



Université Saâd Dahlab, Blida-1

Faculté de Technologie



Département des Énergies Renouvelables

Option conversion thermique

Mémoire

De fin d'études pour l'obtention du diplôme de master

Thème :

Étude de l'effet de la taille et la position de l'orifice d'un absorbeur incliné d'un capteur solaire à air

Présenté par:

YAHY KHALIL

Soutenu devant le jury composé de :

| | | | |
|----------------|------------|--------|-----------|
| Pr M Merzouk | Professeur | USDB-1 | Président |
| Dr S Chaouchi | M-C-B | USDB-1 | Examineur |
| Dr K Khellalfa | M-C-B | USDB-1 | Examineur |
| Dr K Mehalaine | M-C-B | USDB-1 | Encadreur |

Septembre 2021

Résumé en arabe

تعمل دراسة مجمعات الهواء الشمسية على تحسين ادائها و تشغيلها. تقدم هذه المذكرة دراسة رقمية لتكوين جهاز ملتقط حراري به ممتص مائل مزود بفتحة. سيتم محاكاة تأثير تدفق الهواء بالاضافة الى اعدادات الفتحة و ذلك لتحديد التكوين المثالي للملتقط الشمسي

الكلمات المفتاحية

الطاقة الشمسية, المجمع الهوائي, المحاكاة الرقمية

Résumé en français

L'étude des capteurs solaires à air permet d'améliorer leurs performances et leur exploitation. Ce mémoire propose une étude numérique d'une configuration d'un capteur ayant un absorbeur incliné muni d'une fente. L'effet du débit d'air, ainsi que les paramètres de la fente seront simulés pour déterminer la configuration idéale.

Mots clés

Énergie solaire, capteur à air, simulation, CFD.

Abstract

Solar air collectors are studied in the goal of improving their performances and their operations. This thesis offers a computational study of a collector featuring an inclined absorber provided with a slit. The effect of the airflow, as well as the slot parameters will be simulated to determine the ideal configuration.

Keywords

Solar energy, air collector, computational study, CFD.

Dédicaces

*À la mémoire de ma mère qui stimule durant toute sa vie afin de me
voir toujours en succès et en réussite*

*À mon cher père qui n'a jamais cessé de m'encourager et de me
soutenir durant toute ma période des études*

À ma chère sœur SAOUSSEN

À ma grand-mère

À tout mes frères et mes sœurs et à toute ma famille

*À tous mes amis et mes collègues d'étude (Énergies renouvelables),
particulièrement ma promotion.*

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience afin de mener à son terme le présent travail.

Je tiens à remercier fortement Dr MEHALAINE KOCEILA qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines, ses conseils et sa constante disponibilité

Je remercie sincèrement, Dr LAFRI DJAMAL le chef de département des énergies renouvelables qui m'a beaucoup aidé pendant toute ma formation en graduation

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail

J'exprime mes sincères remerciements à tous mes enseignants pendant toute ma formation universitaire

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Nomenclature - Symboles - Acronymes

F_r : Facteur d'efficacité d'évacuation de la chaleur du capteur

T_a : La température ambiante. ($^{\circ}\text{C}$)

U_L : Le coefficient des pertes thermiques du collecteur solaire (W/m^2).

β : Inclinaison de capteur [Degré]

R_b : Coefficient de Conversion de l'éclairement direct

I_b : La composante d'éclairement directe. [W/m^2]

I_d : La composante d'éclairement diffusée. [W/m^2]

I_g : L'éclairement global [W/m^2]

ρ_s : Coefficient de réflexion de sol Albédo

CFC : la courbe de fréquence cumule

φ : latitude de lieu. [Degré]

ω : Angle horaire. [Degré]

θ : angle d'incidence. [Degré]

δ : déclinaison. [Degré]

h : Hauteur de soleil. [Degré]

k_t : Indice de clarté

j : Nombre de jours dans l'année

L : longitude.[Degré]

a : azimute.[Degré]

σ : la fraction d'insolation.

I_{β} : l'éclairement sur le plan incliné [W/m^2]

Q : flux de chaleur.[W]

Q_u : puissance utile.[W]

Q_p : pertes globales. [W]

h : coefficient d'échange convectif.[$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

λ : la conductivité thermique.[$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

e : l'épaisseur.[m]

A : la surface du capteur [m^2]

η_{ins} : Le rendement instantané.

Fr : facteur de conductance.

τ_{α} : Produit efficace de la transmittance et de l'absorbance du collecteur

ρ : Masse volumique.[kg.m^{-3}]

u, v : Composantes de la vitesse

x, y: coordonnées cartésiennes

T:température.[K]

t: temps.[S]

μ : Viscosité dynamique[$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$]

Cp: Chaleur spécifique.[$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

Pe : nombre de PECLET.

Et : équation de temps.[S]

TSV : temps solaire vrai.[S]

TU : temps universel.[S]

GMT : Greenwich Méridien moyen.

TSM : temps solaire moyen.[S]

CDER : Centre de développement des énergies renouvelables

h_{cpv} : le coefficient de transfert de chaleur entre la plaque et le vitrage [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

h_{rpv} : le coefficient de transfert de chaleur entre la plaque et le vitrage [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

h_{rvc} : le coefficient de transfert de chaleur entre le vitrage et le ciel [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

h_w : le coefficient de transfert de chaleur entre la plaque et le vitrage [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

Nu : le nombre de Nusselt

Gr : le nombre de grashoft

Pr : le nombre de Prandtl

Sommaire

RESUME

DEDICACES

REMERCIEMENTS

NOMENCLATURE

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 3 |
| I.1. INTRODUCTION | 3 |
| I.2. INTERET POUR L'ENERGIE RENOUVELABLE | 3 |
| I.3. ÉVOLUTION DES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES | 6 |
| I.4. LE CAPTEUR SOLAIRE A AIR | 7 |
| I.4.1. Fonctionnement d'un capteur solaire air..... | 7 |
| I.4.2. Les éléments constitutants du capteur à air | 8 |
| I.4.3. Types des capteurs solaires à air | 11 |
| I.4.4. Applications des capteurs solaires plans à air | 13 |
| I.5. RESULTATS OBTENUS PAR CERTAINS CHERCHEURS | 15 |
| I.5.1. Minimisation des pertes thermiques | 16 |
| I.5.2. Influence de la géométrie de l'absorbeur | 17 |
| I.5.3. Adjonction de chicanes | 18 |
| I.5.4. Adjonction de rugosités artificielles | 21 |
| I.5.5. Capteur utilisant un lit sous forme de treillis métallique | 22 |
| I.5.6. capteur solaire à doubles passes sans et avec un milieu poreux | 23 |
| I.6. CONCLUSION | 24 |
| CHAPITRE II : ÉTUDE THEORIQUE | 25 |
| II.1. INTRODUCTION | 25 |
| II.2. GISEMENT SOLAIRE | 25 |
| II.2.1. Le Soleil..... | 25 |
| II.2.2. La terre | 26 |
| II.2.3. Mouvement de la Terre autour du soleil..... | 27 |

| | |
|--|-----------|
| II.2.4. Calcul de la position du soleil | 27 |
| II.2.5. Évaluation du flux solaire..... | 35 |
| II.2.6. Modèles d'estimation de l'éclairement solaire: | 36 |
| II.2.7. Conversion de l'énergie solaire..... | 39 |
| II.2.8. Moyenne mensuelle et annuelle de l'irradiation globale | 41 |
| II.3. MODELISATION DU CAPTEUR A AIR..... | 42 |
| II.3.1. Description du système de l'étude | 42 |
| II.3.2. Les paramètres radiatifs..... | 43 |
| II.3.3. Bilan thermique..... | 43 |
| II.3.4. Le rendement | 47 |
| II.4. MODELISATION MATHEMATIQUE DES ECOULEMENTS..... | 47 |
| II.4.1. Les hypothèses simplificatrices..... | 47 |
| II.4.2. Les équations gouvernantes | 48 |
| II.4.3. Conditions initiales et conditions aux limites | 48 |
| II.5. PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES DIFFERENTS COMPOSANTS DU CAPTEUR..... | 49 |
| II.5.1. Propriétés thermophysiques de l'air | 50 |
| II.5.2. Propriétés de la vitre..... | 50 |
| II.5.3. Propriétés de l'absorbeur | 50 |
| II.5.4. Propriétés de l'isolation | 51 |
| II.6. CONCLUSION | 51 |
| CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE DU SYSTEME..... | 52 |
| III.1. INTRODUCTION..... | 52 |
| III.2. LE CALCUL NUMERIQUE (MODELISATION ET SIMULATION)..... | 52 |
| III.2.1. Principe du calcul numérique | 52 |
| III.2.2. Rappel sur la méthode des volumes finis (MVF) | 53 |
| III.3. LES DIFFERENTES ETAPES DE L'APPROCHE NUMERIQUE..... | 59 |
| III.3.1. Présentation du logiciel Gambit..... | 59 |
| III.3.2. Présentation du code fluent | 61 |
| III.4. CREATION DU MAILLAGE ADOPTE POUR LES CALCULES PAR GAMBIT..... | 61 |
| III.4.1. Position du problème..... | 62 |
| III.4.2. Génération du maillage | 62 |
| III.4.3. Étude d'indépendance du maillage | 63 |
| III.5. CONCLUSION | 63 |
| CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS..... | 64 |
| IV.1. INTRODUCTION | 64 |
| IV.2. ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE VITRAGE..... | 64 |

| | |
|--|----|
| IV.3. VERIFICATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX | 66 |
| IV.4. INFLUENCE DE LA POSITION DE LA FENTE | 67 |
| IV.4.1. La fente en haut | 67 |
| IV.4.2. La fente au milieu | 70 |
| IV.4.3. La fente en bas..... | 72 |
| IV.5. INFLUENCE DE LA TAILLE DE LA FENTE..... | 75 |
| IV.5.1. Augmentation de la taille de la fente | 75 |
| IV.5.2. Réduction de la taille de la fente..... | 77 |
| IV.5.3. Détermination de la taille optimale..... | 79 |
| IV.6. INFLUENCE DU DEBIT | 80 |
| IV.6.1. Mode libre | 80 |
| IV.6.2. Mode forcé | 82 |
| IV.6.3. Comparaison..... | 84 |
| IV.7. CONCLUSION..... | 84 |

Bibliographie et Webographie

Liste des figures

Chapitre 1

| | |
|---|----|
| FIGURE I- 1 : CAPTEUR SOLAIRE A AIR [31]..... | 7 |
| FIGURE I- 2 : UNE COUPE SUR CAPTEUR SOLAIRE PLAN [17]..... | 8 |
| FIGURE I- 3 : TYPES D' ABSORBEUR PERMEABLE | 12 |
| FIGURE I- 4 : PRINCIPALES GEOMETRES D' ABSORBEUR | 13 |
| FIGURE I- 5 : CHAUFFAGES ET CLIMATISATION DES HABITATIONS | 13 |
| FIGURE I- 6 : SECHAGE SOLAIRE [22, 23] | 15 |
| FIGURE I- 7 : CONCEPTION DES CAPTEURS A AEROGEL DE SILICE..... | 16 |
| FIGURE I- 8 : REPRESENTATION DES TROIS CONFIGURATIONS DE CAPTEURS[31] | 18 |
| FIGURE I- 9 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL | 19 |
| FIGURE I- 10 : CAPTEUR PLAN A AIR MUNI DE RUGOSITES CYLINDRIQUES | 20 |
| FIGURE I- 11 : LES DIFFERENTS ARRANGEMENTS DES CHICANES CYLINDRIQUES | 20 |
| FIGURE I- 12 : SCHEMA REPRESENTATIF DES OBSTACLES RECTANGULAIRES PERPENDICULAIRES A L'ECOULEMENT | 21 |
| FIGURE I- 13 : SCHEMA D'UN CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE QUI SE BASE SUR L'UTILISATION D'UN LIT SOUS FORME | 22 |
| DE TREILLIS METALLIQUES COMME MATERIEL D'EMBALLAGE | 22 |
| FIGURE I- 14 : LE SCHEMA D'UN CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE A DOUBLES PASSES AVEC DES MILIEUX POREUX DANS..... | 23 |
| LE DEUXIEME CANAL | 23 |

Chapitre 2

| | |
|---|----|
| FIGURE II- 1 : STRUCTURE DU SOLEIL EN COUPE | 26 |
| FIGURE II- 2 : SCHEMATISATION DES MOUVEMENTS DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL[4]..... | 27 |
| FIGURE II- 3 : LES COORDONNEES TERRESTRES D'UN LIEU DONNE | 28 |
| FIGURE II- 4 : SCHEMA QUI MONTRE L' ANGLE D' INCLINAISON DANS UN CAPTEUR THERMIQUE..... | 28 |
| FIGURE II- 5 : LES COORDONNÉES ÉQUATORIALES. | 29 |
| FIGURE II- 6 : LA DECLINAISON..... | 30 |
| FIGURE II- 7 : LES COORDONNEES HORIZONTALES D'UN ASTRE..... | 31 |
| FIGURE II- 8 : LES COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE [3] | 35 |
| FIGURE II- 9 : LA GEOMETRIE D'UN PLAN INCLINE D'UN ANGLE θ PAR RAPPORT A L' HORIZONTALE.[3] | 38 |
| FIGURE II- 10 : UTILISATION DIRECTE DE L'ENERGIE SOLAIRE [15]..... | 41 |
| FIGURE II- 11 : MOYENNE ANNUELLE DE L'IRRADIATION GLOBALE REÇUE SUR UNE SURFACE HORIZONTALE, PERIODE 1992-2002 [Wh/m ²] [14]. | 41 |

| | |
|--|----|
| FIGURE II- 12 : CAPTEUR A AIR DE CONFIGURATION C [31] | 42 |
| FIGURE II- 13 : SCHEMA REPRESENTATIF DU BILAN THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE | 43 |
| FIGURE II- 14 : LES CONDITIONS AUX LIMITES | 49 |

Chapitre 3

| | |
|---|----|
| FIGURE III- 1 : LE PRINCIPE DU CALCUL NUMERIQUE. | 53 |
| FIGURE III- 2 : SCHEMA D'UN MAILLAGE [22] | 55 |
| FIGURE III- 3 : LA FONCTION A (P) POUR DIFFERENTS SCHEMAS [25]..... | 57 |
| FIGURE III- 4 : PANELS GENERAUX DU LOGICIEL GAMBIT..... | 60 |
| FIGURE III- 5 : EXEMPLE DE MAILLAGE..... | 60 |
| FIGURE III- 6 : VUE GLOBALE DE FLUENT. | 61 |
| FIGURE III- 7 : LA GEOMETRIE DE NOTRE PROBLEME | 62 |
| FIGURE III- 8 : CONDITIONS AUX LIMITES IMPOSEES SUR GAMBIT..... | 62 |

Chapitre 4

| | |
|--|----|
| FIGURE IV- 1 : EXEMPLE DU TRACE DES RESIDUS D'UNE SESSION DE CALCUL | 66 |
| FIGURE IV- 2 : COMPARAISON ENTRE LES TEMPERATURES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES | 66 |
| FIGURE IV- 3 : SCHEMA DE LA FENTE EN HAUT | 67 |
| FIGURE IV- 4 : CONTOUR DE TEMPERATURE DE LA FENTE EN HAUT..... | 68 |
| FIGURE IV- 5 : CONTOUR DES VITESSES POUR LA FENTE EN HAUT | 69 |
| FIGURE IV- 6 : TEMPERATURE DE SORTIE DE LA FENTE EN HAUT..... | 69 |
| FIGURE IV- 7 : SCHEMA DE LA FENTE AU MILIEU | 70 |
| FIGURE IV- 8 : CONTOUR DE TEMPERATURE DE LA FENTE AU MILIEU | 70 |
| FIGURE IV- 9 : CONTOUR DES VITESSES POUR LA FENTE AU MILIEU..... | 71 |
| FIGURE IV- 10 : PROFILE DE TEMPERATURES DE SORTIE | 71 |
| FIGURE IV- 11 : SCHEMA DE LA FENTE EN BAS | 72 |
| FIGURE IV- 12 : CONTOUR DE TEMPERATURE DE LA FENTE EN BAS | 73 |
| FIGURE IV- 13 : CONTOUR DES VITESSES POUR LA FENTE EN BAS | 73 |
| FIGURE IV- 14 : PROFILE DE TEMPERATURES DE SORTIE DE LA FENTE EN BAS | 74 |
| FIGURE IV- 15 : COMPARAISON DES TEMPERATURES DE SORTIE POUR LES TROIS CAS | 74 |
| FIGURE IV- 16 : CONTOUR DE TEMPERATURE CAS DE LA TAILLE X2 | 75 |
| FIGURE IV- 17 : CONTOURS DES VITESSES CAS DE LA TAILLE X2..... | 76 |
| FIGURE IV- 18 : COMPARAISON DES TEMPERATURES CAS DE L' AUGMENTATION DE LA SECTION | 76 |
| FIGURE IV- 19 : CONTOUR DE TEMPERATURE POUR LE CAS DE LA TAILLE DE LA FENTE PAR 2..... | 77 |
| FIGURE IV- 20 : CONTOUR DES VITESSES CAS DE LA TAILLE DE LA FENTE PAR 2..... | 78 |
| FIGURE IV- 21 : COMPARAISON ENTRE LES TEMPERATURES DE SORTIE CAS DE REDUCTION DE LA FENTE..... | 78 |
| FIGURE IV- 22 : COMPARAISON DES PROFILE DES TEMPERATURE POUR LES MEILLEURS CAS..... | 79 |
| FIGURE IV- 23 : CONTOUR DE TEMPERATURE POUR LE MODE LIBRE | 80 |
| FIGURE IV- 24 : CONTOUR DES VITESSES POUR LE MODE LIBRE..... | 81 |

| | |
|---|----|
| FIGURE IV- 25 : PROFILE DE TEMPERATURE DE SORTIE POUR LE MODE LIBRE | 81 |
| FIGURE IV- 26 : CONTOURS DES TEMPERATURES POUR UNE VENTILATION FORCEE | 82 |
| FIGURE IV- 27 : CONTOURS DES VITESSES POUR UNE VENTILATION FORCEE | 83 |
| FIGURE IV- 28 : COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES VENTILATIONS..... | 84 |

Liste des tableaux

Chapitre 1

| | |
|---|----|
| TABLEAU I-1 : PROPRIETES DES MATERIAUX POUR LE CHOIX DE L'ABSORBEUR | 8 |
| TABLEAU I-2 : PROPRIETES DES MATERIAUX DU VITRAGE..... | 9 |
| TABLEAU I-3 : PROPRIETES DES MATERIAUX DE L'ISOLATION | 11 |

Chapitre 2

| | |
|--|----|
| TABLEAU II-1 : NUMERO DU JOUR DE L'ANNEE..... | 30 |
| TABLEAU II-2 : VALEURS DES COEFFICIENTS EN FONCTION DE LA QUALITE DU CIEL[3] | 37 |
| TABLEAU II-3 : PARAMETRES RADIATIFS..... | 43 |
| TABLEAU II-4 : PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DE L' AIR | 50 |
| TABLEAU II-5 : PROPRIÉTÉS DE LA VITRE..... | 50 |
| TABLEAU II-6 : PROPRIÉTÉS DE L'ABSORBEUR..... | 50 |
| TABLEAU II-7 : PROPRIÉTÉS DE L'ISOLATION | 51 |

Chapitre 3

| | |
|---|----|
| TABLEAU III-1 : A (P) POUR DIFFÉRENTS SCHÉMAS..... | 56 |
| TABLEAU III-2 : LES TEMPERATURES DE SORTIE EN FONCTION DU NOMBRE DES NŒUDS..... | 63 |

Chapitre 4

| | |
|---|----|
| TABLEAU IV-1 : TEMPERATURE DU VITRAGE | 64 |
| TABLEAU IV-2 : L'ECLAIREMENT NET | 65 |

Introduction générale

La terre comporte plusieurs sources d'énergie qui sont toutes, mis à part l'énergie nucléaire, d'origine solaire. Le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le bois ont été à l'origine produits par des processus photosynthétiques. Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante [1].

