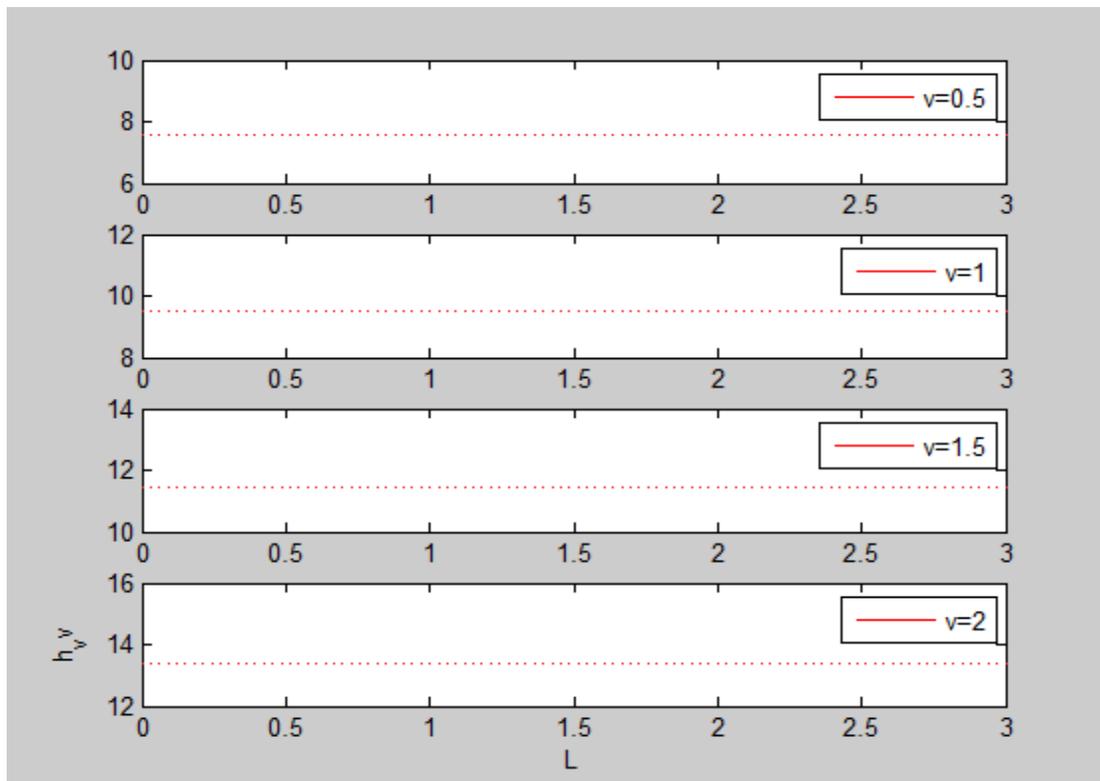
A travers les courbes ci-dessus exposées on constate que les coefficients d'échange radiatifs sont insensibles à la variation de la température ambiante. Par contre, ceux convectifs sont très sensibles à ces variations. Dans tous les cas les pertes thermiques vers l'avant du capteur solaire sont influencées par la variation de la température ambiante

### **V.2.1.2. Influence de la vitesse du vent:**

Les courbes qui suivent représentent la variation des différents coefficients de pertes thermiques sur la face avant du capteur solaire en fonction de la longueur du capteur pour différentes vitesses du vent du milieu environnement au système.



**Figure. V.7.** Variation du coefficient d'échange radiatif vitre -l'absorbeur.



**Figure. V.8.** Variation du Coefficient d'échange convectif du vent.

Il est à remarquer à travers l'examen de ces courbes (**Figure. V.8**) que la vitesse du vent affecte les coefficients d'échange convectifs qui augmentent avec la vitesse du vent.

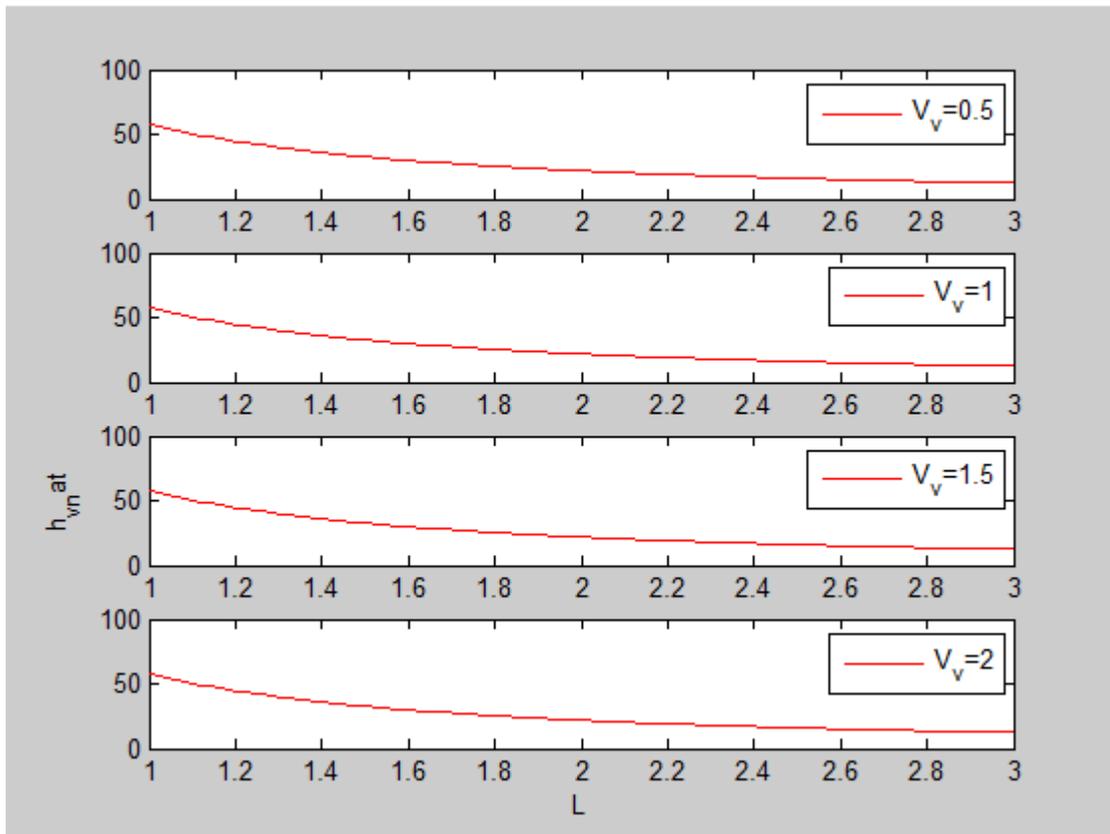


Figure. V.9.Variation du coefficient d'échange convectif entre l'absorbeur et la vitre.