L'augmentation brutale du prix du pétrole a conduit, l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelable. D'autre part, l'échauffement climatique causé par l'émission des gaz à effets de serre a conduit beaucoup de pays à s'intéresser à des énergies propres.

L'énergie solaire permet de réduire la « dépendance énergétique » d'un pays et d'éviter les atteintes à l'environnement occasionnées par les sources d'énergie conventionnelles. Les techniques pour tirer profit de l'énergie solaire ont été grandement améliorées, aujourd'hui il y a plusieurs millions de m² de capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes [1].

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière.

Un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur à air qui peut être utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, le séchage des produits agricoles, le séchage du bois, le séchage des briques, etc.

L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur a été peu entreprise vu ses faibles caractéristiques de transfert de chaleur. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui a l'ambition de déterminer un certain nombre de paramètres de dimensionnement d'un système de captation utilisant l'air. L'étude numérique présentée concerne un capteur solaire plan à air dont nous allons vérifier les performances vis-à-vis du débit d'air et de certaines propriétés de l'absorbeur.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique incluant les concepts fondamentaux, les principales définitions et les notions indispensables pour notre thème puis une synthèse bibliographique sur les différents travaux réalisés dans ce domaine est développée en fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre comprend les généralités et les définitions en relation avec l'énergie solaire et son exploitation ainsi que les formulations mathématiques adoptées pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur de l'air dans le conduit du capteur solaire à air.

Le troisième chapitre comprend un petit rappelle sur la méthode des volume finis et ces étapes de discrétisation ainsi une présentation des logiciels du code de calcul FLUENT et Gambit.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation du capteur solaire à air sous FLUENT suivie d'une interprétation des résultats et discussion.

En fin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale et une annexe.

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Introduction

Le capteur solaire est l'élément principal de la plupart des systèmes solaires. C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur.

Plusieurs études ont été réalisées par les chercheurs à travers le monde pour améliorer les performances des capteurs et dont l'objectif principal étant de collecter le maximum d'énergie solaire

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents capteurs utilisés et les différents paramètres et caractéristiques du capteur solaire plan à air pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux ou pour le séchage. Enfin on présentera quelques études et modifications faites sur les capteurs réalisées par certains chercheurs.

I.2. Intérêt pour l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limites de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres »

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes:

- **Énergie éolienne**

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes.

- **Énergie hydraulique**

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité.

- **Biomasse**

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales :

Le bois, le biogaz et les biocarburants.

- **Géothermie**

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité.

- **Énergie solaire**

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, par utilisation des capteurs solaires thermiques.

Il existe plusieurs types de capteurs thermiques leur objectif principal est de convertir les rayons solaires qu'ils reçoivent en chaleur utilisable. On cite parmi eux:

- Les capteurs plans non vitrés

Sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire [18]

- Les capteurs plans vitrés

Ce type de capteurs peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants

- Le capteur à tubes sous vide

Il permet de satisfaire aux applications nécessitant des niveaux de température plus importants. Il se trouve dans des applications industrielles, mais pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, il se trouve aussi dans l'habitat individuel et collectif.[4]

- Le capteur cylindro-parabolique

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.

- Le capteur CPC

le CPC (Compound Parabolic Concentrator) est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques". Les réflecteurs CPC ont une géométrie qui permet au rayonnement solaire direct et diffus d'atteindre l'absorbeur, car la surface de l'absorbeur est cylindrique couvrant la totalité de la surface du tube intérieur. Ainsi, la partie face au soleil peut capter le rayonnement direct et la partie cachée peut capter le rayonnement par réflexion.

Les capteurs plans sont très répandus dans le monde à cause de leurs simplicités et leurs coûts par rapport aux autres types de capteurs.

Il existe deux types de capteurs plans: les capteurs a eau qui utilisent l'eau comme fluide caloporteur et les capteurs a air qui utilisent l'air.

L'air étant un fluide caloporteur moins performant que l'eau, mais les capteurs à air reste toujours très important vu les nombreux avantages qu'ils présentent et leurs différentes applications comme le séchage, le chauffage et la climatisation des locaux

I.3. Évolution des capteurs solaires thermiques

Vers 212 ans avant Jésus Christ, Archimède avait conçu une méthode de production de chaleur à l'aide de miroirs métalliques. En 1615, Salomon de Gaus construit une pompe solaire, utilisant de l'air chauffé avec le rayonnement solaire.

En 1780 l'effet de serre est mis en évidence par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires. Comme beaucoup de filières d'énergies renouvelables, le solaire thermique connaît une phase de croissance importante entre 1973 et 1985 en réaction au choc pétrolier. Mais ce développement rapide, avec des technologies ou des installateurs déficients, a entraîné de nombreuses contre-performances.

À la fin du 18ème siècle, Lavoisier construit un four solaire qui atteint la température de 1800 °C. Pour cela, il concentre les rayons solaires à l'aide d'une lentille à liquide. En 1816, Robert Stirling invente le "moteur à air chaud" (appelé aujourd'hui "moteur Stirling"), à 4 temps qui a révolutionné l'industrie.

Au cours du 19ème siècle, Augustin Mouchot met au point de nombreuses inventions : pasteurisation solaire, distillation solaire, cuisson solaire, pompage solaire, concentrateur parabolique alimentant des machines thermiques. Il a mis en place un réflecteur de 5 mètres de diamètre associé à une machine à vapeur qui actionne une presse d'imprimerie. En 1910, Franck Shuman construit une centrale thermosolaire à taille industrielle et c'est à la fin du 20ème siècle que sont lancés diverses centrales et fours solaires à concentration après 5 différents prototypes, de même, de 1984 à 1991, de nombreuses centrales à miroirs cylindro-paraboliques sont apparues.

Plusieurs applications industrielles telles que le dessalement de l'eau de mer, la production énergie, séchage..., ont vu le jour dans plusieurs pays lors de ses 50 dernières années grâce aux collecteurs solaires. [16].

I.4. Le capteur solaire a air

Contrairement au capteur à eau ou le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en général formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeur plus faibles que celui de l'eau.



Figure I- 1 : Capteur solaire a air [31]

I.4.1. Fonctionnement d'un capteur solaire air

Considéré comme élément essentiel chargé de capter et de transformer l'énergie, le capteur solaire utilise l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre 0,3 et 3 μm), il traverse la vitre et est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante. L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est partiellement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne vers la surface absorbante.

Ce cycle interactif permet d'élever la température de la couverture transparente et de l'absorbeur.

Un échange par convection permet au fluide caloporteur de collecter une partie de cette énergie absorbée qui contribue à une élévation de température le long de son parcours dans le capteur. Cette énergie sera par la suite transportée vers des installations pour usage.

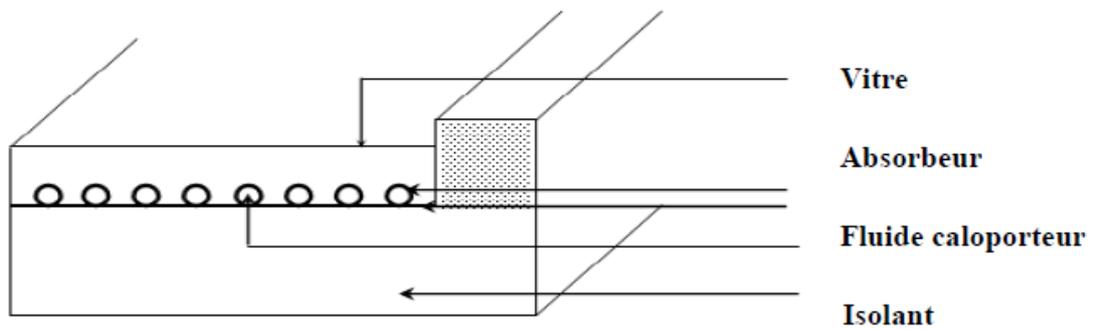


Figure I- 2 : Une coupe sur capteur solaire plan [17]

I.4.2. Les éléments constitutants du capteur à air

I.4.2.1. Absorbeur

Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes. En général, l'absorbeur n'est qu'une plaque plane en métal dont la couche superficielle donnant sur le soleil, doit être dotée d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95.

L'absorbeur doit assurer les fonctions suivantes [21]

- ✓ Absorber les plus grandes parties du rayonnement incident.
- ✓ Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.

Tableau I-1 : Propriétés des matériaux pour le choix de l'absorbeur [4]

| Métal | Conductivité thermique (w/m.k) | Chaleur massique (j/kg.k) | Masse volumique (kg/m ³) | Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| Cuivre | 334 | 398 | 89 | 108 |
| Acier inoxydable | 14 | 460 | 78 | 4 |
| Aluminium | 204 | 879 | 27 | 86 |

I.4.2.2. Couverture transparente

La couverture a une fonction de protection mécanique de l'absorbeur, mais elle joue également un rôle important dans le bilan thermique en réduisant la chaleur des:

- ✓ Échanges convectifs dont l'importance est en fonction de l'épaisseur de la lame d'air ou du gaz situé entre l'espace couverture – absorbeur.[20].
- ✓ Échanges radiatifs par création de l'effet de serre, c'est-à-dire bonne transparence et faible transmission du rayonnement infrarouge par l'absorbeur. La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de température ainsi qu'aux températures élevées. Elle doit être facile à mettre en œuvre et présenter un faible coefficient de dilatation et de flexibilité.

Tableau I-2 : Propriétés des matériaux du vitrage [4]

| Matériaux | Facteur de transmission solaire (%) | Masse volumique (kg/m ³) | Chaleur massique (j/kg.k) | Conductivité thermique (w/m.k) | Dilatation thermique (10 ⁻⁵ k ⁻¹) |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|
| Verre | 85-92 | 2700 | 840 | 0.93 | 0.9 |
| Polycarbonate | 82-89 | 1200 | 1260 | 0.2 | 6.6 |
| Poly méthacrylate | 89-92 | 1200 | 1460 | 0.2 | 7 |
| Polyster armé | 77-90 | 1400 | 1050 | 0.21 | 3.5 |
| Poly terephlatate ethylene | 84 | 1.38 | 1170 | 0.25 | 7 |
| Polyfluoréthnopolylene | 97 | 2.15 | 1170 | 0.25 | 10 |
| Polyflurure vinyle | 93 | 1.5 | 1380 | 0.12 | 4 |

I.4.2.3. Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau, des mélanges eau glycol sont aussi employés à cause des conditions climatiques, ces mélanges ont une chaleur spécifique inférieure à celle de l'eau pure. Par rapport à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel à l'hiver ou d'ébullition à

l'été et il n'a pas de problème de corrosion. Néanmoins l'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux et les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

D'autre part, quel que soit le système, le contact entre les tuyaux véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime, soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement entre les tuyaux devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tuyau et de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés. Les tuyaux de circulation du fluide en contact avec l'absorbeur seront de préférence placés en parallèle plutôt qu'en serpent.

I.4.2.4. L'isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, par convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes:

✧ Partie avant de l'absorbeur

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [17].

✧ Parties arrière et latérale

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolants qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres, car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

Le choix du matériau à utiliser dépend de [4] :

- ✓ Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- ✓ La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- ✓ La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu a l'eau de pluie... etc.

Tableau I-3 : Propriétés des matériaux de l'isolation [4]

| Matériaux | Conductivité thermique (w/m.k) | Masse volumique (kg/m ³) | Chaleur massique (j/kg.k) | Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s) |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--|
| Air (à 20°C) | 0.025 | 1.2 | 1003 | 208 |
| Mousse de polyuréthane | 0.029 | 30 | 1600 | 6 |
| Laine de verre | 0.036 | 40 | 840 | 10.7 |
| Polystyrène expansé | 0.040 | 20 | 1500 | 13.3 |
| Papier journal comprimé | 0.105 | 130 | 1340 | 6 |
| Bois de pain | 0.318 | 500 | 1210 | 1.95 |
| Plâtre | 0.35 | 800 | 800 | 5.5 |

I.4.2.5. Le coffre

Le coffre est fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques. [19]

I.4.3. Types des capteurs solaires à air

On peut répartir les types des capteurs solaires plans à air en 3 grandes classes :

- Les capteurs à absorbeur plan
- Les capteurs à absorbeur perméable ;
- Les capteurs à absorbeur à géométrie variable.

I.4.3.1. Capteurs à absorbeur plan

L'absorbeur est une tôle plane. Plusieurs types d'écoulement d'air sont envisageables dans ce genre de capteur [26] :

- Écoulement au-dessus de l'absorbeur,
- Écoulement en dessous de l'absorbeur,

- Écoulement des deux côtés de l'absorbeur (multipasses).

I.4.3.2. Les capteurs à absorbeur perméable

Dans ce type de capteur, l'absorbeur est une matrice perméable. Ainsi l'énergie solaire incidente pénètre dans la masse de l'absorbeur.

Le capteur à absorbeur perméable se compose toujours d'un caisson isolé. Dans ce type de capteur, l'air pénètre dans l'espace vitre absorbeur où il commence à s'échauffer par convection sous le vitrage. Ensuite l'air continue de s'échauffer par passage dans la matrice absorbante[27]

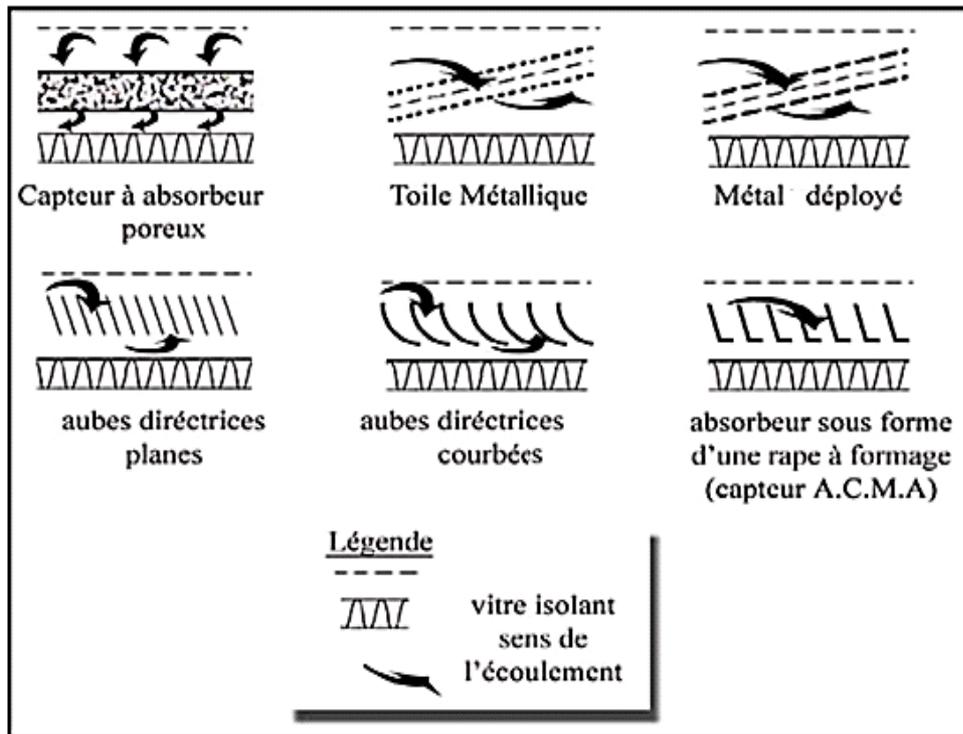


Figure I- 3 : Types d'absorbeur perméable

I.4.3.3. Capteurs à absorbeur à géométrie variable

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes, l'idée principale consiste à jouer sur la géométrie de l'absorbeur de façon à augmenter la surface d'échange [27]

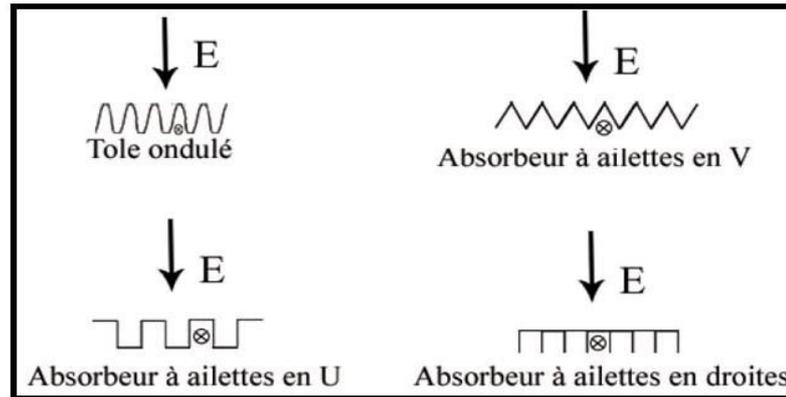


Figure I- 4 : Principales géométries d'absorbeur

I.4.4. Applications des capteurs solaires plans à air

Plusieurs applications de l'énergie solaire captée par des capteurs solaires plans à air sont utilisées. Parmi les plus répandues, le chauffage, la climatisation, le séchage, la production de l'énergie mécanique, etc.

I.4.4.1. Chauffages et climatisation des habitations

Le principe est présenté sur la Figure 12, consiste à chauffer le fluide dans le capteur solaire, l'air est véhiculé par le ventilateur vers des points d'utilisations.

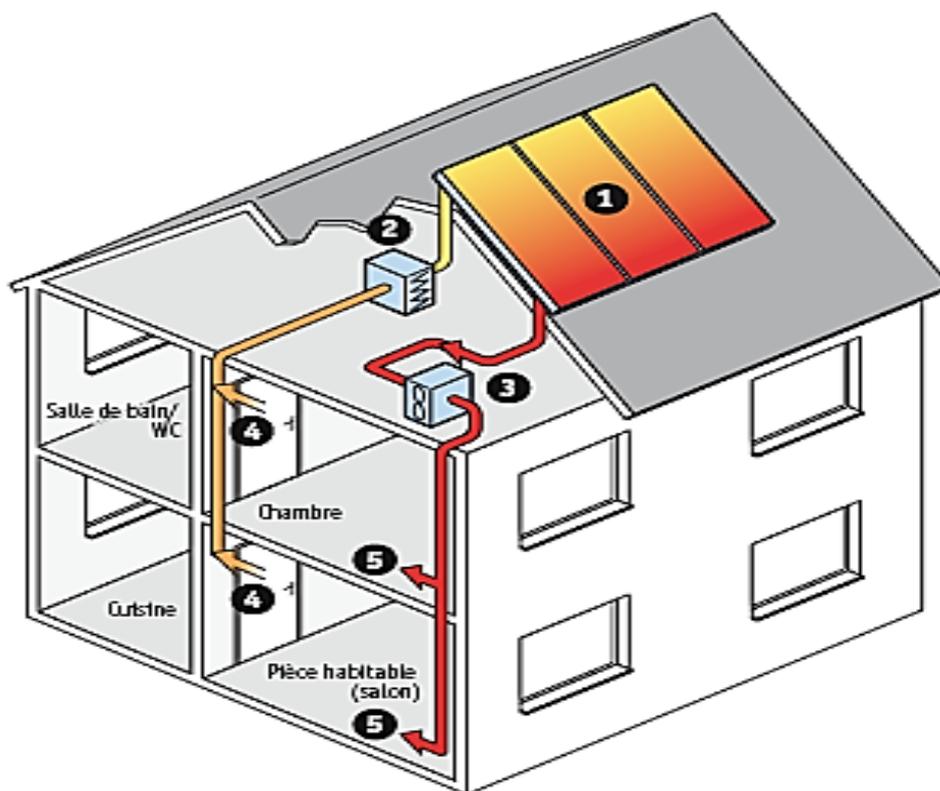


Figure I- 5 : Chauffages et climatisation des habitations

1- Capteur solaire plan à air 2- Filtre 3- Ventilateur 4- Entrées d'air. 5- Sorties d'air
Le système de capteur solaire à air s'intègre dans l'habitat de façon modulaire et complète les systèmes de chauffage existants. Il permet de réaliser des économies substantielles d'énergie et d'améliorer le bilan thermique des bâtiments sur la période hivernale et en mi-saison en apportant une source complémentaire de chauffage. Une régulation fait circuler l'air des locaux à travers le panneau dès que la température interne du panneau permet d'obtenir un gain significatif.

I.4.4.2. Séchage

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur. Plusieurs techniques sont possibles pour sécher et conserver nos produits.

La technique de séchage courante est généralement réalisée sur sol, elle est la plus utilisée dans les pays en voie de développement afin de préserver les denrées alimentaires, telles que les céréales, les légumes, la viande et le poisson, etc. Le taux de séchage est contrôlé par des facteurs externes, tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative, et des facteurs internes, tels que la teneur en eau initiale, le type des produits et la masse du produit par unité de surface d'exposition. Il y a des avantages considérables dans le séchage solaire hybride puisque la source d'énergie nécessaire est renouvelable. [22, 23]

Le but du séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaire jusqu'à des valeurs résiduelles inhibant le développement de tout micro-organisme permettant ainsi leur stockage dans des conditions ambiantes.

Le développement scientifique et technologique a permis de diversifier et de mettre en œuvre plusieurs méthodes de séchage et plusieurs séchoirs [22, 23]. L'utilisation des capteurs solaires à air pour le séchage des récoltes est idéale dans le cas du thé, du café, des fruits, des fèves, du riz, des épices, du caoutchouc, du cacao et du bois.



Figure I- 6 : Séchage solaire [22, 23]

I.4.4.3. Production de l'énergie mécanique

Dans les pays arides, ou dans les régions isolées, il peut être très intéressant de réaliser des installations à partir d'une machine solaire, soit pour pomper l'eau, soit pour une production d'électricité. On peut utiliser un moteur à air chaud dont le principe est le suivant: l'air atmosphérique est comprimé dans un cylindre par un piston et chauffé par l'intermédiaire d'un capteur à air. L'air chauffé, en se détendant, pousse le piston. Celui-ci en revenant comprime l'air dont le reste de chaleur est évacué à une source froide ; et ainsi de suite.

I.5. Résultats obtenus par certains chercheurs

En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur, il est intéressant à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique. Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Il existe une gamme étendue de capteurs solaires à air avec différentes dispositions de l'absorbeur[30]

I.5.1. Minimisation des pertes thermiques

Dans le but de minimiser les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, Feyza Benyelles et al ont proposé de placer un isolant " aérogel de silice " au-dessus de l'absorbeur. Les auteurs ont choisi l'aérogel de silice pour ses propriétés. C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270 kg/m³, transparent, poreux (porosité de 35% à 90%). Son indice de réfraction est compris entre 1.2 à 1.05. Pour une épaisseur de l'ordre de 20 mm, la transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02 W/m. K [28].

Plusieurs capteurs dans les mêmes conditions expérimentales ont été comparés:

- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.
- Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice

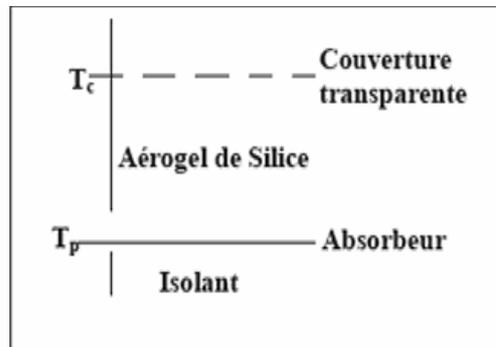


Figure I- 7 : Conception des capteurs à aérogel de silice

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20 °C pour un absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire.

Le capteur à air étudié dans cet article est un insolateur à simple passe entre l'absorbeur et la vitre. Une analyse des échanges thermiques instationnaires dans un tel capteur est présentée. S. OUDJEDI a montré qu'en régime quasi stationnaire les équations de bilan thermique des composants du capteur cascaded en une équation différentielle ordinaire de premier ordre, qui à elle seule régit le comportement thermique du capteur. La solution de cette équation différentielle est écrite sous la forme d'une expression explicite de la température locale du fluide caloporteur en fonction du flux solaire variable dans le temps. L'influence de divers paramètres tels que la température d'entrée du fluide, sa vitesse et la hauteur du canal d'écoulement d'air sur les performances thermiques du capteur solaire à air est aussi étudiée [29].

I.5.2. Influence de la géométrie de l'absorbeur

F. Mokhtari, D. Semmar, A. Hamid (2001) [31] ont fait une étude expérimentale sur les capteurs solaires à air, leur objectif est d'évaluer l'effet de la plaque absorbante sur la température de sortie du fluide caloporteur. C'est-à-dire le coefficient d'échange par convection, pour cela ils ont étudié trois configurations de capteurs solaires à air. Voir la figure(I-8)

La première configuration (a) est la plus simple, elle a un passage d'air sous l'absorbeur qui est en tôle peinte en noir ($\alpha=0.95$), la couverture est un vitrage de (0.03 m).

La deuxième configuration (b) est constituée des mêmes éléments que la première configuration, seulement le passage d'air se trouve au-dessus de la plaque absorbante (entre le vitrage et la plaque absorbante).

La troisième configuration (c) est constituée des mêmes éléments que la première configuration, seulement 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 de section rectangulaire de (150 x 600 mm). Pour permettre l'évacuation de l'air chaud.

Les trois capteurs sont de dimensions (1.92x0.94m), l'entrée de chaque capteur est munie d'un ventilateur qui débite une vitesse de l'air de l'ordre de 2,6 m/s en convection forcée.

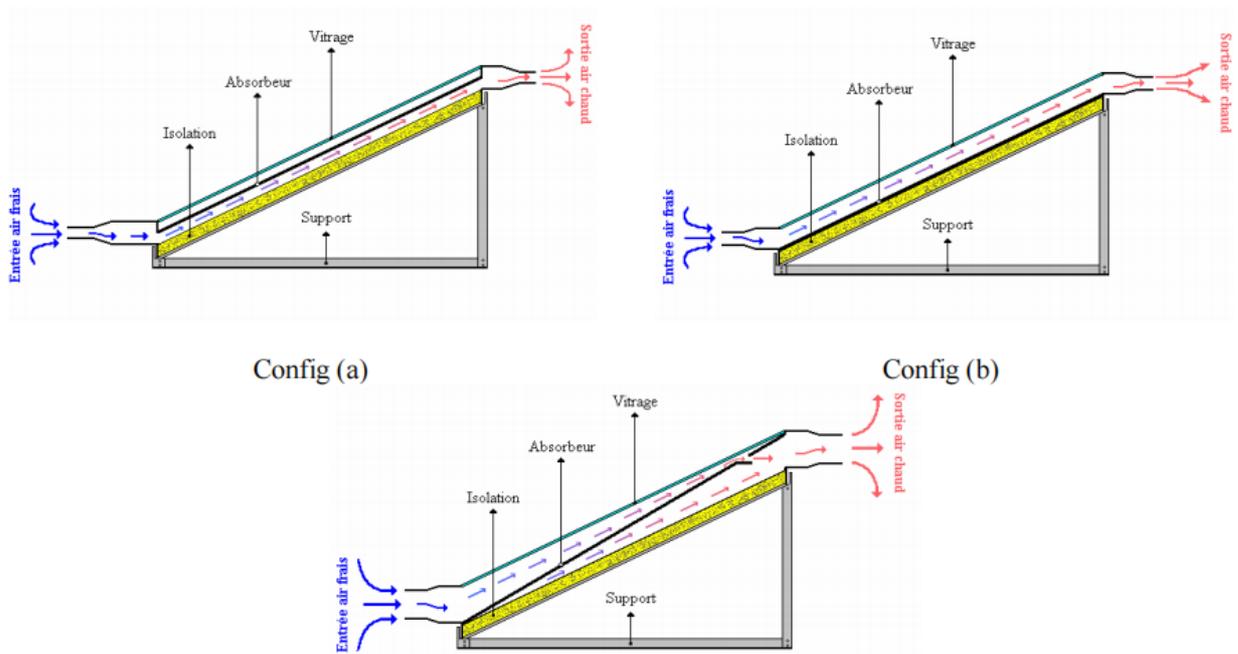


Figure I- 8 : Représentation des trois configurations de capteurs[31]

Ils ont constaté que la configuration (c) présente un meilleur échange de chaleur en convection naturelle et convection forcée. Ils concluaient que le transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'air est important quand il y a contact direct (plaque-air) et double circulation d'air

I.5.3. Adjonction de chicanes

Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires à air, K. Aoues et Al [32] ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur

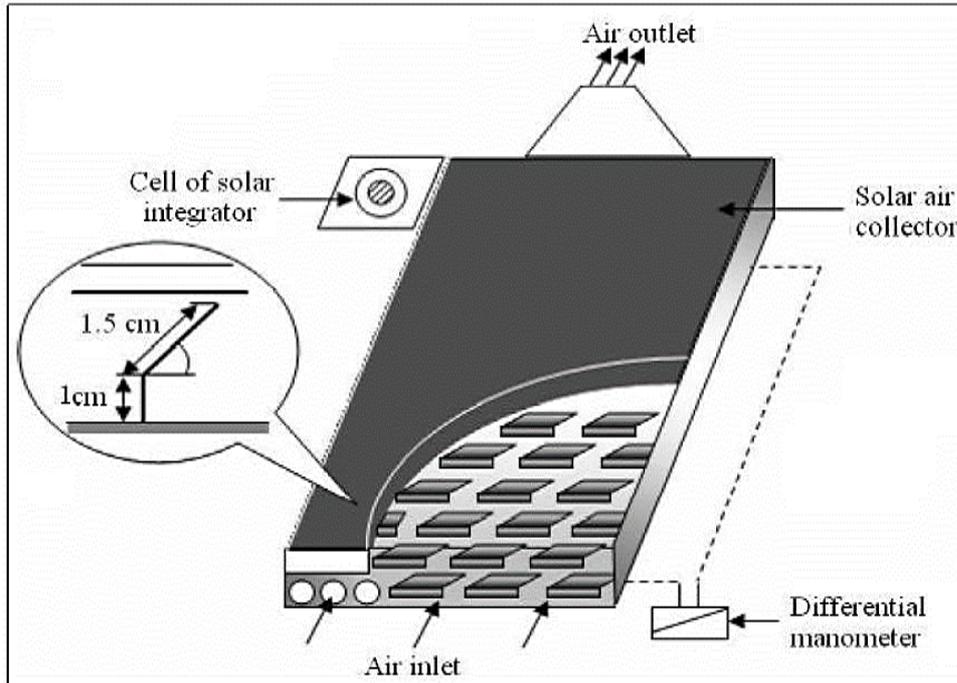


Figure I- 9 : Dispositif expérimental

La veine d'air dynamique du capteur est de 25mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant, cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle respectivement égale à 60° et 120° . Ces chicanes sont espacées d'une distance respectivement à $d=10$ cm et $d=5$ cm suivant deux configuration A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes.

Après une série de tests expérimentaux, les auteurs ont conclu que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important et ont trouvé que les chicanes modèle 1 (placées dans les configurations A1, B1 donnent les meilleurs résultats par rapport à ceux des configurations A2, B2 qui sont des chicanes modèles 2 ($=120^\circ$).

Cela s'explique par le fait que les chicanes du modèle 1 permettent l'orientation du fluide caloporteur en écoulement vers la plaque absorbante, d'où l'augmentation des échanges convectifs. Par contre, les chicanes du modèle 2 orientent le fluide caloporteur vers la plaque inférieure.

K. Aoues et Al [34] 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

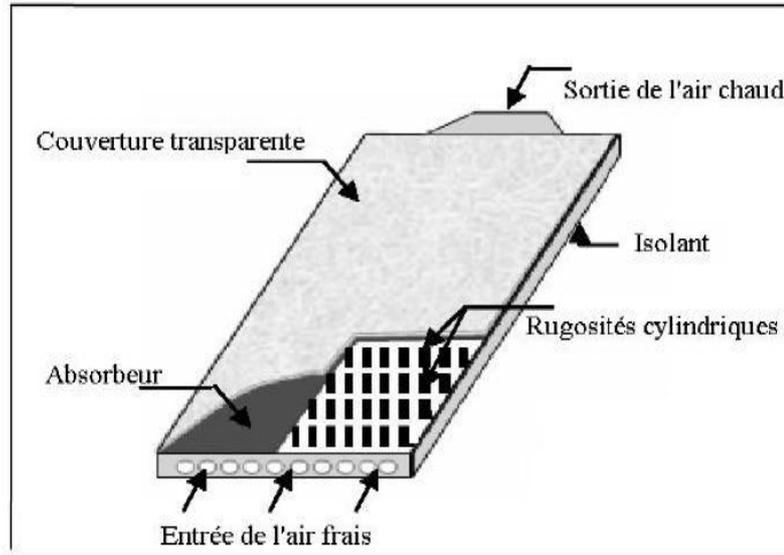


Figure I- 10 : Capteur plan à air muni de rugosités cylindriques

Les auteurs ont étudié les trois cas suivants :

- 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.

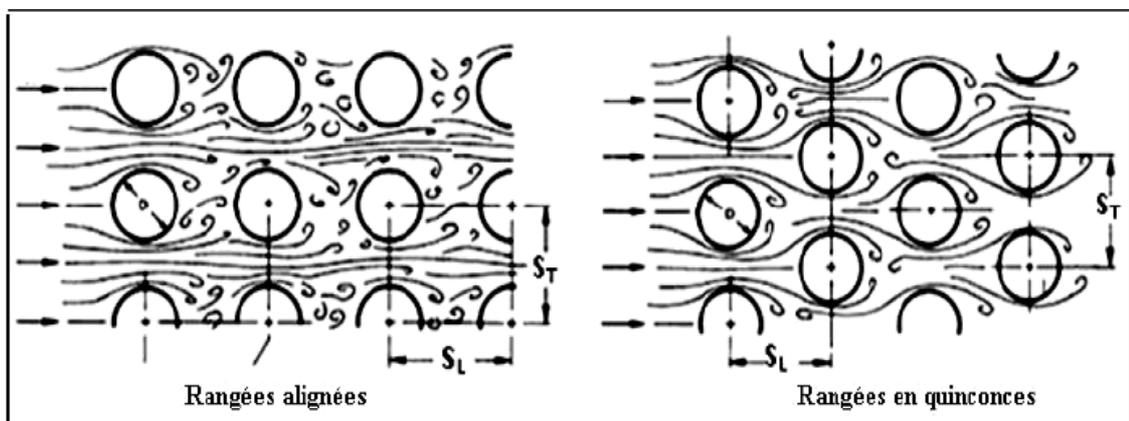


Figure I- 11 : Les différents arrangements des chicanes cylindriques

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

I.5.4. Adjonction de rugosités artificielles

A. Labed et Al [35] 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.

Les auteurs ont conclu que les chicane 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 théoriques sont validés par les résultats expérimentaux.

N. Moumimi et Al [36] ont créé un écoulement turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière par l'utilisation des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement, et qui permettent de réduire les zones mortes.

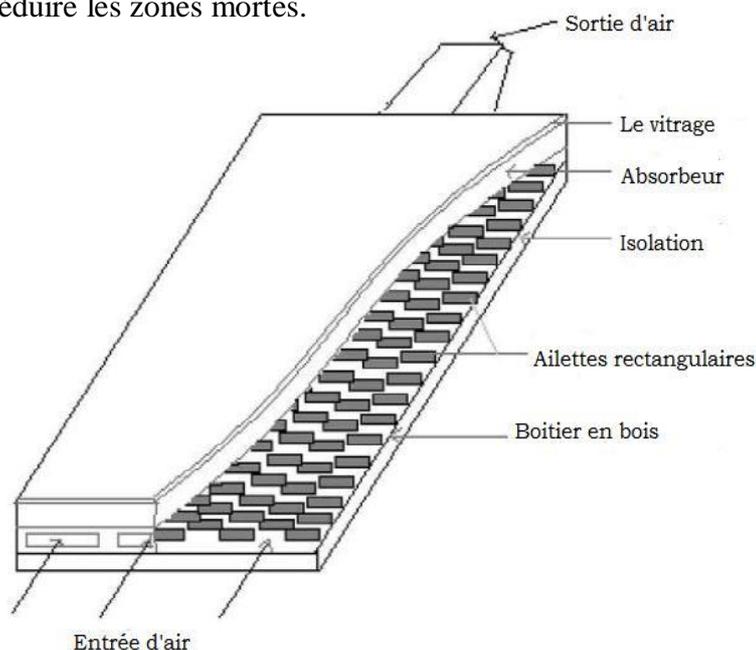


Figure I- 12 : Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement

D'une comparaison de ce type de capteurs avec un autre sans plaques, utilisant deux types d'absorbeurs, sélectif et non sélectif, ils ont trouvé que la sélectivité de l'absorbeur ne présente pas une amélioration remarquable en présence des plaques rectangulaires, comme ils ont donné une approche approximative du coefficient du transfert convectif dans le canal d'air, qui tient compte de la géométrie de l'absorbeur et de la nature d'écoulement.

I.5.5. Capteur utilisant un lit sous forme de treillis métallique

Afin de déterminer les caractéristiques du fluide et du flux de chaleur dans un capteur solaire à air qui sert pour le chauffage (réchauffeurs solaires) en utilisant un lit sous forme de treillis métallique comme matériel d'emballage (figures I-13), Prasad, S.B. et Al [37], ont réalisé une étude expérimentale qui se base sur la comparaison de l'efficacité de ce type de capteur avec celui conventionnel.