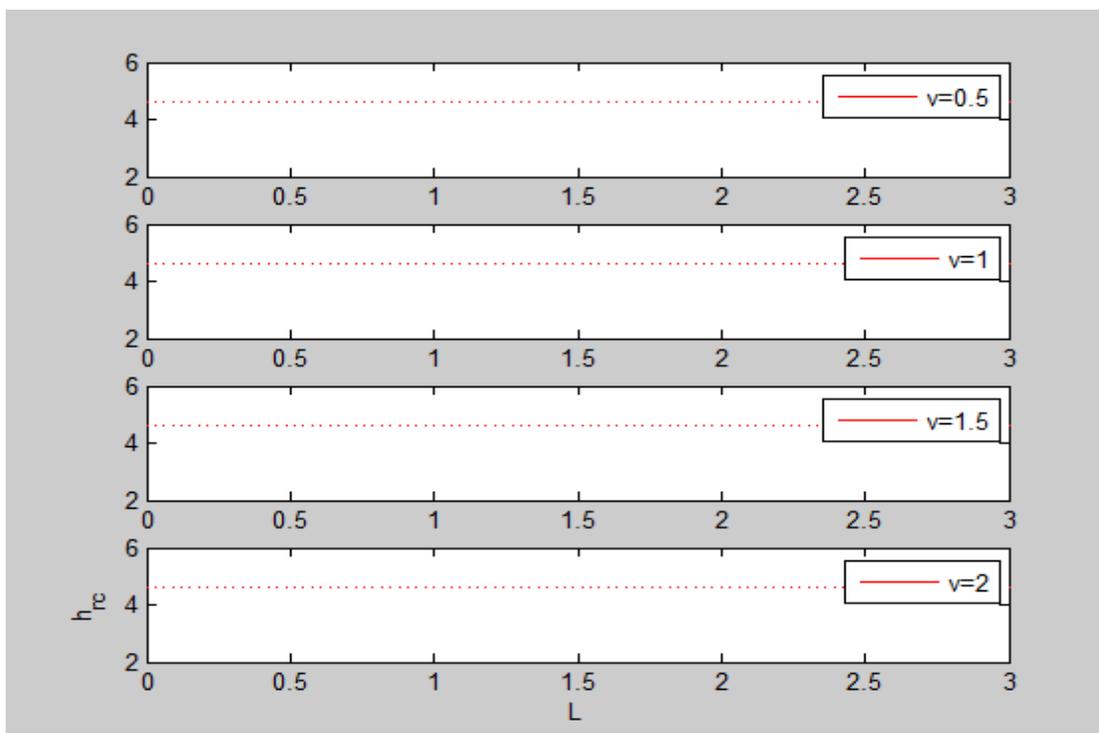
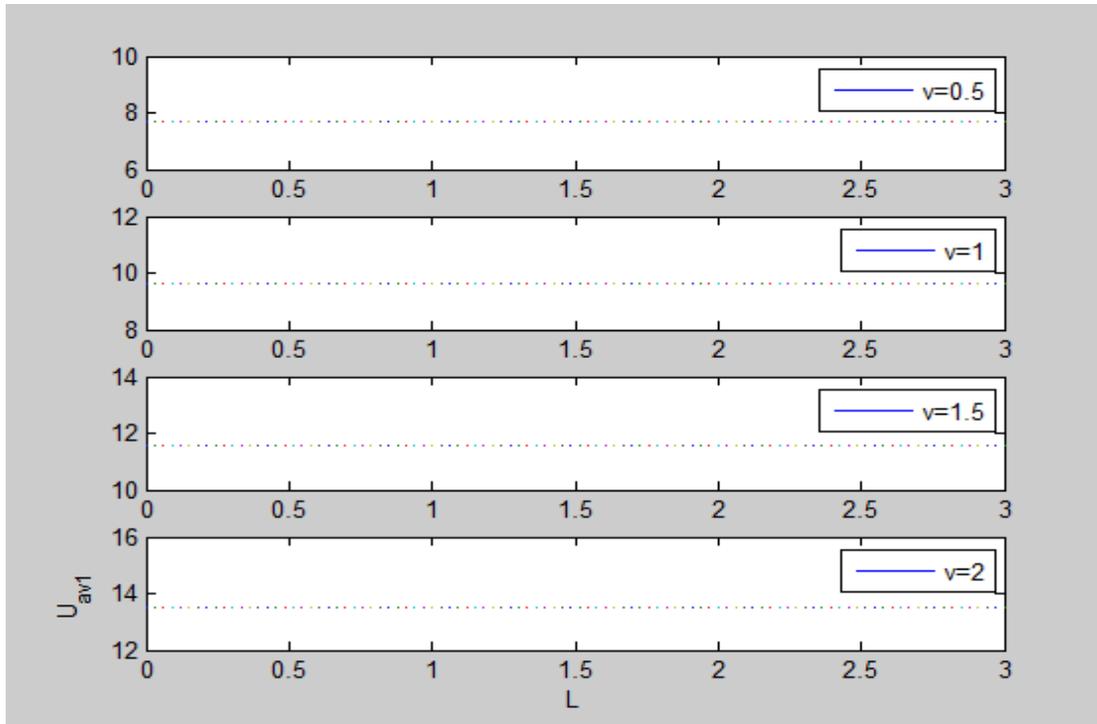
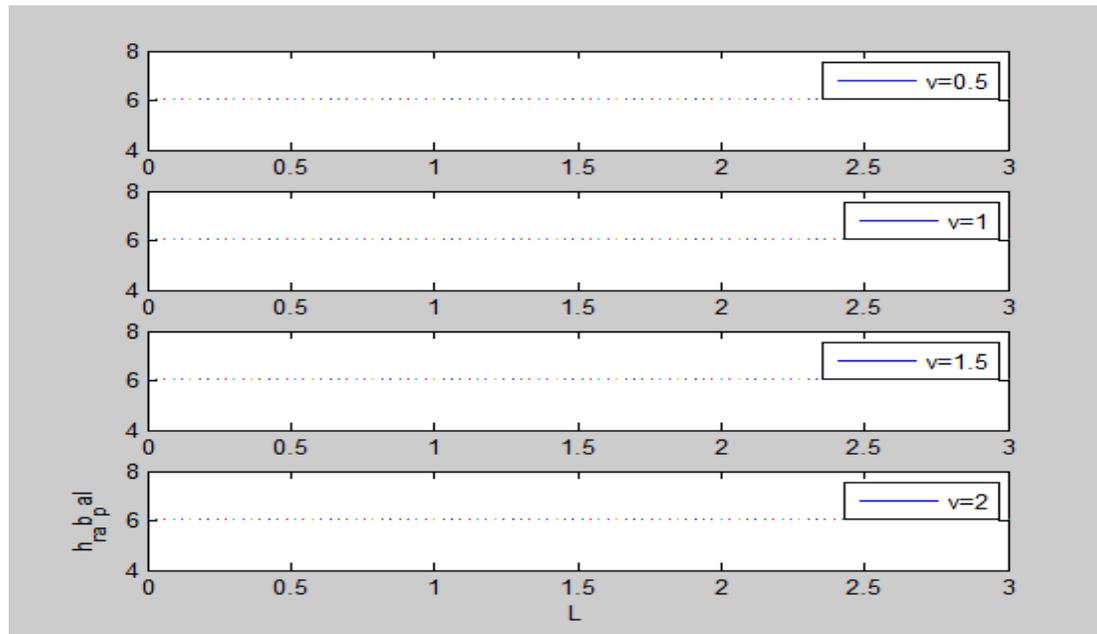


Figure .V.10.Variation du coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste.



**Figure. V.11.** Variation des pertes avant en fonction température ambiante.

Il est à remarquer à travers l'examen de ces courbes (**Figure. V.11**) que les pertes thermiques sur la face avant du capteur solaire augmentent avec la vitesse du vent.



**Figure. V.12.** Variation du Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant.

## V.2.2.cas double vitrage:

## V.2.2.1.Influence de la température ambiante :

Les courbes qui suivent montrent la variation des différents coefficients de pertes thermiques en fonction de la température ambiante.