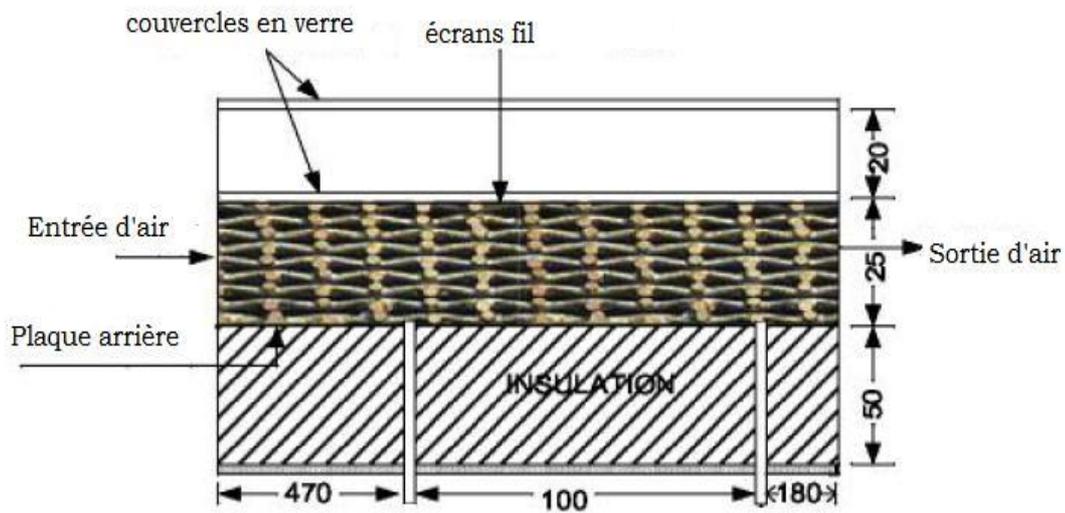


Figure I- 13 : Schéma d'un capteur solaire thermique qui se base sur l'utilisation d'un lit sous forme de treillis métalliques comme matériel d'emballage

Les données expérimentales ont été utilisées pour développer des corrélations, le but de ces corrélations c'est de prévoir les résultats expérimentaux avec une exactitude raisonnable. Les corrélations expérimentales développées montrent un accord meilleur par rapport aux valeurs prévues par des corrélations développées dans le temps passé pour le même système. Ils ont constaté qu'un rendement de l'ordre de 76.9 à 89% peut être obtenu.

I.5.6. capteur solaire à doubles passes sans et avec un milieu poreux

K. Sopian et al [33] avaient présenté une étude expérimentale du rendement thermique d'un capteur solaire à doubles passes sans et avec un milieu poreux dans le deuxième canal

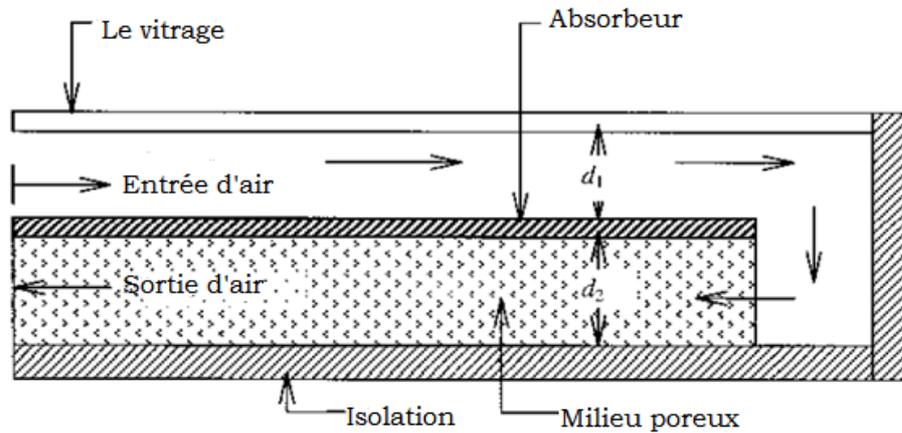


Figure I- 14 : Le schéma d'un capteur solaire thermique à double passe avec des milieux poreux dans le deuxième canal

Ils ont étudié l'effet du changement de la profondeur supérieure et inférieure du canal avec et sans milieu poreux sur le rendement thermique, en plus des effets du débit d'air, du rayonnement et de l'élévation de la température.

Dans ce travail, ils ont constaté que la présence du milieu poreux augmente le secteur de transfert thermique d'où l'augmentation de la température de sortie et par conséquent le rendement thermique des systèmes, et que le capteur solaire à doubles passes a des performances thermiques plus élevées que celles à passe simple. Le rendement thermique d'un capteur solaire à doubles passes avec un milieu poreux est environ 60-70 %, c'est-à-dire 20-70 % plus haut que le capteur sans milieu poreux. Les résultats ont indiqué que ce type de collecteur peut être employé pour une grande variété d'applications, telles que le séchage solaire des produits agricoles.

I.6. Conclusion

Le premier chapitre intitulé revue bibliographique a été réservé à la présentation des généralités et définitions en relation avec les énergies renouvelables et son exploitation. Ce chapitre a été commencé par une introduction puis une petite présentation des types des énergies renouvelables les plus communes. Les capteurs solaires thermiques, dispositifs responsables de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, sont exposés en détail dans ce chapitre . On a achevé ce chapitre par la présentation des différentes études réalisées par certains chercheurs sur les paramètres influents sur le fonctionnement des capteurs solaires à air afin d'améliorer leurs performances et une conclusion.

Chapitre II : Étude théorique

II.1. Introduction

L'étude du gisement solaire a pour but de donner les notions fondamentales pour tout calcul d'une installation solaire, et d'évaluer le flux solaire reçu au niveau du sol qui dépend de plusieurs paramètres : l'orientation, la nature et la déclinaison de la surface terrestre, la latitude du lieu de collecte, la période de l'année, l'instant considéré dans la journée.

Dans ce chapitre on va présenter des généralités et définitions en relation avec l'énergie solaire et son exploitation. On va présenter brièvement le comportement énergétique du soleil et son influence sur celui de la terre. Des définitions liées au soleil, en particulier à sa structure et son rayonnement, ont été aussi présentées. Puis on va faire une présentation des modèles mathématiques adoptés pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur de l'air dans le conduit d'un capteur solaire à air. Les équations de base sont présentées ainsi que les hypothèses simplificatrices.

II.2. Gisement solaire

Le gisement solaire, c'est... le soleil. Gratuit, il brille pour tout le monde. L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources naturelles.

II.2.1. Le Soleil

Le Soleil est une étoile géante qui se compose de 74 % d'hydrogène, de 25 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Il tire son énergie de réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son noyau, l'hydrogène en hélium, dans son état actuel, le cœur du soleil transforme chaque seconde plus de quatre millions de tonnes de matière en énergie qui est transmise aux couches supérieures de l'astre et émise dans l'espace sous forme de rayonnements électromagnétiques (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire).

Environ 9229.3 protons (noyaux d'hydrogène) sont convertis en hélium chaque seconde, libérant l'énergie à raison de 4,26 millions de tonnes de matière consommées par seconde, produisant (392,192 kJ) par seconde.

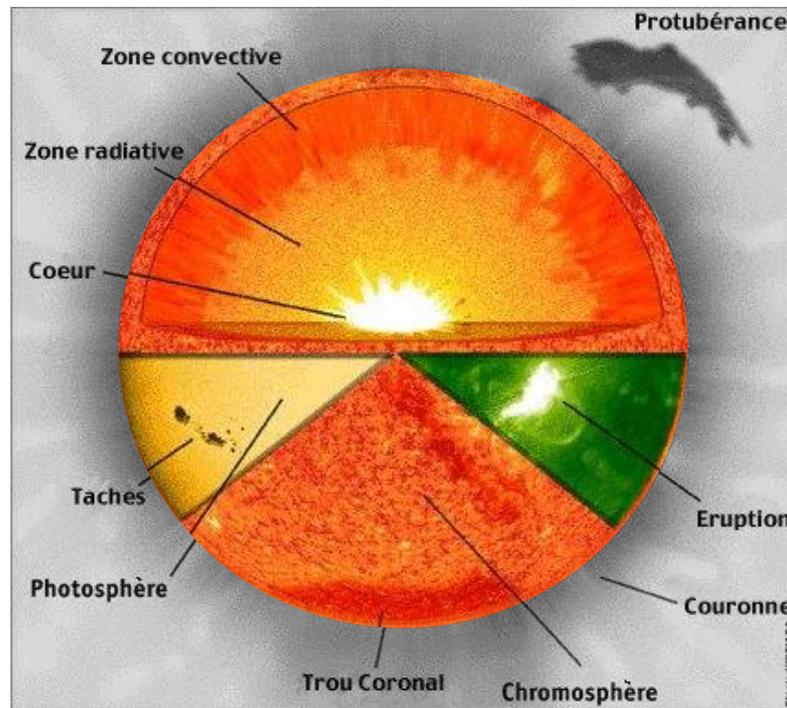


Figure II- 1 : Structure du soleil en coupe

II.2.2. La terre

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de 510101.103 km², son volume est égale à 1083320.106 km³, sa masse vaut 6.1021 tonnes et sa densité moyenne est de 5.52.

La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire. Cette planète est située dans un plan appelé écliptique. L'axe de rotation terrestre fait un angle de 23° 27' ce qu'on appelle déclinaison. L'intersection du plan de l'équateur avec le plan l'écliptique définit la ligne des équinoxes. L'intersection de cette ligne avec l'orbite terrestre, lors de l'équinoxe de printemps définit le point vernal celui-ci est pris comme origine pour le celui des angles définissant la position relative du soleil par rapport à la terre. [38]

II.2.3. Mouvement de la Terre autour du soleil

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse située dans un plan appelé plan de l'écliptique. L'excentricité e de cette ellipse est très faible ($e = 0,017$), ce qui fait que la distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est 149,6 millions de Kilomètres. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles[4]. Cet axe passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur terrestre. L'angle que fait le plan de ce dernier avec la direction terre-soleil est appelé la déclinaison. Il varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23,26'$ à $+23,26'$, comme l'indique la figure suivante :

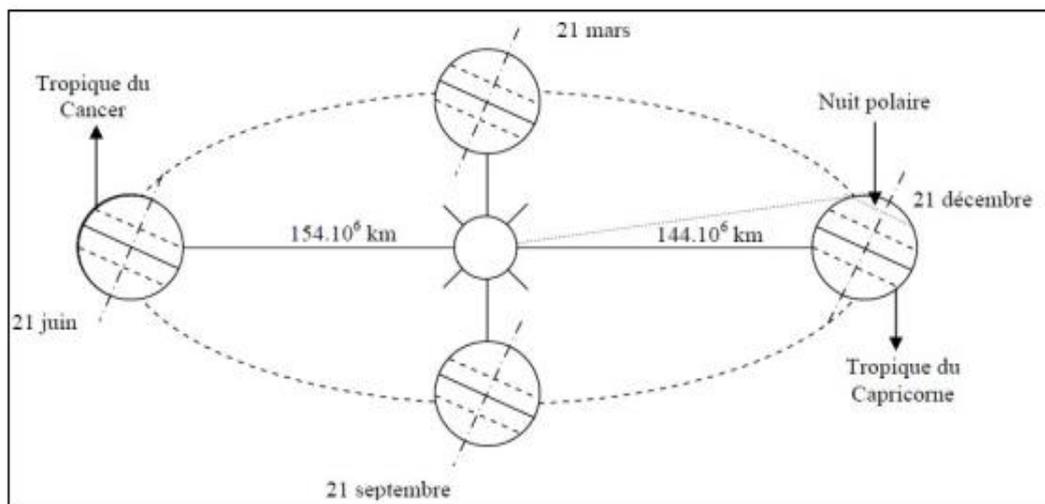


Figure II- 2 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil[4]

II.2.4. Calcul de la position du soleil

Le calcul de la position du soleil nécessite les déterminations des paramètres de positions et de temps

II.2.4.1. paramètres de position

Les paramètres de positions englobant les coordonnées terrestres, équatoriales et horizontales.

- **coordonnées terrestres**

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées appelées coordonnées terrestres, la latitude et la longitude L . [5]

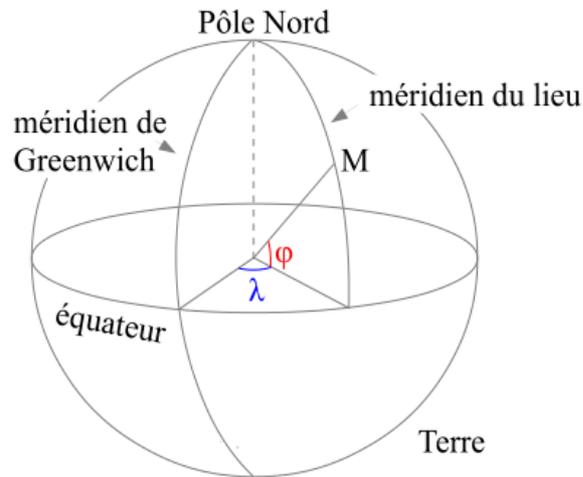


Figure II- 3 : Les coordonnées terrestres d'un lieu donné

➤ **La latitude**

C'est l'angle formé par la verticale d'un lieu donné avec le plan équatorial terrestre . Elle s'exprime en degrés et va de 0° pour un lieu sur l'équateur, à 90° pour les pôles, positif dans l'hémisphère nord, négatif dans l'hémisphère Sud. [5]

➤ **La longitude**

C'est l'angle formé par le méridien du site avec le méridien de référence (méridien de Greenwich), positif à l'Ouest, négatif à l'Est. [5]

➤ **L'inclinaison**

C'est l'angle entre le plan lui-même et l'horizontal



Figure II- 4 : schéma qui montre l'angle d'inclinaison dans un capteur thermique

$\beta = 0^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le haut.

$\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical.

$\beta = 180^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le bas.

- **coordonnées équatoriales**

Le plan de référence c'est l'équateur céleste, les coordonnées utilisées sont la déclinaison et l'angle horaire.

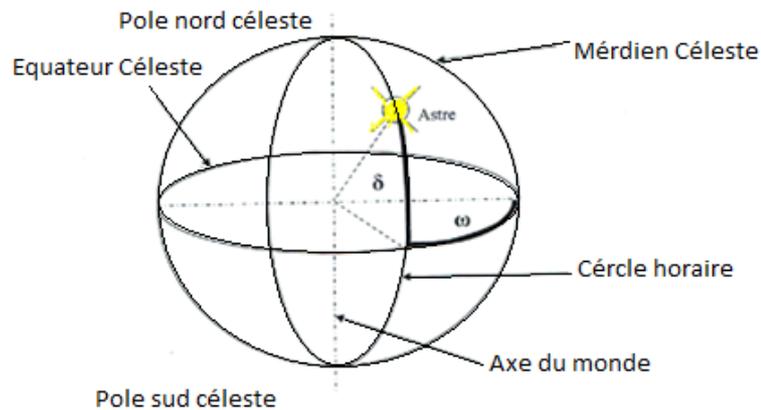


Figure II- 5 : Les coordonnées équatoriales.

- **la déclinaison**

C'est l'angle formé par la direction terre/soleil avec le plan équatorial terrestre, ou encore, l'angle formé par le plan écliptique et l'équateur terrestre. Il varie de $-23,27'$ à $+23,27'$ au cours de l'année. [6]

- ✓ $\delta = +23^\circ 27'$ au solstice d'été (le 22 juin) ;
- ✓ $\delta = -23^\circ 27'$ au solstice d'hiver (le 22 décembre) ;
- ✓ $\delta = 0$ à l'équinoxe du printemps (le 21 mars) et à l'équinoxe d'automne (le 23 septembre).

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(j+284)\right] \quad (\text{II-1})$$

Avec : J, le numéro du jour de l'année qui varie de 1 à 366

Les numéros du jour de l'année sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau II-1 : Numéro du jour de l'année.

| Mois | Jan | fev | mars | avr | mai | juin | juil | aout | sept | octb | nov | dec |
|-------------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Numéro du premier jour du moi | 0 | 31 | 59 | 90 | 120 | 151 | 181 | 212 | 243 | 273 | 304 | 344 |

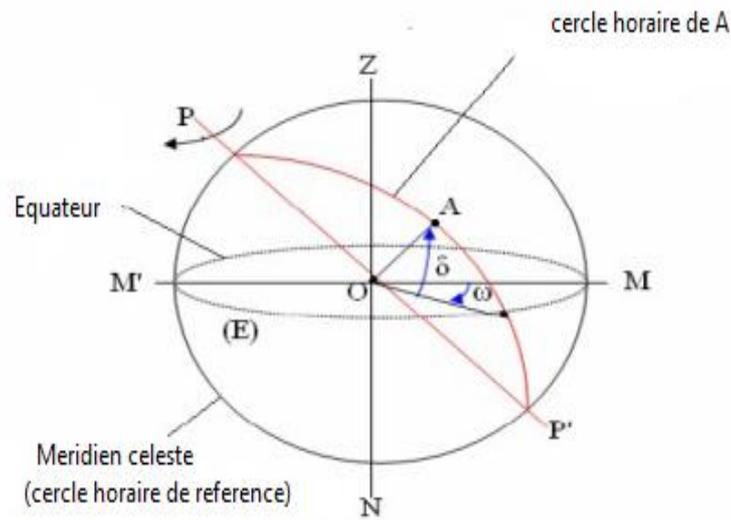


Figure II- 6 : La déclinaison

➤ **l'angle horaire**

C'est l'angle formé par le plan méridien céleste et la projection de la direction terre/soleil sur le plan de l'équateur céleste, ou encore, c'est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire dans sa course d'est en ouest par rapport au méridien local. Il est nul à midi solaire, négatif le matin et positif en après-midi[6]. Il est donné par :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (\text{II-2})$$

Avec :

ω : en degrés ;

TSV: temps solaire vrai.

Ou encore :

$$\omega = \frac{\pi}{12}(\text{TSV} - 12) \quad (\text{II-3})$$

ω : en radians;

TSV: en heures.

- **coordonnées horizontales**

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste. Ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et c'est pour cela qu'elles sont appelées aussi les coordonnées locales. Le plan de référence est l'horizon astronomique. La hauteur et l'azimut constituent les coordonnées horizontales[6].

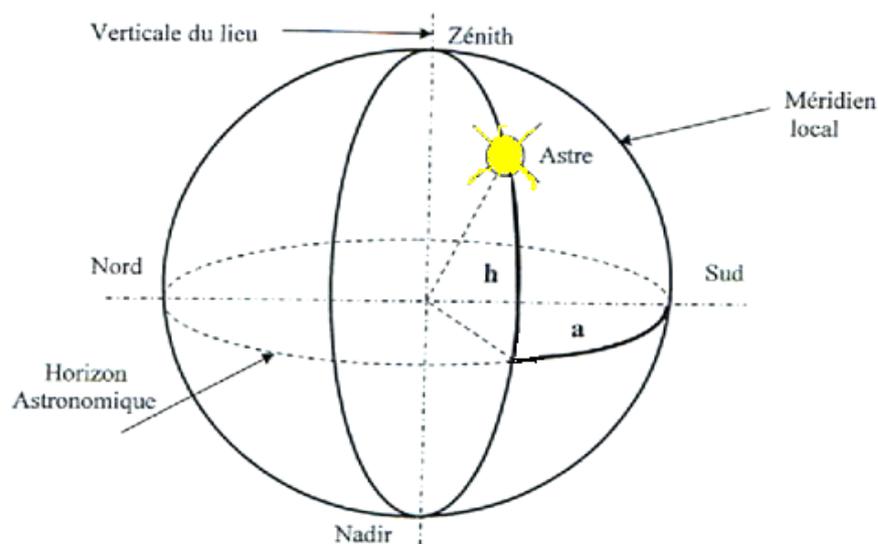


Figure II- 7 : Les coordonnées horizontales d'un astre.

- **Hauteur angulaire h**

C'est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (c'est-à-dire le tangent au sol). On compte les hauteurs du soleil positivement vers le zénith de 0° à 90°. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\sin(h) = \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\varphi \quad (\text{II-4})$$

➤ **l'azimut a**

C'est l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. Elle se compte de 0° à 360° de l'Ouest vers l'Est.

Elle est donnée par : [6]

$$\text{Sina} = (\cos \varphi \cdot \sin \omega) / \cosh \quad (\text{II-5})$$

II.2.4.2. paramètre du temps

● **Temps solaire vrai (TSV)**

C'est le temps donné par les cadrans solaires. Il est défini à partir de la rotation quotidienne de la terre sur elle-même et son mouvement autour du soleil, mais à cause des irrégularités du mouvement de la terre, il ne peut pas servir d'échelle du temps. Il est donné par la relation suivante : [6]

$$\text{TSV} = T_L + E_t + 4(L_{\text{lieu}} - L_{\text{ref}}) + D \quad (\text{II-6})$$

Ou encore:

$$\text{TSV} = \text{TSM} + E_T \quad (\text{II-7})$$

T_L : le temps local

L_{lieu} : Longitude du lieu ;

L_{ref} : Longitude de référence

D : le décalage horaire (en Algérie $D = 1$)

TSM : temps solaire moyen ;

E_t : équation du temps.

Ou encore :

$$\text{TSV} = 12 + \omega / 15 \quad (\text{II-8})$$

ω : en degrés.

● **Temps solaire moyen (TSM)**

C'est le temps moyen solaire en supposant un mouvement uniforme de la terre autour de son axe, c'est-à-dire le jour solaire moyen dur 24 heures. Il est donné par la formule suivante : [6]

$$TSM = TU - Et \quad (II-9)$$

TU : temps universel ;

Et : équation du temps.

Ou encore :

$$TSM = TU + 4(L_{\text{lieu}} - L_{\text{ref}}) \quad (II-10)$$

L_{lieu} : Longitude du lieu ;

L_{ref} : Longitude de référence

● **Équation du temps (Et)**

Elle indique la correction qui permet de passer du temps solaire vrai au temps solaire moyen. Cette correction varie de -14 à +16 minutes au cours de l'année, cela veut dire que le soleil peut passer au méridien avec 16 minutes d'avance ou de 14 minutes de retard par rapport au temps moyen. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$Et = 9,87 \sin 2\beta - 7,53 \cos \beta - 1,5 \sin \beta \quad (II-11)$$

Avec :

$$\beta = (360/365) (n - 81) \quad (II-12)$$

β : en degré ;

n : le quantième jour de l'année ;

Et : en minutes.

- **Temps civil (Tc)**

C'est le temps moyen avec l'origine à minuit.[6]

- **Temps universel (TU)**

C'est le temps civil du méridien de Greenwich, donné par : [6]

$$TU = TSM \pm L_{\text{lieu}} / 15 \quad (\text{II-13})$$

- **Temps légal (TL)**

C'est le temps qui tien compte du fuseau horaire dans lequel se situe la majeure partie du pays, on le trouve décalé d'un nombre entier d'heures par rapport au fuseau horaire original(Greenwich), donné par : [6]

$$TL = TU \pm D \quad (\text{II-14})$$

Avec :

D: C'est le décalage en heure par rapport au méridien de Greenwich.

II.2.4.3. durée du jour

Pour qu'on puisse déterminer la durée du jour, il faut connaître deux instants de la journée, qui sont le lever et le coucher du soleil. Ces deux instants ont lieu quand les rayons solaires sont confondus avec l'horizontale, c'est-à-dire $\sin h = 0$, donc la résolution de cette équation nous donne :

$$\omega_s = -\arccos(\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta) \quad (\text{II-15})$$

Avec :

φ : C'est la latitude du lieu ;

La durée du jour solaire est donnée par la formule suivante :

$$dj = (2/15) \cdot \arccos \omega_s \quad (\text{II-16})$$

II.2.4.4. Fraction d'insolation [7]

La durée d'insolation est une variable qui présente une grandeur non stationnaire, celle-ci trouve son explication dans la variation de sa moyenne au cours de l'année, à cause de la saisonnalité du processus, en effet elle varie d'un jour à l'autre, l'ensoleillement d'un site est exprimé par la fraction d'insolation (σ) définie par le rapport.

$$\sigma = Sh/D_j \quad (\text{II-17})$$

Avec :

Sh : le nombre d'heures ensoleillées ou durées d'insolation.

II.2.5. Évaluation du flux solaire

Le flux solaire correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire appelée capteur. Parmi les rayonnements envoyés par le soleil, on distingue :

- Le rayonnement direct I_b : Ce qui reste de l'irradiation hors atmosphère lorsque les pertes dues à la réflexion et à la dispersion du rayonnement solaire à travers les composantes de l'air sont soustraites.

- Le rayonnement solaire diffus I_d : Ce rayonnement est dû à la dispersion du rayonnement direct dans l'atmosphère.

- Le rayonnement global I_G : C'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement solaire diffus. La figure (II-8) schématise les différentes composantes du rayonnement solaire.

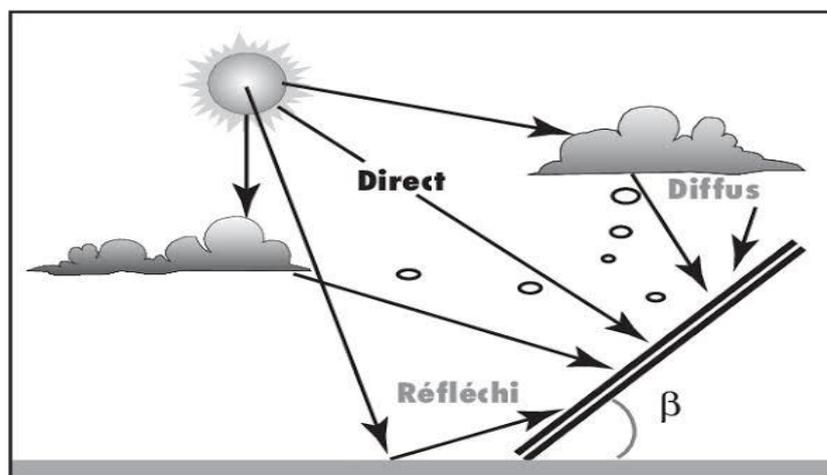


Figure II- 8 : Les composantes du rayonnement solaire [3]

II.2.6. Modèles d'estimation de l'éclairement solaire:

Il existe plusieurs modèles pour la simulation de l'éclairement solaire global, direct et diffus, exprimés par des approches semi-empiriques, les plus utilisés dans la pratique sont : le modèle de M.Capderou et le modèle de Perrin Brichambaut . Ces modèles donnent plus ou moins l'évolution de l'irradiation solaire sur un plan horizontal ou sur un plan incliné.

II.2.6.1. Éclairement direct sur un plan horizontal [3]

➤ Éclairement direct

$$I_b = I_0 \sin h \exp\left(-\frac{T}{0.9 + 9.4(0.89^Z) \sin h}\right) \quad (\text{II-18})$$

Tel que :

T: trouble total de Link

Z: l'altitude du lieu

I_0 : éclairement hors atmosphère

$$I_0 = I_{cs} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} J\right) \quad (\text{II-19})$$

I_{cs} : la constante solaire ($I_{cs} = 1367 \text{ W/m}^2$)

J: le numéro du jour de l'année

- **Éclairement par ciel clair**
- ✧ **Modèle de Perrin de Brichambaut [3]**
- ✓ L'éclairement global:

$$I_g = D(\sin h)^E \quad (\text{II-20})$$

- ✓ L'éclairement direct

$$I_b = A \sin h \exp\left(-\frac{1}{C \sin(h + 4\pi/180)}\right) \quad (\text{II-21})$$

- ✓ L'éclairement diffus:

$$I_d = B(\sin h)^{0.4} \quad (\text{II-22})$$

Avec Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel comme indique le tableau suivant:

Tableau II-2 : Valeurs des coefficients en fonction de la qualité du ciel[3]

| Ciel | A (W/m ²) | B (W/m ²) | C | D (W/m ²) | E |
|----------|--------------------------|--------------------------|-----|--------------------------|------|
| Très pur | 1300 | 87 | 6 | 1150 | 1.15 |
| Moyen | 1230 | 125 | 4 | 1080 | 1.22 |
| Pollué | 1200 | 187 | 2.5 | 990 | 1.25 |

- ✧ **Modèle de Capderou[3]**

- ✓ L'éclairement global:

$$I_g = 1080(\sin h)^{1.22} \quad (\text{II-23})$$

- ✓ L'éclairement diffus:

$$I_d = 125 (\sin h)^{0.4} \quad (\text{II-24})$$

- ✓ L'éclairement direct

$$I_b = I_g - I_d \quad (\text{II-25})$$

II.2.6.2. Éclairement solaire sur un plan incliné

La figure nous illustre la géométrie de ce plan

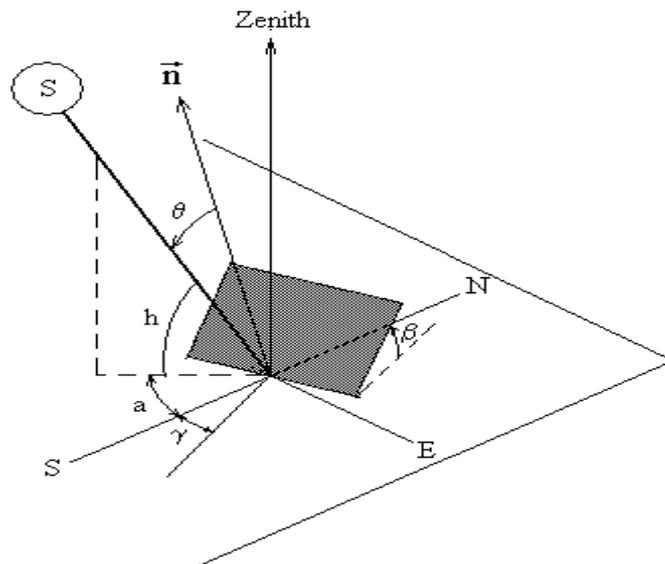


Figure II- 9 : La géométrie d'un plan incliné d'un angle β par rapport à l'horizontale.[3]

L'éclairement solaire sur un plan incliné se donne par la formule suivante[3]:

$$I_{\beta} = R_b I_{bh} + \frac{1 + \cos \beta}{2} I_{dh} + \frac{1 - \cos \beta}{2} I_{gh} \rho_s \quad (\text{II-26})$$

Avec

I_{bh} : Éclairement direct sur le plan horizontal

I_{dh} : Éclairement diffus sur le plan horizontal

I_{gh} : Éclairement global sur le plan horizontal

$\frac{1 + \cos \beta}{2}$: le facteur de forme entre le plan et le ciel

$\frac{1 - \cos \beta}{2}$: le facteur de forme entre le plan et le sol

ρ_s : l'albédo

R_b : Coefficient de Conversion de l'éclairement direct tel que:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin h} \quad (\text{II-27})$$

θ : l'angle d'incidence tel que [3] :

$$\cos \theta = \sin h \cos \beta + \sin \beta \cos \gamma \cos a \cos h + \sin a \cos h \sin \beta \sin \gamma \quad (\text{II-28})$$

Pour une orientation plein sud : $\gamma = 0$

Donc:

$$\cos \theta = \sin h \cos \beta + \sin \beta \cos a \cos h \quad (\text{II-29})$$

β : Inclinaison du plan par rapport à l'horizontale

γ : Azimut du plan (angle formé par la projection de la normale au plan et la direction sud)

II.2.7. Conversion de l'énergie solaire

D'après des statistiques récentes [10], la puissance solaire incidente sur toute la surface de la Terre chaque année est d'environ 1.5×10^{18} kWh, ce qui représente approximativement 10000 fois la consommation mondiale annuelle d'énergie. Si on veut être un peu rigoureux, on ne considère que la surface des déserts naturels qui est d'environ 2×10^7 km² avec une insolation (irradiation de l'énergie solaire) journalière moyenne de 4.67 kWh/m² pour une durée d'ensoleillement de 8 heures, ce qui nous donne une insolation annuelle égale approximativement 34×10^{15} kWh ; et si on exploite seulement 5% de cette insolation, on va avoir chaque année 1.7×10^{15} kWh soit 7.5 fois la consommation énergétique mondiale estimée pour l'année 2020 [11, 12].

II.2.7.1. Les composantes d'un système de conversion thermique

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants:

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air ;

- Un stockage thermique ;
- Un réseau de distribution.

II.2.7.2. Énergie solaire passive et active

Les systèmes de conversion thermique de l'énergie solaire se divisent généralement en deux catégories principales selon l'indépendance ou l'intégration des éléments utilisés pour la conversion et le stockage d'énergie dans la structure du système, et aussi bien selon le type de circulation du fluide caloporteur (voir la figure II-10).

La première catégorie correspond essentiellement au développement des approches architecturales afin d'exploiter naturellement (passivement) le maximum possible de l'énergie solaire pour maintenir la construction domestique ou institutionnelle à un niveau acceptable de confort en termes d'éclairage et de température. Le concept d'une construction passive repose sur la capacité des composants constituant la structure de cette construction de transmettre, absorber et stocker l'énergie solaire et transférer la chaleur partout dans ses différentes parties par la circulation naturelle de l'air résultant du gradient de température. Le principe de fonctionnement d'un système passif est plus simple que celui d'un système actif ; mais la difficulté de contrôler la distribution de chaleur et les pertes thermiques (dans le cas d'insolation faible ou pendant la nuit) rend impossible de maintenir les constructions sous des conditions subjectivement limitées par les exigences de chaque individu [13].

Le séchage solaire passif (naturel) se fait d'une manière similaire au processus de séchage traditionnel dont lequel le produit à sécher est exposé directement aux rayons solaires et à l'air ambiant. Cependant, dans les séchoirs solaires passifs (séchoirs-serres) le produit est bien conservé de détérioration et l'opération de séchage (source de chaleur, température de l'air asséchant, etc.) est plus ou moins manipulable selon le mode et la structure des séchoirs [14].

La deuxième catégorie correspond à la conversion thermique de l'énergie solaire en utilisant des dispositifs (capteurs solaires) indépendants du système solaire, et fonctionnant en régime de circulation forcée. Les capteurs solaires représentent un type spécial des échangeurs de chaleur qui servent à la transformation de l'insolation en une énergie interne du fluide caloporteur (air, eau, huile,...etc.) qui s'écoule à l'intérieur de ceux-ci [15]

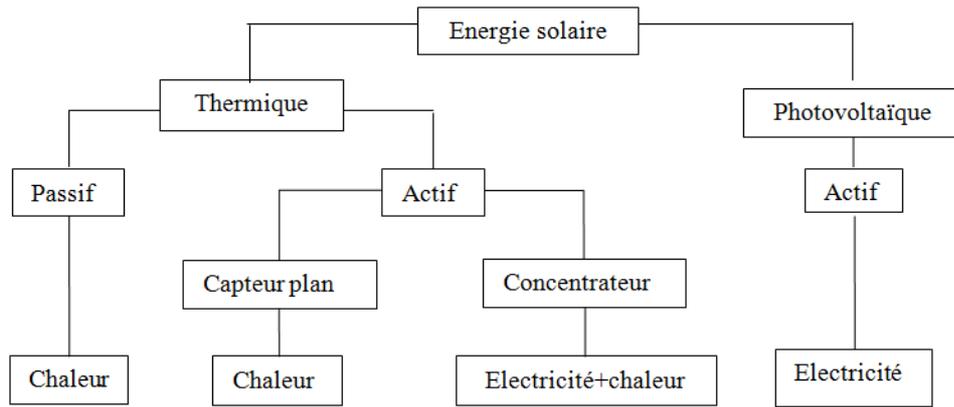


Figure II- 10 : Utilisation directe de l'énergie solaire [15].

II.2.8. Moyenne mensuelle et annuelle de l'irradiation globale

Le gisement solaire est exprimé par les sommes annuelles du rayonnement solaire global sur un plan horizontal. l'Algérie est le premier pays d'Afrique par sa superficie, plus des quatre cinquièmes du leur territoire sont désertiques et possède une source énergétique très importante de part de sa situation géographique. La durée annuelle du rayonnement solaire sur la quasi-totalité du territoire national dépasse 2000 heures, où peuvent atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). La figure (II-11) montre la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 en Algérie.

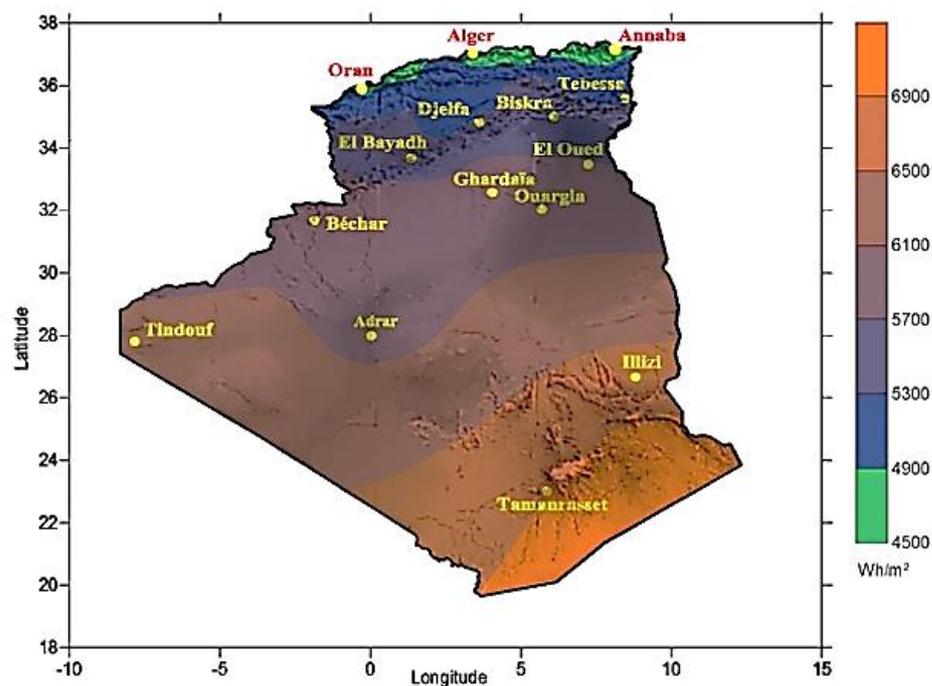


Figure II- 11 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 [Wh/m^2] [14].