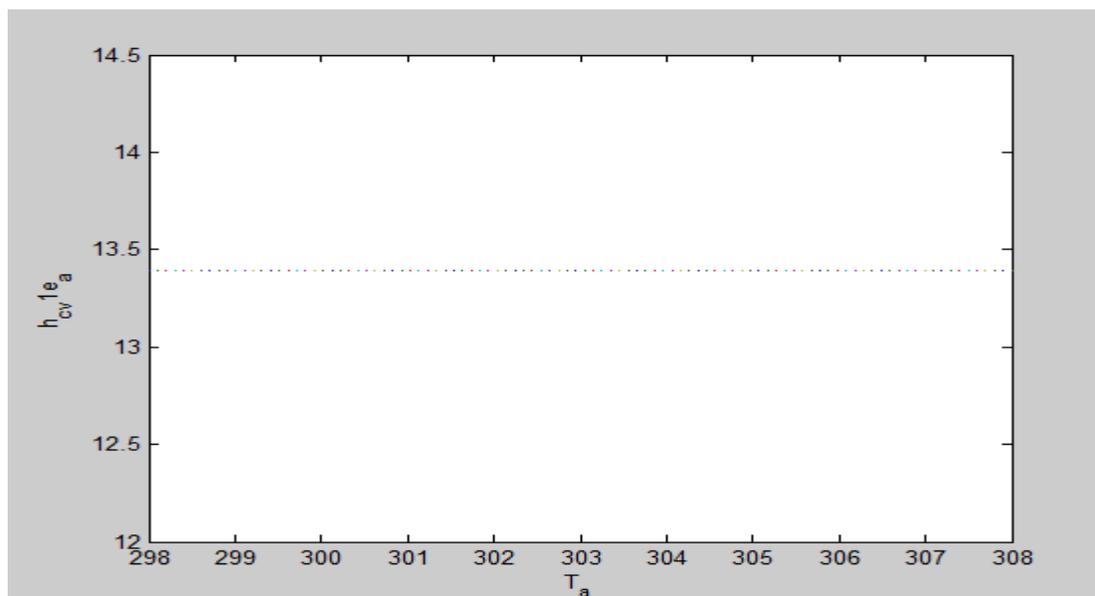


Figure. V.13. Variation du coefficient d'échange par convection entre la vitre 1 et l'ambiance.

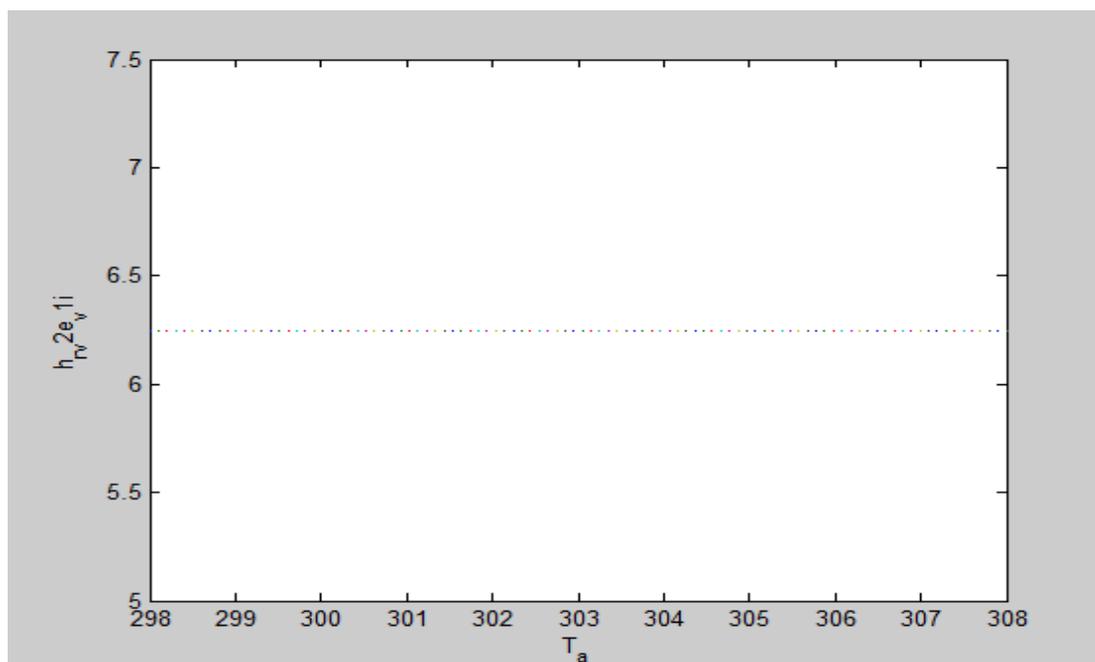
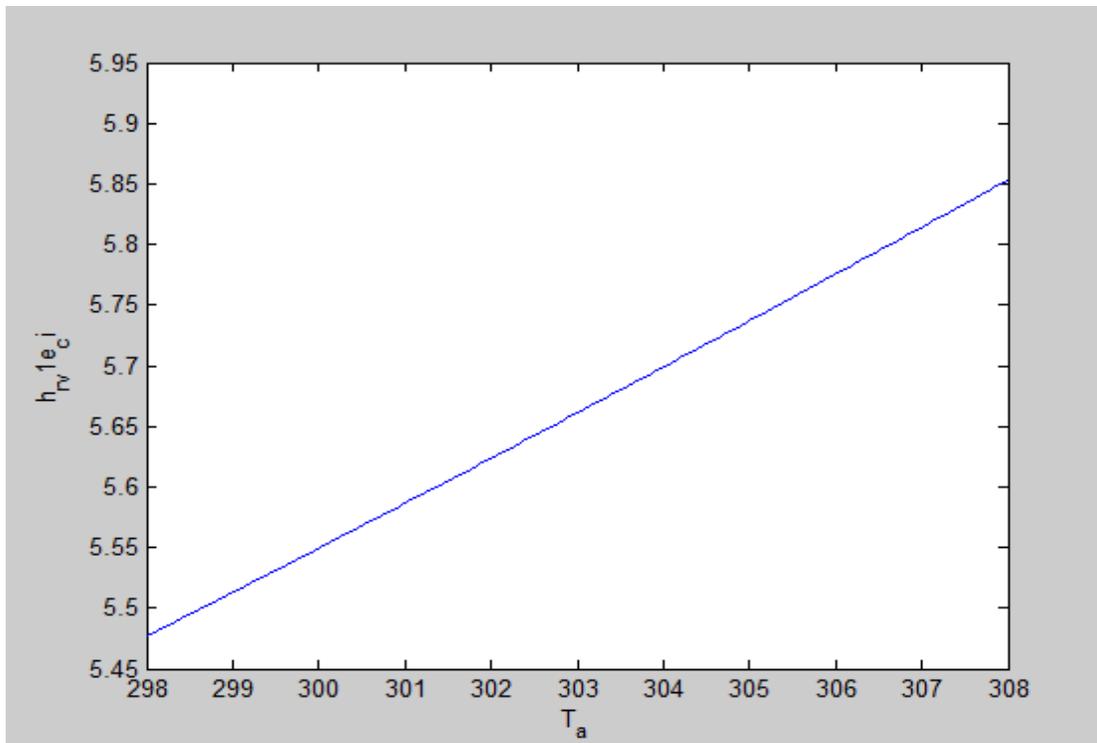
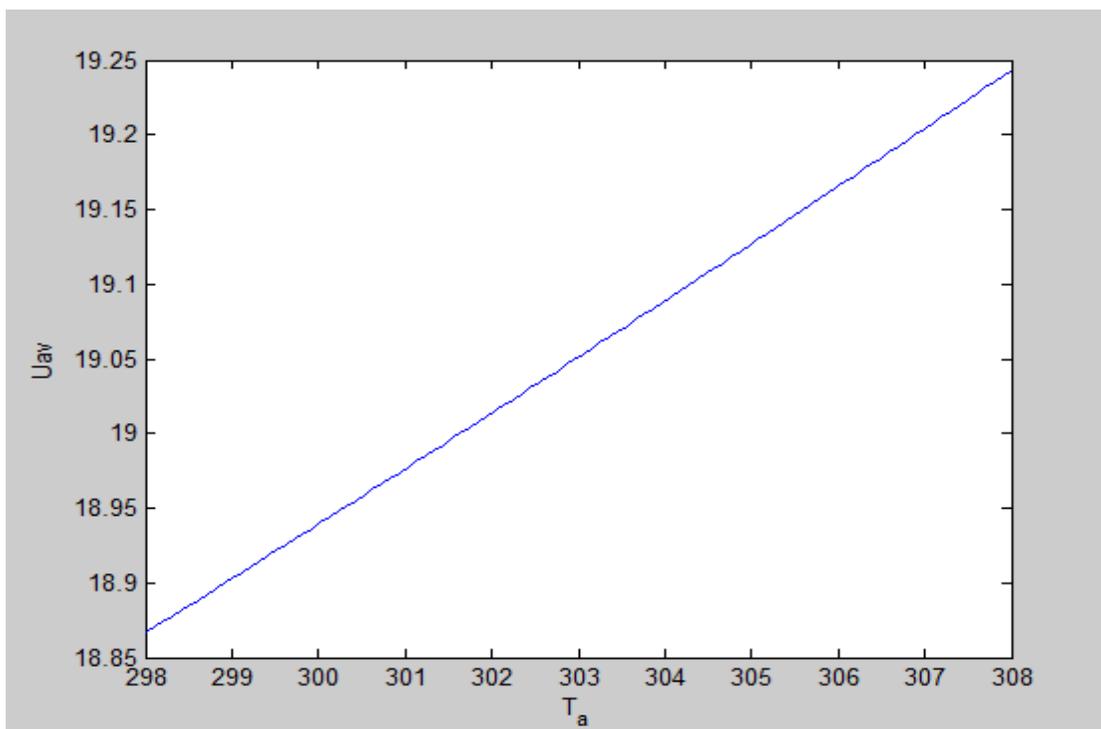