II.3. Modélisation du capteur a air

II.3.1. Description du système d'étude

La géométrie du problème considéré est schématisée par la figure(II-12) . Il s'agit d'un capteur solaire à air à configuration C, dont 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 de section rectangulaire pour permettre l'évacuation de l'air chaud . l'écoulement de l'air est effectué sous les conditions suivantes :

Longueur du capteur $L= 1852 \text{ mm}$

Hauteur du capteur $h = 78 \text{ mm}$

Section de l'orifice $s = 100 \text{ mm}$

L'absorbeur a une épaisseur $e_{ab} = 6 \text{ mm}$

Épaisseur de la lame d'air = 10 mm

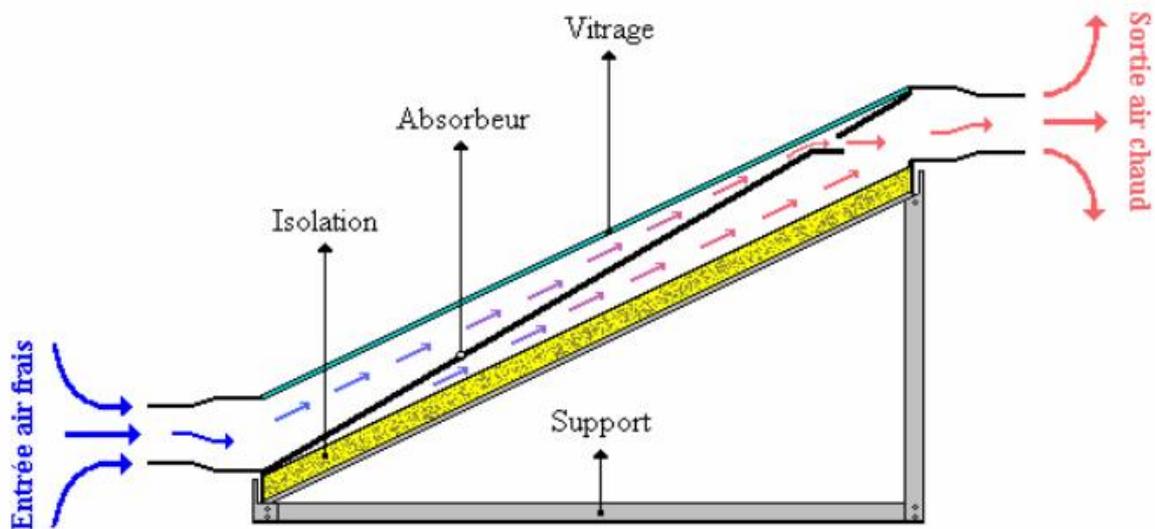


Figure II- 12 : Capteur a air de configuration C [31]

II.3.2. Les paramètres radiatifs

Le tableau présente les différents paramètres radiatifs des différents composants du capteur solaire à air utilisés dans la simulation numérique.

Tableau II-3 : Paramètres radiatifs

| Paramètre | Symbole | Valeur |
|--|-----------------|--------|
| Coefficients d'absorption du vitrage | α_v | 0.05 |
| Coefficients de transmission du vitrage | τ_v | 0.95 |
| Émissivité du vitrage | ε_v | 0.88 |
| Coefficients d'absorption de l'absorbeur | α_p | 0.95 |
| Émissivité de l'absorbeur | ε_p | 0.95 |
| Température ambiante (K) | Ta | 203 |

II.3.3. Bilan thermique

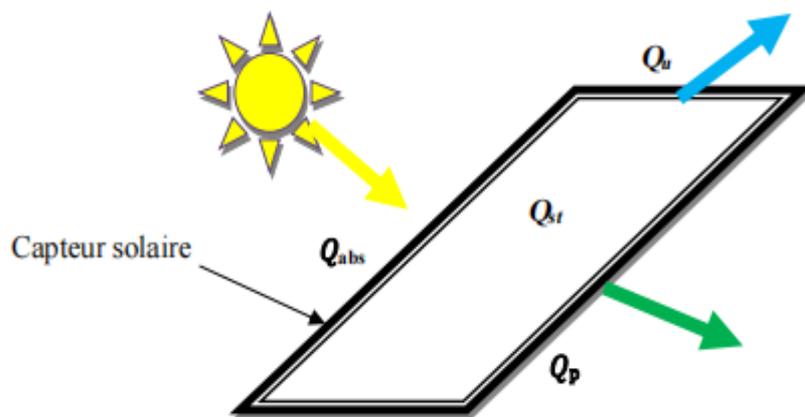


Figure II- 13 : Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire

Le bilan thermique s'écrivant simplement pendant un intervalle de temps dt sous la forme suivante :

$$E_{\text{sortie}} - E_{\text{entrée}} + E_{\text{stockage}} = 0 \quad (\text{II-30})$$

$$Q_u + Q_P - Q_{\text{abs}} + Q_{\text{st}} = 0 \quad (\text{II-31})$$

Ou en écrivant que l'énergie reçue se répartit en :

$$Q_{\text{abs}} = Q_u + Q_P + Q_{\text{st}} \quad (\text{II-32})$$

On a :

$$Q_{\text{st}} = 0 \quad (\text{II-33})$$

et donc l'équation du bilan devient:

$$Q_{\text{abs}} = Q_u + Q_P \quad (\text{II-34})$$

Avec:

Q_{abs} : Flux solaire absorbé

Q_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

Q_P : Flux perdu vers le milieu extérieur.

Q_{st} : Flux stocké dans le capteur

II.3.3.1. Les pertes thermiques

- **Pertes avant**

En supposant que l'absorptivité du vitrage est négligeable, un bilan d'énergie sur le ce dernier permet d'écrire :

$$dQ_{av} = Q_{\text{rpv}} + Q_{\text{cpv}} = Q_{\text{rvc}} + Q_w \quad (\text{II-35})$$

Q_{rvc} : Échanges radiatifs Vitrage –Ciel

Q_w : Échanges convectifs du couvert dus à l'effet du vent

Q_{rpv} : Échanges radiatifs entre l'absorbeur et le vitrage.

Q_{cpv} : Échanges convectifs entre l'absorbeur et le vitrage

En supposant que les températures vitre et plaque sont respectivement uniformes, les différentes quantités d'énergie, échangées par unité de temps, sont données par:

$$\checkmark \quad dQ_w = h_w(T_v - T_a)dA \quad (\text{II-36})$$

$$\checkmark \quad dQ_{rvc} = h_{rvc}(T_v - T_a)dA \quad (\text{II-37})$$

$$\checkmark \quad dQ_{cpv} = h_{cpv}(T_p - T_v)dA \quad (\text{II-38})$$

$$\checkmark \quad dQ_{rpv} = h_{rpv}(T_p - T_v)dA \quad (\text{II-39})$$

Avec:

$$h_{rvc} = \varepsilon_v \cdot \sigma \frac{(T_v^4 - T_s^4)}{(T_v - T_a)} \quad (\text{II-40})$$

$$h_{rpv} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2)(T_p + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{II-41})$$

$$h_w = 2.8 + 3V \quad (\text{II-42})$$

Donc Les pertes avant sont données par :

$$dQ_{av} = (h_w + h_{rvc})(T_v - T_a) = (h_{rpv} + h_{cpv})(T_p - T_v) \quad (\text{II-43})$$

$$dQ_{av} = U_{av}(T_p - T_a)dA \quad (\text{II-44})$$

Avec:

$$U_{av} = \left[\frac{1}{(h_w + h_{rvc})} + \frac{1}{(h_{rpv} + h_{cpv})} \right]^{-1} \quad (\text{II-45})$$

● **Pertes arrière et latérales :**

on supposera que l'isolation parfaite donc la face externe du capteur (coffre ou bac) sera à la température ambiante

Alors les pertes arrière et latérales sont données par :

➤ Les pertes arrière:

$$Q_{ar} = A \left(\frac{K_{is}}{e} \right) (T_p - T_a) = A_{ar} (T_p - T_a) \quad (\text{II-46})$$

➤ Les pertes latérales:

$$Q_{lat} = A_{lat} \left(\frac{K_{is}}{e} \right) (T_p - T_a) = U_{ar} A_{lat} (T_p - T_a) \quad (\text{II-47})$$

Tel que :

K_{is} : la conductivité de l'isolant.

e : l'épaisseur de l'isolant.

➤ Les pertes globales sont données par :

$$Q_p = Q_{av} + Q_{ar} + Q_{lat} \quad (\text{II-48})$$

$$\begin{aligned} Q_p &= A \left[U_{av} + U_{ar} + \left(\frac{A_{lat}}{A} \right) U_{lat} \right] (T_p - T_a) \\ &= AU_g (T_p - T_a) \end{aligned} \quad (\text{II-49})$$

II.3.4. Le rendement

Le rendement instantané du capteur solaire plan est donné par le rapport du flux de chaleur récupérée par le fluide caloporteur à l'éclairement solaire reçu par le capteur, soit :

$$\eta_{ins} = \frac{Q_u}{(I_g \cdot A_c)} \quad (\text{II-50})$$

Ou encore:

$$\eta_{ins} = \left(\frac{F_r}{I_g} \right) [(\tau\alpha)_{\text{eff}} \cdot I_g - U_t(T_i - T_a)] \quad (\text{II-51})$$

Tel que:

F_r et $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ Représentent les paramètres caractéristiques des capteurs solaires plans.

II.4. Modélisation mathématique des écoulements

II.4.1. Les hypothèses simplificatrices

- L'écoulement est stationnaire (pendant l'instant t où l'écoulement est simulé) il est de plus bidimensionnel et incompressible.
- Les propriétés physiques sont supposées constantes (faibles écarts de température).
- L'hypothèse de Boussinesq nous permet de négliger, dans les équations de quantités de mouvement, les variations de la densité de l'air $\Delta\rho$ par rapport à la densité de référence ρ_0 ($\Delta\rho \ll \rho_0$), à l'exception de celles rencontrées dans le terme de gravitation (terme de flottabilité). Le terme de gravitation en fonction des conditions de référence est donné par

$$\rho_g = \rho_0 g (1 - \beta (T - T_0)) \quad (\text{II-52})$$

- La température de la vitre considérée comme uniforme.
- La résistance thermique dans l'absorbeur est négligeable (l'épaisseur faible).

➤ L'isolation thermique est considérée parfaite ($q=0$) sur les faces. La température de la vitre sera estimée par une méthode détaillée dans la suite du mémoire.

II.4.2. Les équations gouvernantes

- **Équation de continuité**

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} = 0 \quad (\text{II-53})$$

- **Équation de conservation de quantité de mouvement**

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos \alpha \quad (\text{II-54})$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \rho g \sin \alpha \quad (\text{II-55})$$

- **Équation de conservation d'énergie**

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II-56})$$

II.4.3. Conditions initiales et conditions aux limites

II.4.3.1. Conditions initiales

Les conditions initiales sont:

- Champ de vitesse nul sur tout le domaine.
- La vitesse initiale U_0 est imposée à l'entrée du système dans chaque cas.

- Champ de température :

$$T_{(x,y, t=0)} = T_0 \quad (\text{II-57})$$

II.4.3.2. conditions aux limites

Les conditions aux limites données sur la figure suivante :

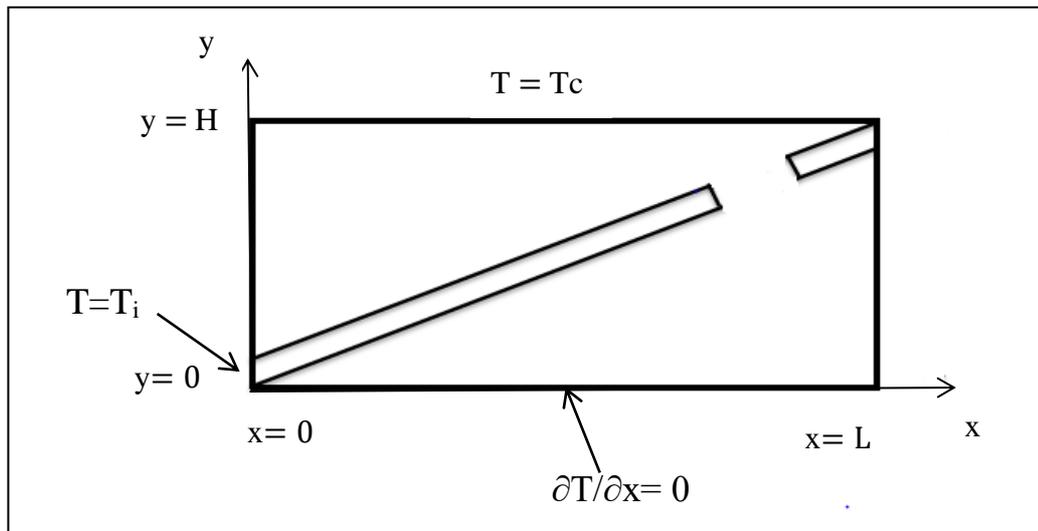


Figure II- 14 : Les conditions aux limites

II.5. Propriétés thermophysiques des différents composants du capteur

Avant de présenter les propriétés thermophysiques des différents composants du capteur, il est important les citer :

- L'absorbeur est en acier, et qui représente une source de chaleur du capteur.
- La vitre est en verre qui constitue la couverture supérieure du capteur (paroi supérieure) qui provoque l'effet de serre.
- Les isolants en bois et laine de roche constituent les parois latérales.
- L'air à l'intérieur du capteur est situé entre la vitre , l'absorbeur et le boîtier.

II.5.1. Propriétés thermophysiques de l'air

Les propriétés thermophysiques de l'air sont présentées dans le tableau (II-4) [39]:

Tableau II-4 : Propriétés thermophysiques de l'air

| Propriétés physiques | Symboles | valeurs |
|--|-----------|------------------|
| Masse volumique (kg.m^{-3}) | ρ | 1.22 |
| Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | C_p | 1012 |
| Conductivité thermique ($\text{W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | λ | 0.0242 |
| Viscosité ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) | μ | $1.7894.10^{-5}$ |

II.5.2. Propriétés de la vitre

Les propriétés de la vitre sont présentées dans le tableau (II-5) [39] :

Tableau II-5 : Propriétés de La vitre

| Propriétés physiques | symboles | valeurs |
|--|-----------|---------|
| Masse volumique (Kg.m^{-3}) | ρ | 1375 |
| Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | C_p | 840 |
| Conductivité thermique ($\text{W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | λ | 0.0263 |

II.5.3. Propriétés de l'absorbeur

Les propriétés de l'absorbeur sont présentées dans le tableau (II-6) [39] :

Tableau II-6 : Propriétés de l'absorbeur

| Propriétés physiques | symboles | valeurs |
|--|-----------|---------|
| Masse volumique (Kg.m^{-3}) | ρ | 7900 |
| Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | C_p | 465 |
| Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | λ | 54 |

II.5.4. Propriétés de l'isolation

Les propriétés de l'isolation sont présentées dans le tableau (II-7) [39] :

Tableau II-7 : Propriétés de L'isolation

| Propriétés physiques | symboles | valeurs |
|--|-----------|---------|
| Masse volumique (kg.m^{-3}) | ρ | 700 |
| Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | C_p | 2310 |
| Conductivité thermique ($\text{W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$) | λ | 0.116 |

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a brièvement montré l'influence du soleil sur la terre et les aspects énergétiques des mouvements de ces deux derniers. Des définitions liées au soleil, en particulier à sa structure et son rayonnement, ont été aussi présentées.

Par la suite, une modélisation thermique et mathématique sur le capteur solaire plan a été détaillée. Une description générale sur le bilan thermique qui est basée sur les modèles mathématiques adoptés pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur de l'air dans le conduit d'un capteur solaire a air avec un absorbeur incliné a été faite.

Chapitre III : Modélisation numérique du système

III.1. Introduction

Notre travail porte sur la simulation numérique des écoulements avec échanges de chaleur dans le boîtier d'un capteur solaire à air. Les calculs sont basés sur la méthode des volumes finis dont nous allons présenter les grands principes.

La mise en œuvre de la méthode nécessite une préparation (discrétisation, configuration de diverse conditions et paramètres...) dont nous en ferons une brève présentation en fin de chapitre.

III.2. Le calcul numérique (modélisation et simulation)

Le modèle mathématique constitué par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation dans un système d'équations algébriques qui sera par la suite résolu par diverses méthodes de résolution matricielles.

III.2.1. Principe du calcul numérique

Le principe du calcul numérique est illustré à la figure (III-1). Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- méthodes des différences finies (MDF) ;
- méthodes des éléments finis (MEF) ;
- méthodes spectrales (MS) ;
- méthodes des volumes finis (MVF).

L'algorithme de résolution numérique implique la méthode d'intégration temporelle et de découplage, comme par exemple, les algorithmes SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC et PISO.

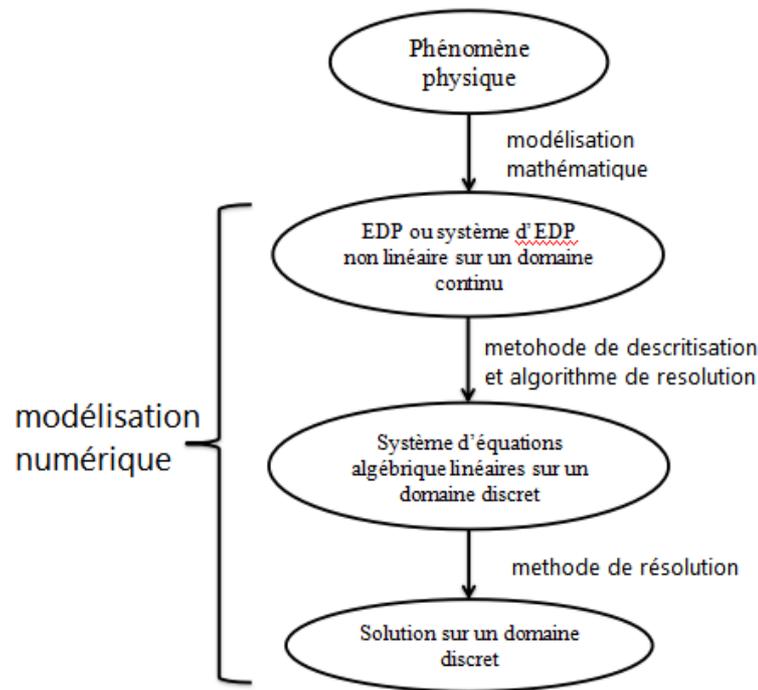


Figure III- 1 : Le principe du calcul numérique.

Le calcul numérique permet d'aboutir à **une solution numérique** pour presque tous les problèmes pratiques ayant un modèle mathématique avec un coût souvent très faible.

Pour notre présente étude, nous avons choisi la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple, qu'elle garantisse la conservation de masse et de la quantité de mouvement dans chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul et qu'elle soit applicable pour les géométries complexes.

III.2.2. Rappel sur la méthode des volumes finis (MVF)

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow)[23]. C'est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

- **Ses avantages**
 - Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage ;
 - Mise en œuvre relativement facile ;
 - Applicable aux géométries complexes;
 - Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande)

- **Ses inconvénients**
 - Moins précis que les méthodes spectrales.
 - les pas de l'algorithme numérique
 - Le domaine d'analyse (de calcul) est divisé en volumes finis (génération du maillage) ;
 - L'intégration formelle des équations sur tous les volumes de contrôle ;
 - La discrétisation, qui implique la substitution des différentes approximations de type différences finies pour les termes intégrés en représentant différents processus d'écoulement comme la convection, la diffusion et le terme source. Le résultat est la conversion des intégrales dans un système d'équations algébriques ;
 - La résolution du système d'équations algébriques par l'utilisation d'une méthode itérative.

III.2.2.1. Subdivision du domaine d'étude (maillage)

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud, où on trouve la variable P et les composantes u et v de la vectrice vitesse qui se trouvent au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points (nœuds).

Ainsi, un élément de volume de contrôle est défini autour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires pression et températures sont stockées dans le nœud P du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockés au milieu des segments reliant les nœuds. L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de vitesse.

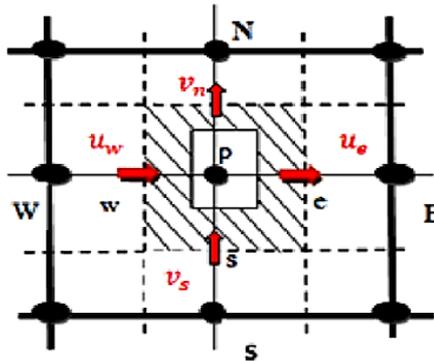


Figure III- 2 : Schéma d'un maillage [22]

III.2.2.2. Schémas de discrétisation :

Le schéma d'approximation est nécessaire pour représenter l'évolution des différents paramètres physiques. Chaque schéma a ces avantages et ces inconvénients, il y'a des schémas qui n'approchent pas la solution analytique, mais d'autres l'approchent, mais ils sont coûteux et prennent beaucoup de temps lors de la résolution.

- **Schéma centré:**

Ce schéma est généralement employé pour des écoulements ayant des nombres de RAYLEIGH faibles. L'interpolation linéaire pour obtenir la variation de la grandeur physique Φ entre deux nœuds successifs correspond aux différences centrées des développements en série de Taylor à deuxième ordre.

- **Schéma Upwind (décentré amont):**

Mis au point par REES (1952) et terminé par WOLPSHTEIN (1969) [24] . Le schéma upwind est construit pour éviter de dire que si la convection est forte dans une direction, l'information en un point peut venir de l'aval (comme c'est le cas avec le schéma centré).

Les termes de diffusion sont toujours traités de la même manière que le schéma centré (variation linéaire de Φ) puisque la quantité de chaleur convective est plus importante que celle diffusée.

● **Le schéma hybride :**

Mis au point par SPALDING (1972) [24], Le schéma hybride est une combinaison améliorée entre le schéma centré et le schéma upwind

● **Schéma power law (loi de puissance) :**

Mis au point par PATANKAR (1979), ce schéma essaye d'approcher encore mieux à la solution exacte

- Les schémas Power Law et exponentiel sont tellement proches qu'ils ne peuvent pas être comparés graphiquement.

- Le schéma Power Law est recommandé pour les problèmes de convection - diffusion [23] .

Tableau III-1 : A (|P|) pour différents schémas

| Schémas | Expressions de la formule A(P _e) |
|---------------------------------|--|
| Différences centrées | $1 - 0.5 P_e $ |
| Différences décentrées (upwind) | 1 |
| Hybride | $ (1, (1 - 0.5 P_e) $ |
| Loi de puissance (power low) | $ (1, (1 - 0.5 P_e)^5) $ |

Les schémas présentent les caractéristiques suivantes :

- Tous les schémas, sauf le schéma centré pour $P_e > 2$, donnent une solution physiquement acceptable .

- le nombre de PECLLET influe sur le comportement des schémas, il faut prendre un maillage fin afin d'avoir $P_e < 2$ et pouvoir ainsi de choisir le schéma centré.

- Cependant et vu la diversité des problèmes physiques , il est nécessaire d'avoir un nombre élevé de volumes de contrôle et donc des coûts de calcul très élevés.

- Le schéma Upwind est non approprié pour de faibles valeurs de PECLLET.

- Pour les grandes valeurs de PECLLET, la diffusion est surestimée.

- Pour le schéma exponentiel, son inconvénient est le coût machine élevée, et est aussi non approprié pour les situations à deux dimensions et trois dimensions.

- Le schéma hybride a pour inconvénient une erreur maximale lorsque PECLET prend la valeur deux.

Le schéma de la loi de puissance est le schéma le plus recommandé vu qu'il s'approche de la valeur exacte et il est plus précis et plus stable [24].

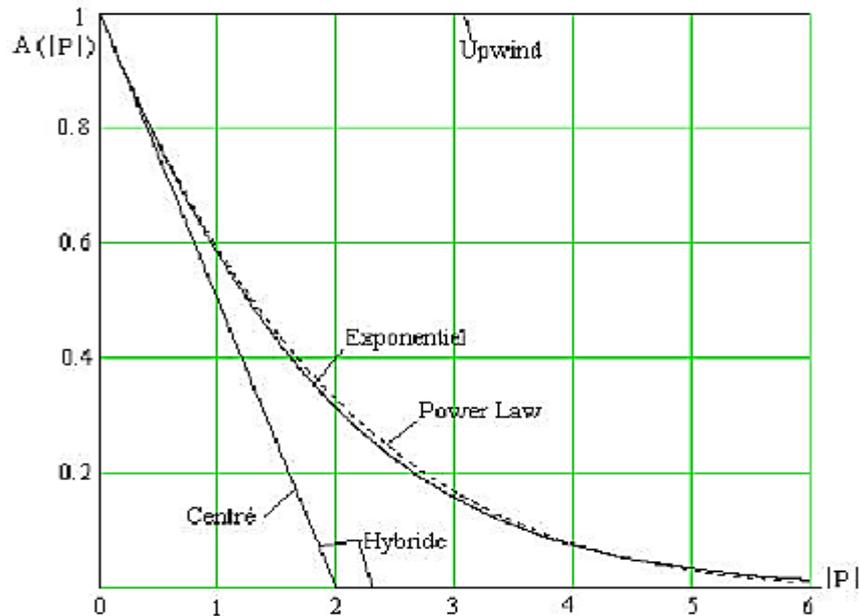


Figure III- 3 : La fonction $A(|P|)$ pour différents schémas [25]

III.2.2.3. Algorithmes de résolution pour le couplage pression vitesse :

a. Algorithme SIMPLE :

La solution du système d'équations couplées vitesse-pression nécessite un algorithme de calcul spécial qui est l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Les étapes principales de l'algorithme sont présentées dans ce qui suit :

- Ajustement du maillage, des conditions aux frontières et construire la grille décalée pour les composantes de la vitesse.
- il donne le champ de pression estimé p^* .
- il donne le champ de vitesse estimé U^* et V^* .
- il calcule les coefficients donnés par les équations discrétisées.

- il calcule les nouvelles composantes de vitesse U^* et V^* par résolution des équations de conservation et quantités de mouvement.

- il calcule le champ de pression corrigé P par la somme de P' avec P^* , où P' est obtenu par l'équation de correction de pression afin d'améliorer le champ de vitesse.

- il calcule les composantes de la vitesse U et V .

- il calcule le champ de température à partir de l'équation de l'énergie.

- il vérifie le test de convergence. S'il est satisfait, il arrête la procédure, sinon il retourne vers la deuxième étape avec :

$P^* = P$; $U^* = U$; $V^* = V$, il répète toutes les procédures jusqu'à la convergence.

b. Algorithme SIMPLER :

Il existe un autre algorithme nommé SIMPLER (Simple Revised) qui peut donner une convergence vers la solution exacte plus rapidement que l'algorithme SIMPLE. Cet algorithme consiste à combiner judicieusement l'équation de continuité et les équations de Navier-Stokes pour déterminer le champ de pression et le champ de vitesse. Cette procédure permet de définir la pseudovitesse à partir de l'équation de quantité de mouvement discrétisée, Les étapes principales de cet algorithme sont présentées comme suit :

- Même procédure que la première étape de SIMPLE.

- il donne un champ de vitesse initiale.

- il calcule les pseudo-vitesses après avoir calculé les coefficients donnés par les équations discrétisées.

- il calcule les coefficients de l'équation de pression pour obtenir le champ de pression P .

- il calcule les composantes U^* et V^* à partir des équations des quantités de mouvement avec $P^* = P$.

- il calcule P' .

- il corrige le champ de vitesse.

- il calcule le champ de température avec la résolution de l'équation de l'énergie discrétisée.

- il retourne à la deuxième étape jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints.

c. Algorithme SIMPLEC :

La méthode SIMPLEC (SIMPLE Consistent). Cette dernière méthode se différencie de la méthode SIMPLE par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (correction) de pression proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution.

III.3. Les différentes étapes de l'approche numérique

On peut résumer les différentes étapes de cette approche numérique dans ce qui suit :

Création de la géométrie et son maillage: ces deux étapes sont réalisées au niveau du "Gambit". Un maillage fin (serré proche des parois) doit être choisi à cause des gradients de vitesse et de pression élevée proche des parois.

Définition des conditions aux limites: De même cette étape est aussi réalisée en utilisant le "Gambit".

Résolution du problème avec le code FLUENT

III.3.1. Présentation du logiciel Gambit

Gambit est un logiciel industriel permettant la construction des géométries et leurs maillages en 2D ou 3D. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels comme par exemple Fluent.

III.3.1.1. Description du panel général

Le panel général de Gambit est monté sur la figure :

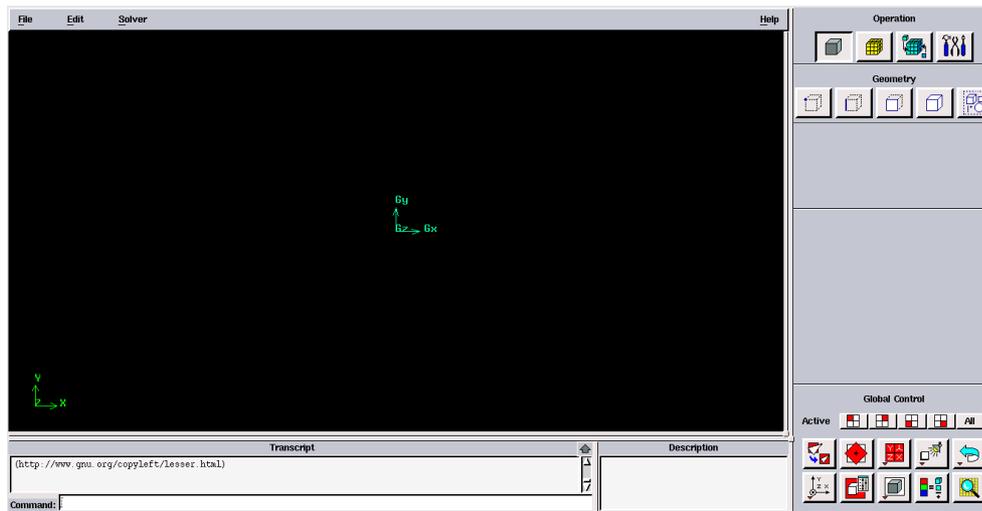


Figure III- 4 : panels généraux du logiciel Gambit.

III.3.1.2. Choix de type de maillage

a) Maillage structuré (Quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie en outils bloque

b) Maillage non structuré (Tri/Tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

c) Maillage hybride

Maillage généré par mélange d'éléments de différents types triangulaires ou quadrilatéraux en deux dimensions, tétraédriques, prismatiques ou pyramidales en trois dimensions.

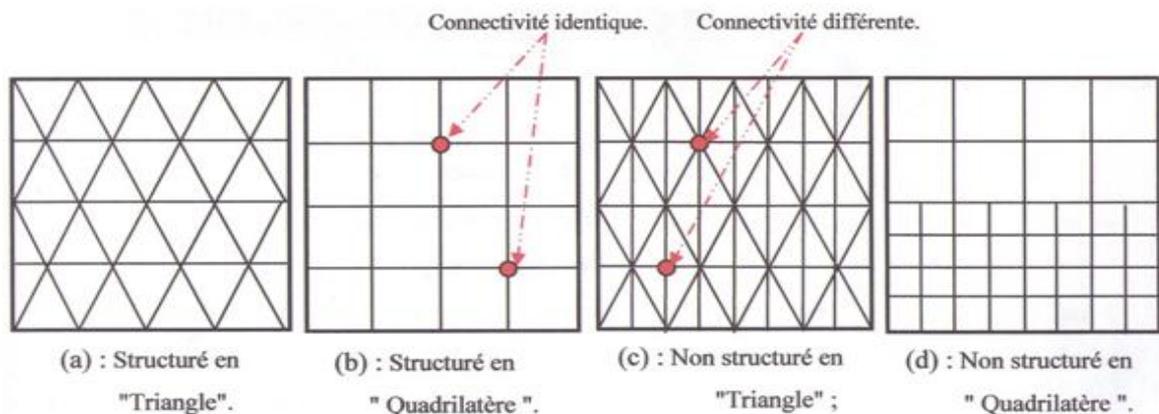


Figure III- 5 : Exemple de maillage

III.3.2. Présentation du code fluent

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans transfert thermique. Le logiciel « Fluent » utilise la méthode des volumes finis. Il est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un seul PC de travail ou sur des machines en parallèle, pour une exécution plus efficace. Le package fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents.

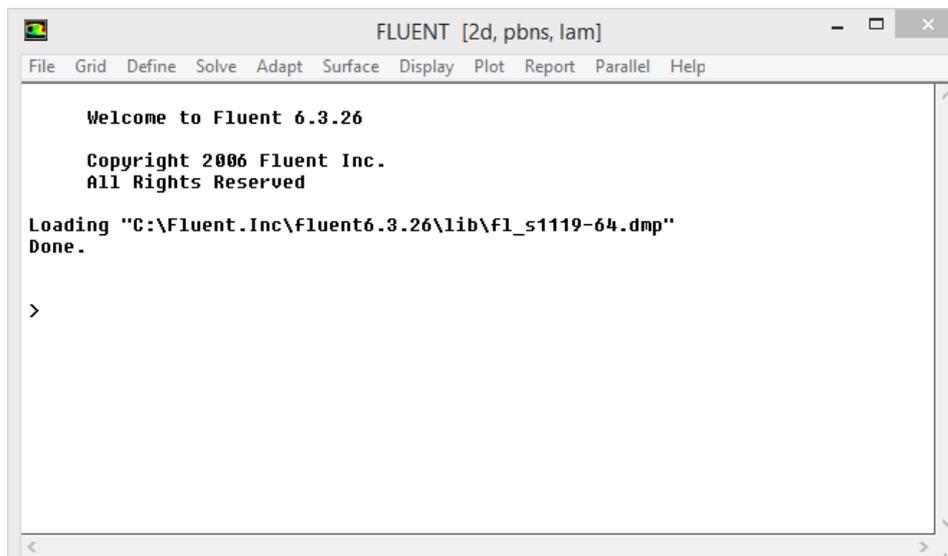


Figure III- 6 : Vue globale de Fluent.

III.4. Création du maillage adopté pour les calculs par Gambit

La géométrie du problème est un rectangle de longueur 1852 mm et de hauteur 78 mm

On se retrouvera avec 8 zones pour les conditions aux limites :

L'entrée et la sortie d'air seront modélisées par une zone de 10 mm

- L'entrée d'air à gauche, de type velocity-inlet.
- La sortie d'air à droite, de type pressure -outlet.
- Les parois horizontales plus les parois verticales, de type wall.

III.4.1. Position du problème

Il s'agit de simuler l'écoulement dans une enceinte ouverte, avec entrée et sortie d'air ou le transfert de la chaleur s'effectue par convection mixte. Les dimensions et paramètres des problèmes sont inspirés de **F. Mokhtari**, **D. Semmar** et **A. Hamid** à l'aide des hypothèses simplificatrices indiquées précédemment.

La figure ci-dessous montre une vue du capteur expérimental avec l'absorbeur incliné muni d'une fente. Notre étude s'intéresse particulièrement aux caractéristiques de cette fente.

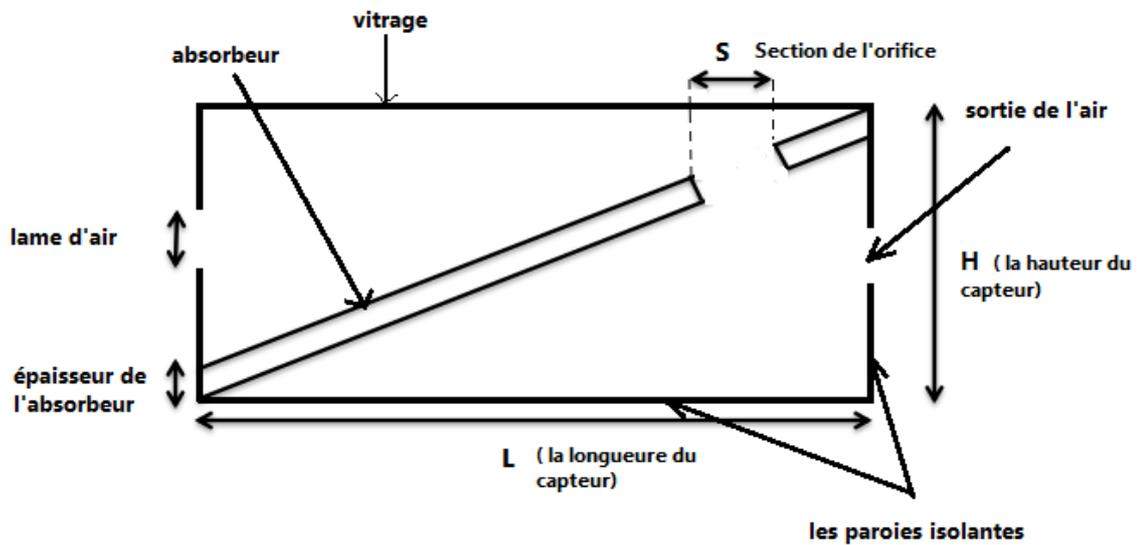


Figure III- 7 : La géométrie de notre problème

III.4.2. Génération du maillage

Le domaine sera maillé en éléments Tri (triangulaire) les figures suivantes présentent le maillage adopté pour notre simulation ainsi un zoom au niveau des parois :

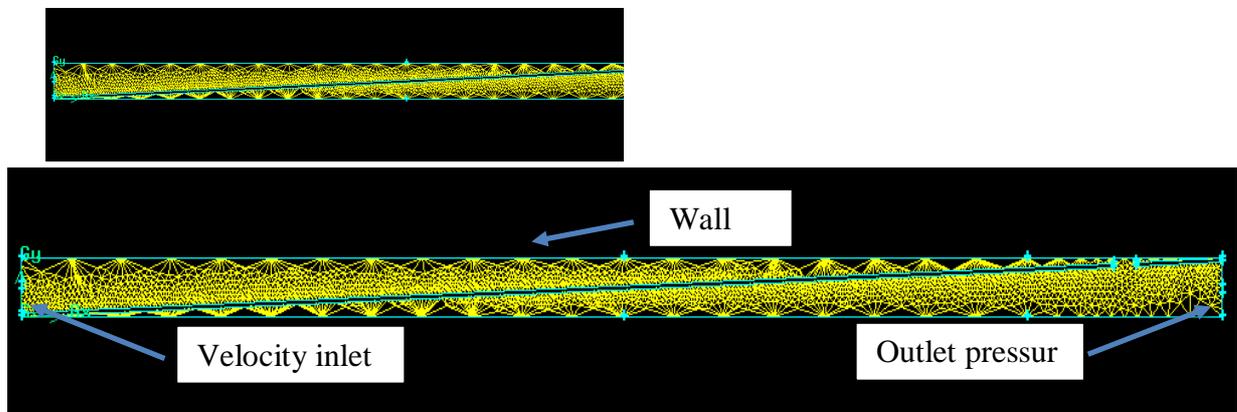


Figure III- 8 : Conditions aux limites imposées sur gambit

Le maillage peut-être alors exporté dans un fichier pour lecture avec FLUENT.