Figure. V. 14. Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre la vitre 2 et la vitre 1.



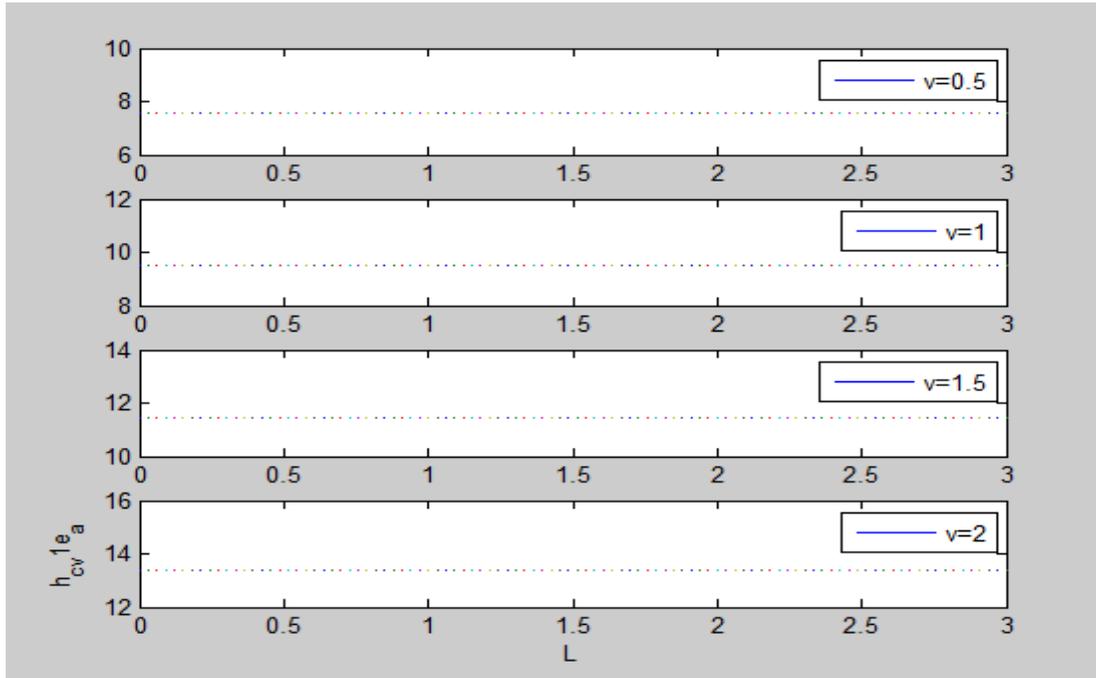
**Figure. V. 15.** Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre le ciel et sa face supérieure (vitre1) .



**Figure. V.16.** Variation des pertes avant en fonction température ambiante.

### V.2.2.2. Influence de la vitesse du vent:

Les courbes qui suivent représentent la variation des différents coefficients de pertes thermiques sur la face avant du capteur solaire en fonction de la longueur du capteur pour différentes vitesses du vent du milieu environnement au système.



**Figure. V.17.** Variation du coefficient d'échange par convection entre la vitre 1 et l'ambiance.

Il est à remarquer à travers l'examen de ces courbes (**Figure. V. 17**) que la variation du coefficient d'échange par convection entre la vitre 1 et l'ambiance augmentent avec la vitesse du vent.

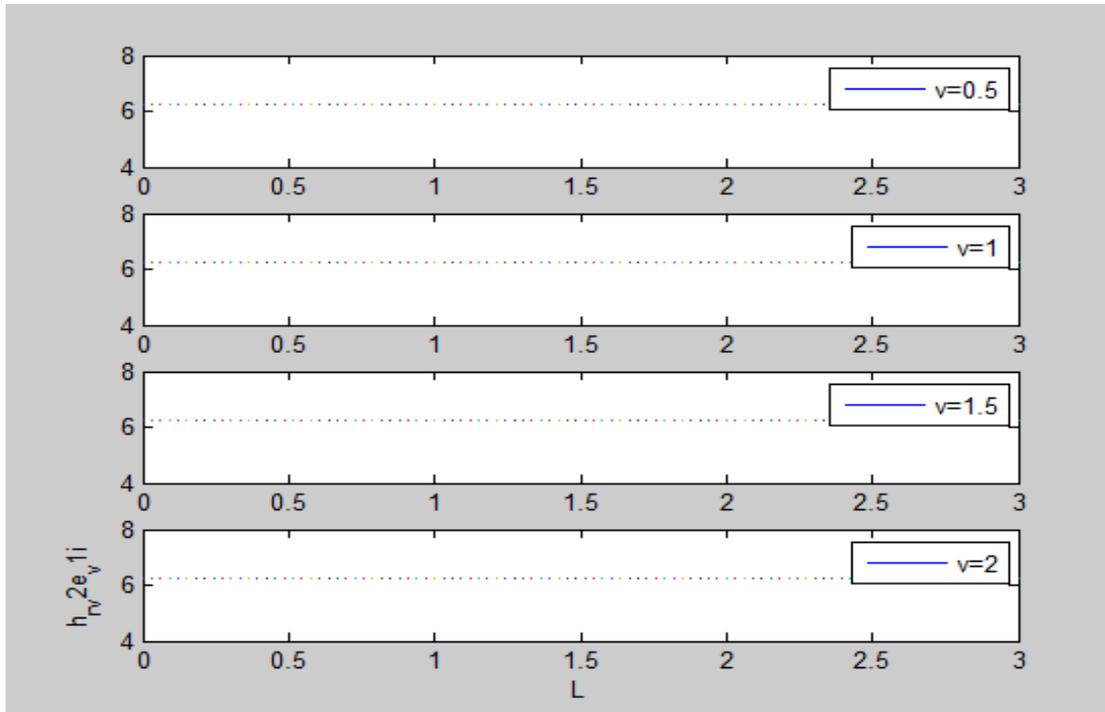


Figure. V. 18. Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre la vitre 2 et la vitre 1.

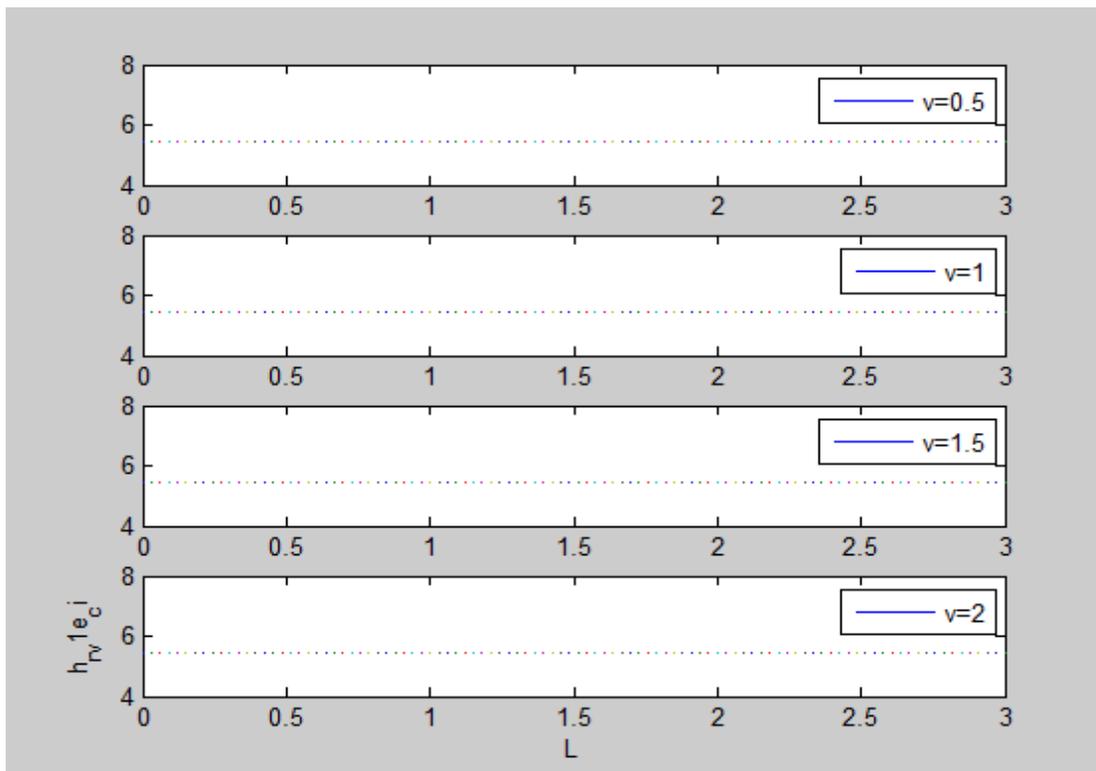
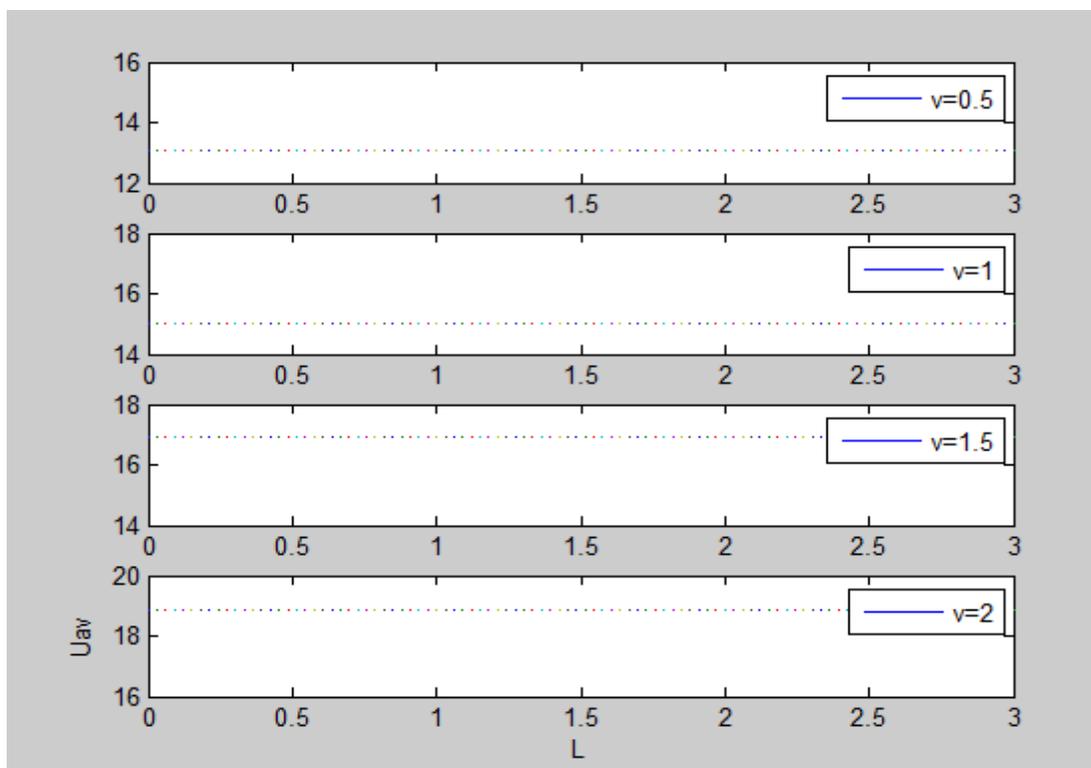


Figure. V. 19. Variation du coefficient d'échange Par rayonnement entre le ciel et sa face supérieure (vitre1).



**Figure. V.20.** Variation des pertes avant en fonction température ambiante.

Il est à remarquer à travers l'examen de ces courbes que les pertes thermiques sur la face avant du capteur solaire augmentent avec la vitesse du vent.

Les mêmes remarques sont conservées pour le cas d'un système à double vitrage sauf que les valeurs sont différentes.

### **V.3. Comparaison de certains coefficients dans les cas d'un capteur solaire à double et simple vitrage:**

Nous comparons les différents coefficients d'échange thermique (coefficient d'échange par rayonnement entre le ciel et vitre, coefficient d'échange convectif du vent et pertes avant) dans les deux cas d'un capteur solaire à double et simple vitrage.

#### **V.3.1. Influence de la température ambiante :**

Les courbes suivantes illustrent la comparaison des pertes de chaleur dans les deux cas de simple et double vitrage en fonction de  $T$  ambiante.

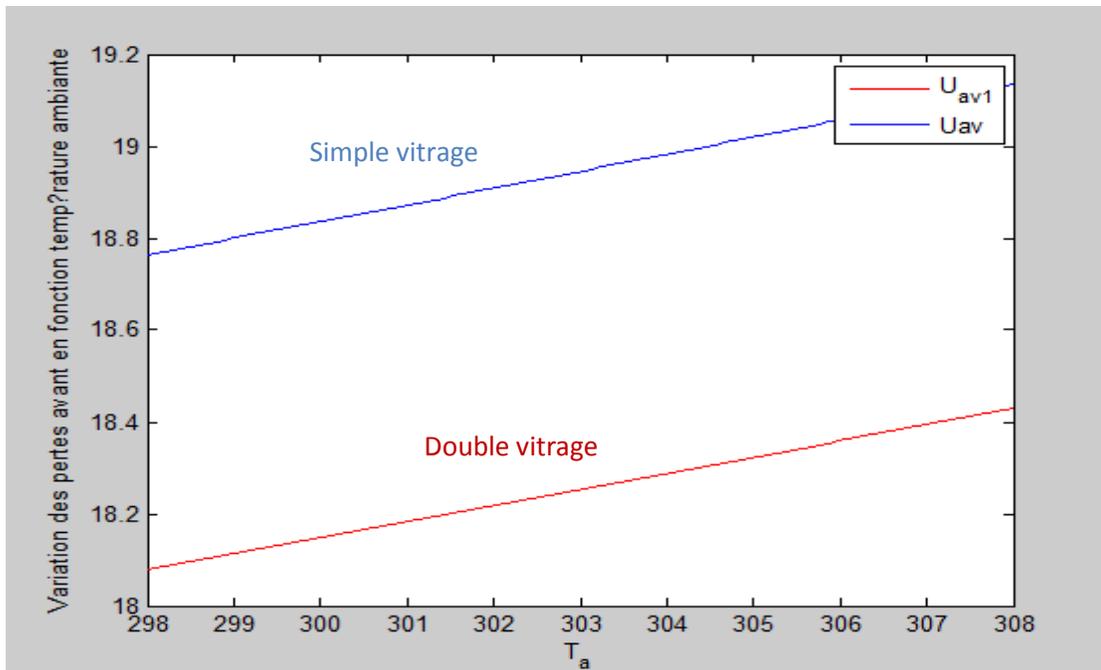


Figure. V.21. Variation des pertes avant en fonction température ambiante.

On remarque sur cette courbe que les pertes thermiques dans le cas du simple vitrage sont supérieures à celles d'un double vitrage (Figure. V.21) .

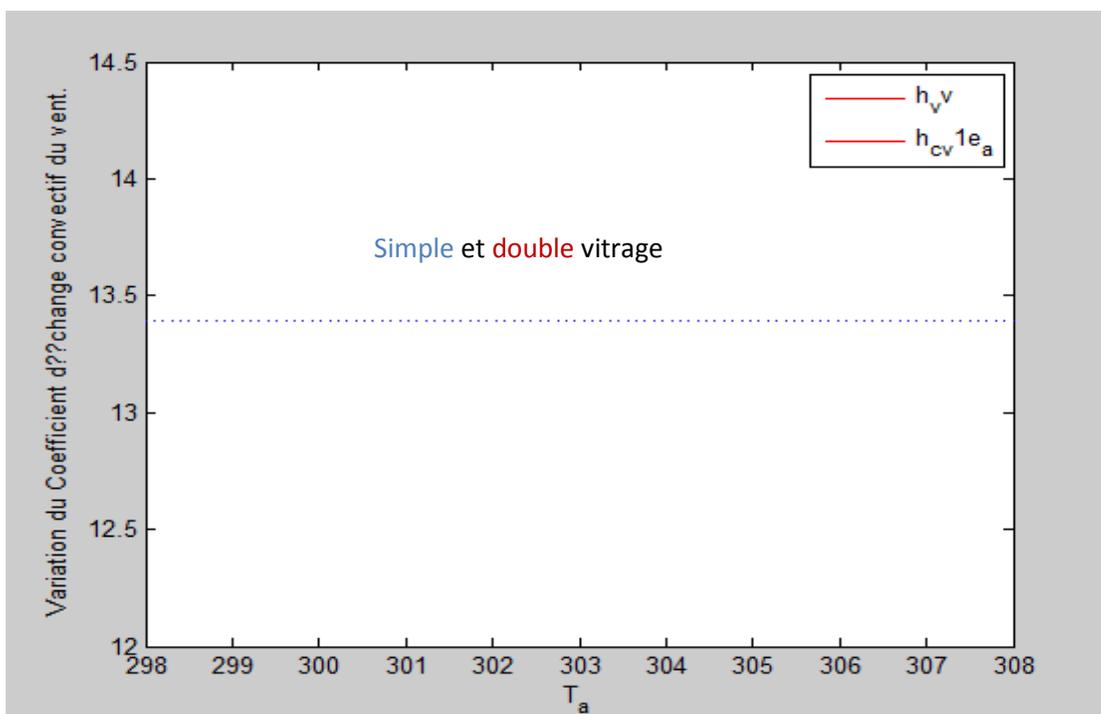
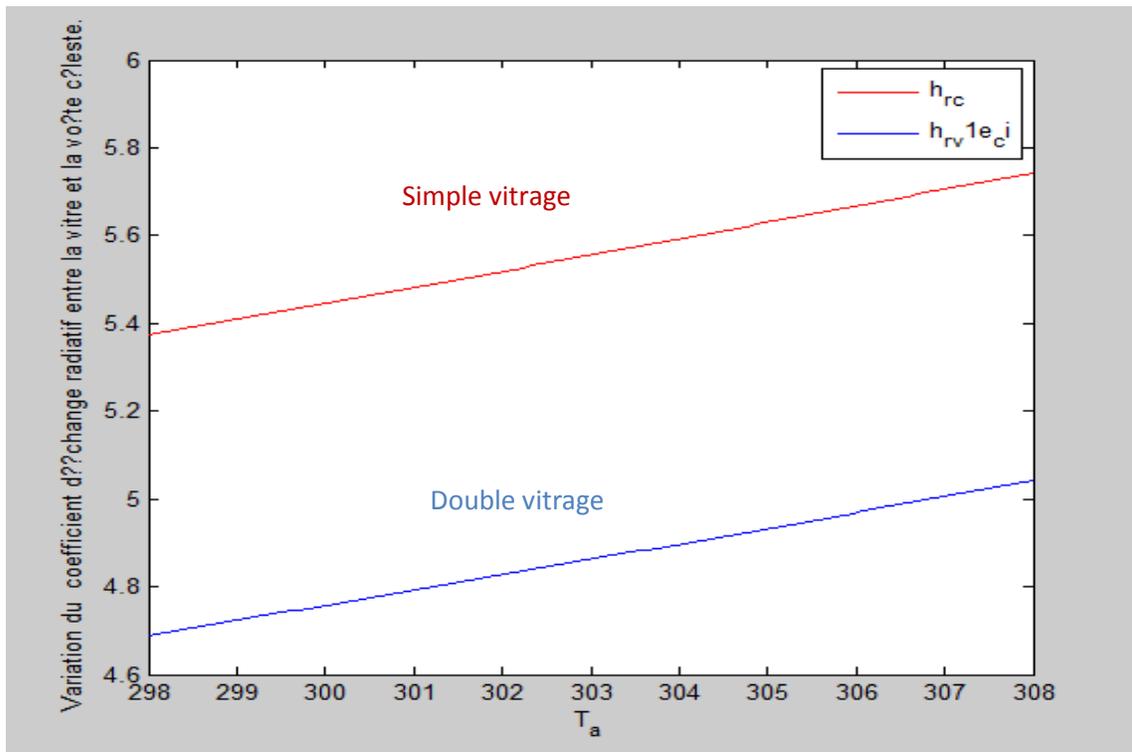


Figure. V.22. Variation du coefficient d'échange convectif du vent.

Le coefficient d'échange thermique dû au vent est toujours égale dans les deux cas, quel que soit  $T_{\text{ambiant}}$ . (**Figure. V.22**).



**Figure. V.23.** Variation du coefficient d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste.

Sur cette courbe on constate que le coefficient d'échange radiatif dans le cas du simple vitrage est légèrement supérieur que le cas du double vitrage (**Figure. V.23**).

### V.3.2. Influence de la vitesse du vent:

Les courbes suivantes représentent la comparaison de la variance des différents coefficients de déperdition thermique en fonction de la longueur du capteur pour différentes vitesses de vent pour le double et simple vitrage.

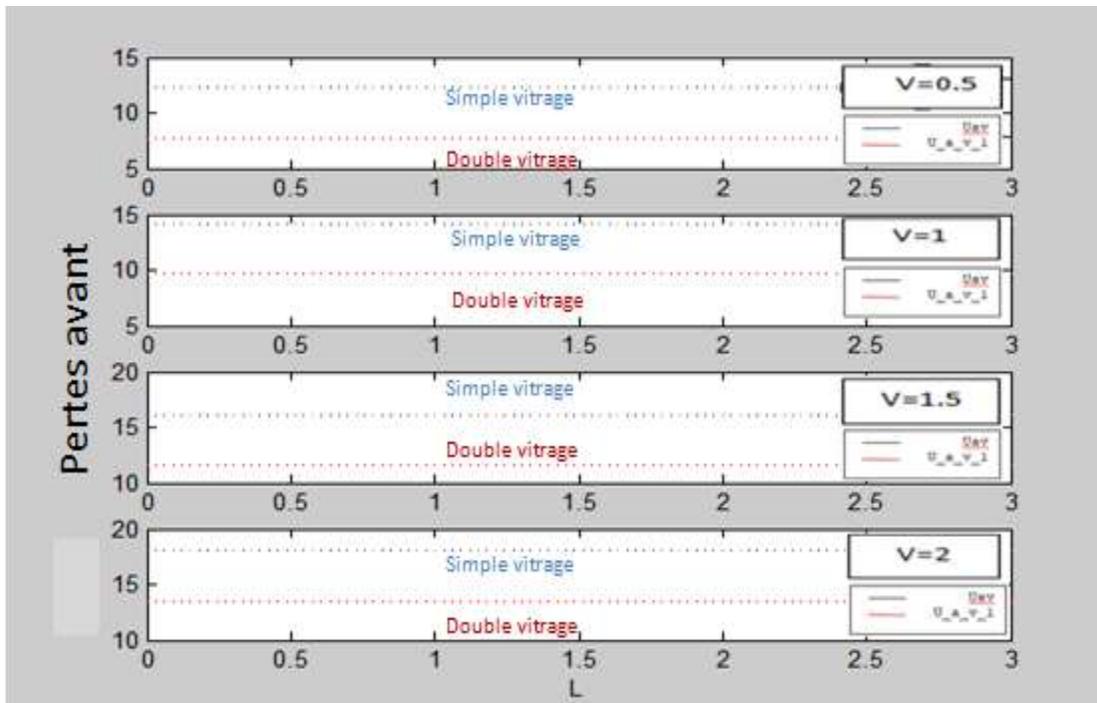


Figure. V.24. Variation des pertes avant en fonction de la longueur

On remarque dans les courbes suivantes que la différence entre les pertes thermiques dans les deux cas, le cas du simple et double vitrage, est presque constante, quelle que soit la vitesse du vent. (Figure. V.24).

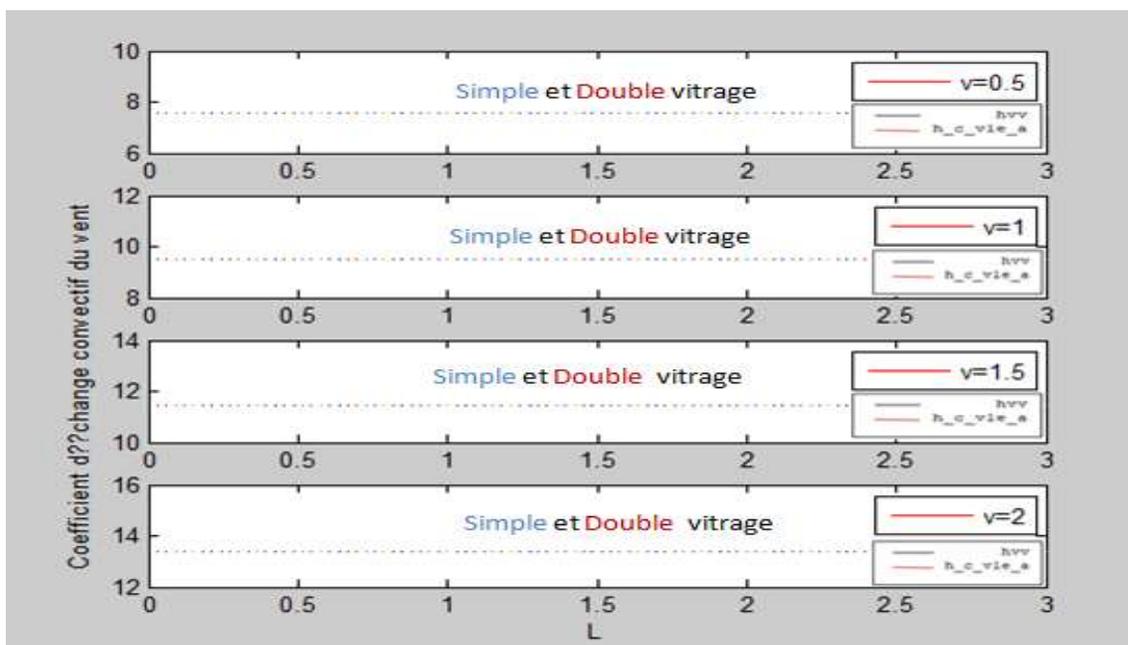
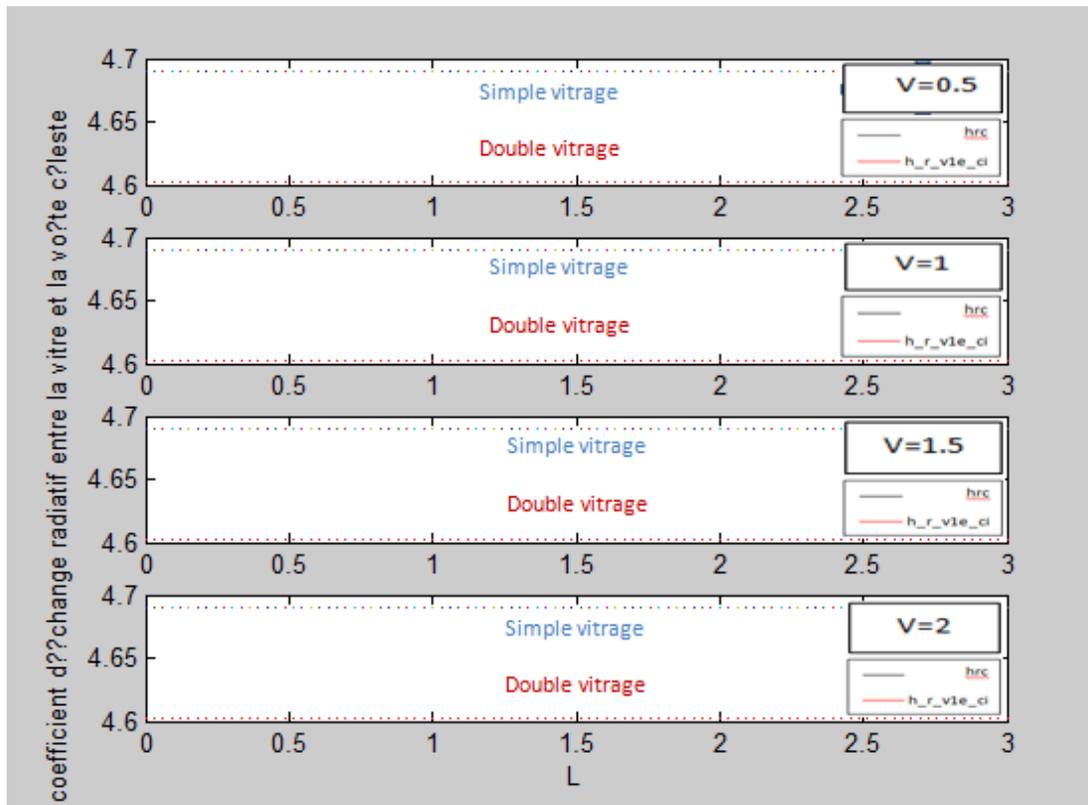


Figure. V.25. Variation d'échange convectif du vent.

Sur cette figure (**Figure. V.25**) est représentée la variation des échanges convectifs entre la vitre et l'extérieur en fonction de L. Un petit écart est remarqué.



**Figure. V.26.** Variation d'échange radiatif entre la vitre et la voûte céleste.

Cette figure (**Figure. V.26**) montre les échanges radiatifs entre la vitre et la voûte céleste en fonction de L pour différentes valeurs de la vitesse du vent. Un léger écart est constaté

#### V.4. Conclusion:

On remarque dans cette étude numérique que les paramètres de fonctionnement de ce type de système sont très sensibles aux différents paramètres extérieurs et que les pertes thermiques en simple vitrage sont supérieures à celle du double vitrage.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Les applications diverses de la chaleur issue des collecteurs solaires telles que le dessalement, le séchage des produits agroalimentaires et le chauffage des habitations ou de l'eau sanitaire, exigent des rendements élevés. Cette performance peut être atteinte en optimisant d'une part, les coefficients de transfert convectifs entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur et d'autre part, en réduisant les pertes thermiques à travers les différents composants du capteur solaire.

L'objectif de cette étude est d'étudier et de comprendre les principes des échanges thermiques qui ont lieu en évaluant les coefficients d'échanges thermiques ainsi que les pertes induites. Pour ce faire, nous avons mis en place un modèle numérique permettant de simuler le fonctionnement du capteur. Un programme de calcul a été écrit en langage MATLAB.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les pertes thermiques dans le cas du simple vitrage sont supérieures à celles d'un double vitrage.
- Le coefficient d'échange convectif dû au vent dans le cas du simple vitrage est légèrement supérieur à celui du double vitrage.
- Le coefficient d'échange convectif dans le cas du simple vitrage est légèrement supérieur que le cas du double vitrage.
- Le coefficient d'échange thermique radiatif est toujours égale dans les deux cas, quel que soit la température ambiante.

Pour vérifier et confirmer ces résultats, il faut faire une étude expérimentale sur le même thème ce qui était envisageable.

Enfin nous avons comparé l'efficacité du capteur à double vitrage et simple vitrage, en calculant leurs rendement basés sur les calculs des pertes thermiques dans deux cas.

# Références Bibliographiques

**Références Bibliographiques:**

- [1] **S. Souad**, «Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan». Mémoire de Magister (2010) 05-19.
- [2] **K, Aoues; N, Moumni; A, Moumni; M, Zellouf; A, Labeled; E, Echouri**. « Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air », Revue des Energies Renouvelables, Vol 11, N°2, p219-227. (2008).
- [3] **A, Labeled; N, Moumni; K, Aoués; M, Zellouf; A, Moumni**. « Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosités artificielles », Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [4] **T. Koyuncu**, "Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications", Renewable Energy, Vol.31, (1073–1088), 2006,
- [5] **BENKHELIFA Abdelaziz**, « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur». Mémoire de MASTER
- [6] **A. Meddas** , «Modélisation des paramètres de la Conversion thermiques de l'énergie solaire:». Mémoire de Magister-Université de Biskra 2015.
- [7] **A. Bouras** , « Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire». Mémoire de Magister-Université de Constantine 2007.
- [8] **H. Bentoumi**, «Etude numérique et expérimentale d'un capteur solaire thermique en Boussaâda». Mémoire de Master - Université de M'sila 2017.
- [9] **Z. Chibi** , « Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV». Mémoire de magister-Université de Tlemcen 2016.
- [10] **F.Kalla** , «Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire». Mémoire de Magister-Université de Batna 2014.
- [11] **D.ABABSA**, « Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives». Mémoire de magister-Université de Batna 2010.
- [12] **M.Amraoui** , « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité». Mémoire de Magister-Université de Tlemcen 2012.

- [13] **F.MEDJAOUI; S. BELABBACI** , « Etude expérimentale et conception d'un concentrateur cylindro-parabolique». Mémoire de Master -Université de Tlemcen 2018.
- [14] questions de physique autour de l'énergie solaire, [www.CEA.fr](http://www.CEA.fr)
- [15] **D.Halassa**, «Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air». Mémoire de Master - Université de Ouargla 2010-2011.
- [16] [www.ecosources.info/dossiers/Centrale\\_solaire\\_capteur\\_parabolique](http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_capteur_parabolique)
- [17] **M.Hammoumi ;H.Morghad**, «Étude Expérimentale d'un capteur solaire plan à air spécifique au séchage». Mémoire de Master - Université de Tlemcen 2013.
- [18] **N. Moummi** : « Energies renouvelables », Polycopie de cours- Université de Biskra 2020
- [19] **M.Noun**, «Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire». Mémoire de Master - Université de Annaba 2018.
- [20] **N. Nedjemeddine** , «Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique». Mémoire de Master - Université de Annaba 2018.
- [21] **M. Benfifi** , «Etude expérimentale de deux types de capteurs solaires plan et curviligne ». Mémoire de master - Université de Annaba 2018.
- [22] **N.Moummi**."Cours énergies renouvelables ".polycopie. Université de biskra 2020
- [23] **L. Bencherif** , «Effet du Modèle Double Vitrage sur les Performances d'un Capteur Solaire». Mémoire de Master - Université de Adrar 2018.

# Resumé

## Resumé:

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des phénomènes de transfert thermique dans les conduites passif et actif d'un capteur solaires plan à air. Les pertes thermiques calculées à partir du bilan des échanges sont responsables de l'efficacité du système. Le bilan nous a donné les équations permettant de calculer les coefficients d'échange et de pertes thermiques au niveau des différents composants. Le programme des calculs est écrit en langage MATLAB, Il nous a permis de simuler en faisant varier différents paramètres physiques liés au système et de calculer ces différents coefficients dans deux cas : simple vitrage et double vitrage.

**Mot clés:** Pertes, coefficients, transfert, bilan, simulation, air, solaire

## ملخص:

يتعلق العمل المقدم في هذه المذكرة بدراسة ظواهر النقل الحراري في القنوات الكامنة والفعالة على اللوح الشمسي الهوائي المسطح. حيث تعتبر الخسائر الحرارية المحسوبة من ميزان التبادل الحراري مسؤولة عن نجاعة النظام. كما انه يمنحنا هذا التوازن المعادلات التي تسمح بحساب معاملات التبادل والضياعات الحرارية على مستوى المكونات المختلفة. تمت كتابة برنامج الحساب بلغة الماتلاب، و لقد سمح لنا بالمحاكاة عن طريق تغيير المعلمات الفيزيائية المختلفة المرتبطة بالنظام وحساب هذه المعاملات المختلفة في حالتين: الزجاج الفردي والزجاج المزدوج.

**كلمات المفتاحية :** ضياعات, معاملات تحويل, توازن, محاكاة, هواء, شمسي.