III.4.3. Étude d'indépendance du maillage

Avant l'adoption du maillage pour la simulation, on doit vérifier que sa densité n'aura pas d'influence sur les résultats des calculs ; donc la méthode à suivre consiste à choisir un nombre de nœuds puis le raffiner de plus en plus en multipliant le nombre de nœuds par 2 et en comparant les résultats donnés pour chacun des maillages.

Les résultats obtenus donneront une courbe asymptotique, il suffira alors de choisir un nombre parmi ceux qui donnent les résultats les plus rapprochés avec la plus petite puissance de calcul.

Les résultats obtenus pour un écoulement de 1 m/s sont donnés au tableau suivant :

Tableau III-2 : Les températures de sortie en fonction du nombre des nœuds

| Nombre de nœuds de maillage | Température de sortie (K) |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1080 | 401 |
| 2500 | 406 |
| 4500 | 406 |
| 7500 | 406 |

En comparant entre ces maillages on ressort que celui de **2500 nœuds** offre le meilleur compromis en termes de temps de calcul et d'indépendance des résultats et est suffisant pour mener les simulations.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un rappel sur la méthode des volumes finis ainsi que les schémas et les algorithmes utilisés ont été présentés. Ensuite une présentation des différentes approches du calcul numérique commençant par une présentation du logiciel gambit et les types du maillage utilisé puis la présentation du code fluent et les étapes suivies lors de la simulation en détail.

En fin de chapitre, nous avons mis en applications la méthode et avons déterminé le maillage à utiliser pour la suite du travail.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats de l'étude numérique d'un capteur solaire à air à configuration C. L'objectif de notre travail est de voir l'influence de la position de la fente, de la section de la fente et du débit d'air sur l'efficacité thermique du capteur solaire.

IV.2. Estimation de la température de vitrage

Avant de commencer la simulation numérique, on doit d'abord estimer les températures de vitrage, les températures de l'absorbeur et l'éclairement solaire sur le plan incliné afin de les introduire dans le code de calcul fluent.

Notre étude sera basée sur l'étude expérimentale menée par **F. Mokhtari et D. Semmar**

Les résultats de nos calculs sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau IV-1 : Température du vitrage

| Temps | Éclairement (W/m^2) | $T_{abs(inferieure)}$ (K) | $T_{abs(superieure)}$ (K) | $T_{abs(moyenne)}$ (K) | $T_{vitrage}$ (K) |
|-------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 11h | 890 | 358 | 367 | 362.5 | 324.6 |
| 12h | 970 | 361 | 371 | 366 | 326 |
| 13h | 990 | 359 | 372 | 365.5 | 326 |
| 14h | 920 | 358 | 373 | 365.5 | 326 |
| 15h | 790 | 358 | 366 | 362 | 324.4 |
| 16h | 600 | 352 | 357 | 354.5 | 321 |

Ensuite on va estimer le l'éclairement net I_{net} utilisé par l'absorbeur:

On doit d'abord calculer: le Prandtl (Pr) \longrightarrow le Grashof (Gr) \longrightarrow

Nusselt $\longrightarrow hc_{pv}$ \longrightarrow le flux ϕ \longrightarrow l'éclairement net (I_{net})

Les résultats sont obtenus dans le tableau suivant :

Tableau IV-2 : L'éclairement net

| Temps | Gr (Gr). 10^{10} | Nu | hc_{pv} | ϕ (W/m ²) | I_{net} (W/m ²) |
|-------|-----------------------|--------|-----------|-------------------------------|----------------------------------|
| 11h | 9.2 | 137.52 | 1.8 | 44.28 | 845.75 |
| 12h | 9.72 | 139.2 | 1.82 | 47.33 | 922.7 |
| 13h | 9.72 | 139.2 | 1.82 | 47.33 | 942.6 |
| 14h | 9.72 | 139.2 | 1.82 | 47.33 | 872.7 |
| 15h | 9.2 | 137.5 | 1.8 | 44.1 | 745.1 |
| 16h | 7.85 | 132.81 | 1.74 | 36.54 | 563.5 |

Le solveur de Fluent est configuré à l'aide de ces résultats en utilisant le maillage généré précédemment. L'exécution d'une session de calcul prend plusieurs minutes au cours desquelles le critère de convergence est vérifié entre chaque itération pour arrêter les calculs. La figure ci-dessous montre un exemple des résidus de calcul obtenus avant la convergence.

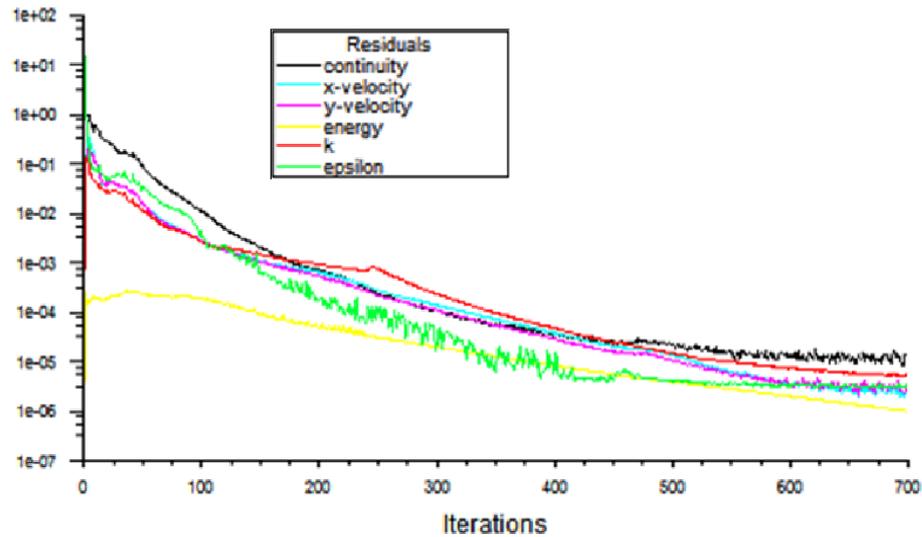


Figure IV- 1 : Exemple du tracé des résidus d'une session de calcul

IV.3. Vérification des résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, on va tester notre modèle et tenter de retrouver les résultats expérimentaux obtenus par **Mokhtari et D. Semmar** ; pour une vitesse d'entrer égale à 2.6 m/s de 11h à 16h ; les températures de sortie numériques et expérimentales sont montées ci-dessous :

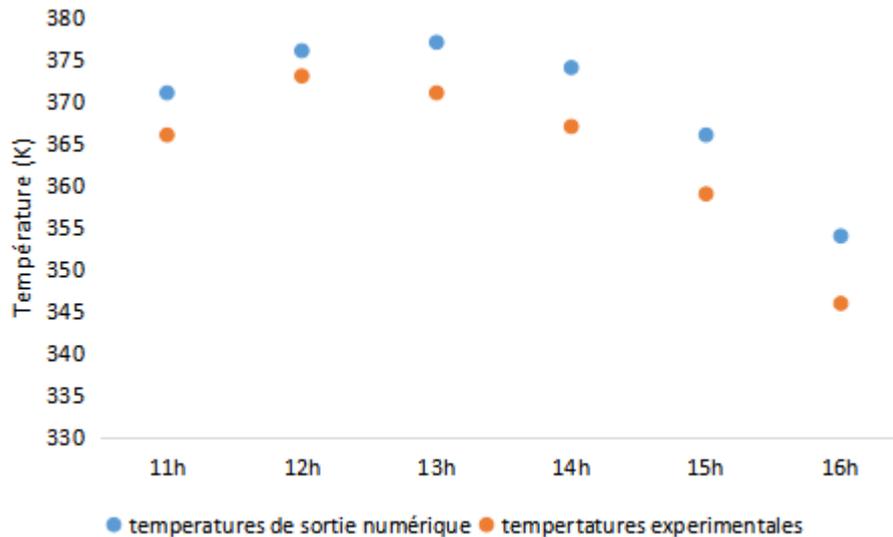


Figure IV- 2 : Comparaison entre les températures numériques et expérimentales

Les résultats montrent une concordance satisfaisante avec les mesures. À titre d'exemple, la valeur expérimentale maximale est de **373 K à 12 heures**, correspondant ainsi à une valeur numérique maximale égale à **377 K à 12 heures**, soit un écart de **1%**. L'explication la plus évidente est celle de la nature de l'isolation thermique, car dans l'expérience les parois ne peuvent être adiabatiques.

D'autres différences (expérience/ numérique) entrent forcément en jeu, comme la distribution des températures sur l'absorbeur supposée uniforme (cas idéal) dans le modèle numérique, et/ou la température de la vitre (non fournie) dont l'estimation est forcément en écart par rapport à la réalité.

En définitive, sur la base de l'écart des résultats de sortie, on peut dire que le modèle numérique décrit avec suffisamment de pertinence les phénomènes thermiques du capteur et permet de poursuivre l'étude.

IV.4. Influence de la position de la fente

Dans ce paragraphe nous allons examiner l'effet de la position de la fente sur la température. Pour cela nous allons étudier trois cas : Fente en haut de l'absorbeur, au milieu et en bas de celui-ci, la figure montre les géométries en détail. La comparaison entre les trois cas déterminera le meilleur emplacement de la fente.

IV.4.1. La fente en haut

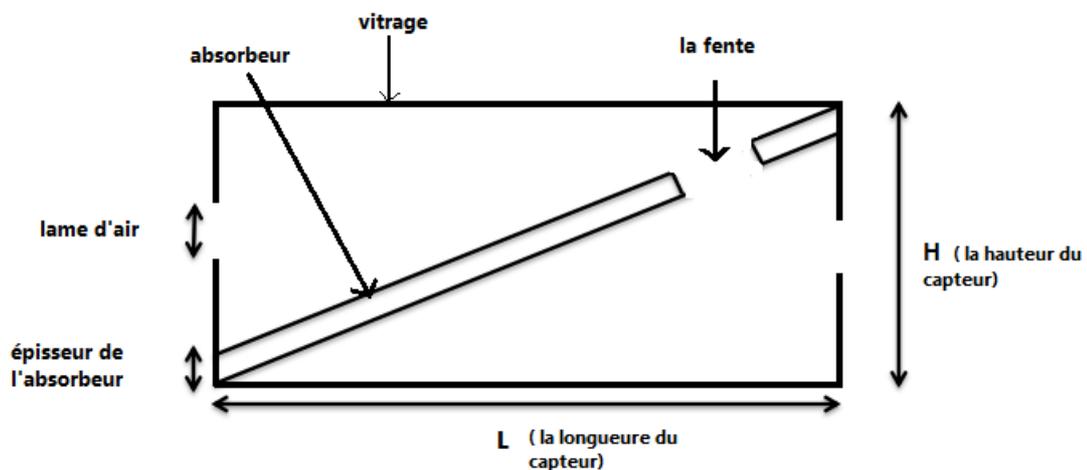


Figure IV- 3 : Schéma de la fente en haut

IV.4.1.1. Contour des températures et des vitesses

La figure ci-dessous montre les contours de température et de vitesse pour le cas de la fente positionnée en haut. L'écoulement dans ce cas semble se réchauffer progressivement en avançant dans le boîtier sur la surface supérieure de l'absorbeur. Ici on voit l'effet de la zone de stagnation (S) située dessous, celle-ci accumule l'énergie thermique et la transmet à l'écoulement.

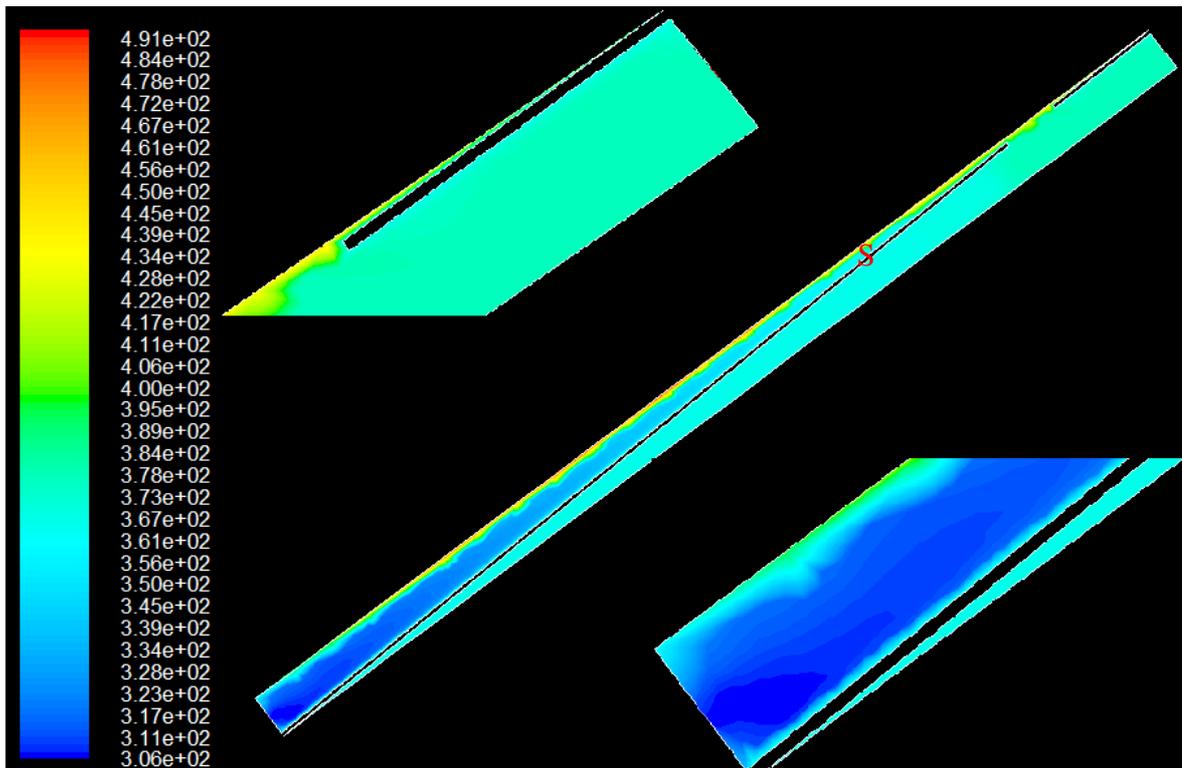


Figure IV- 4 : Contour de température de la fente en haut

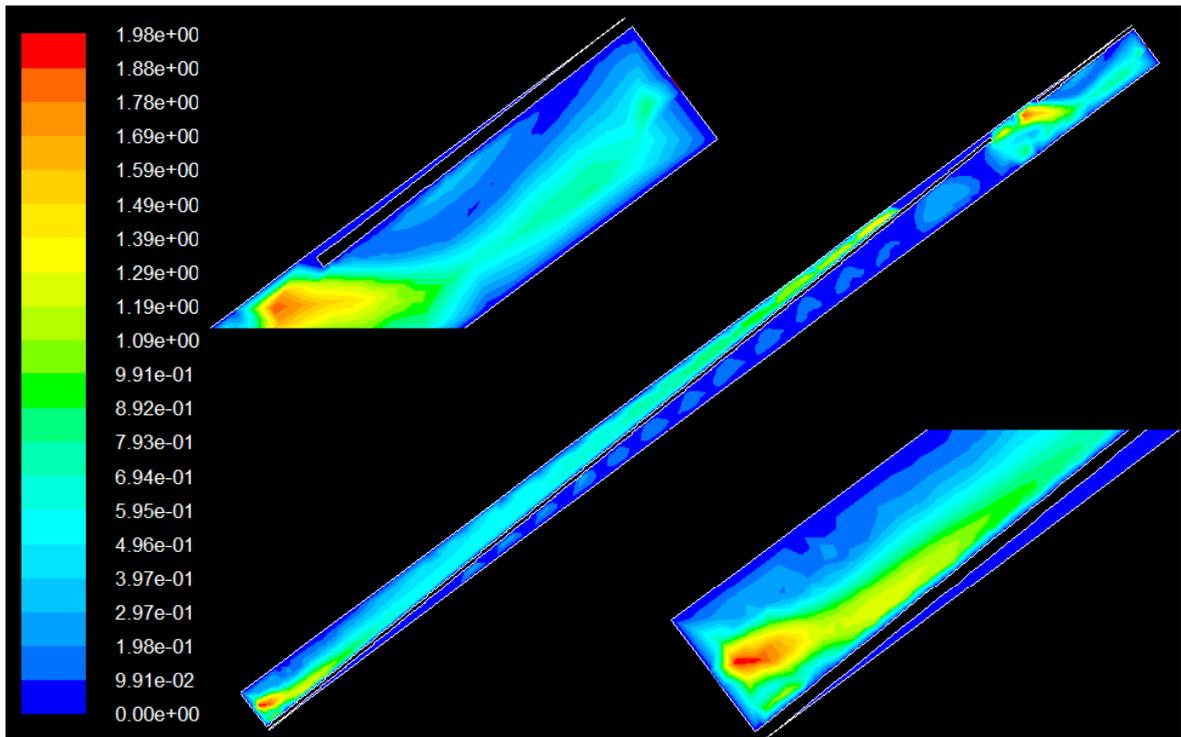


Figure IV- 5 : Contour des vitesses pour la fente en haut

IV.4.1.2. Profil des températures de sortie

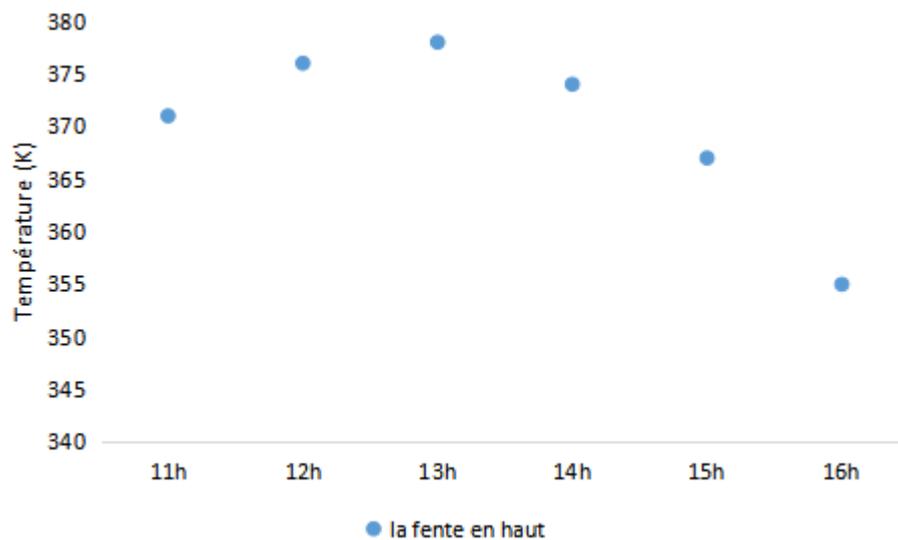


Figure IV- 6 : Température de sortie de la fente en haut

La courbe des températures de sortie montre un maximum à 13h et un minimum vers 16h avec une allure similaire aux résultats expérimentaux.

IV.4.2. La fente au milieu

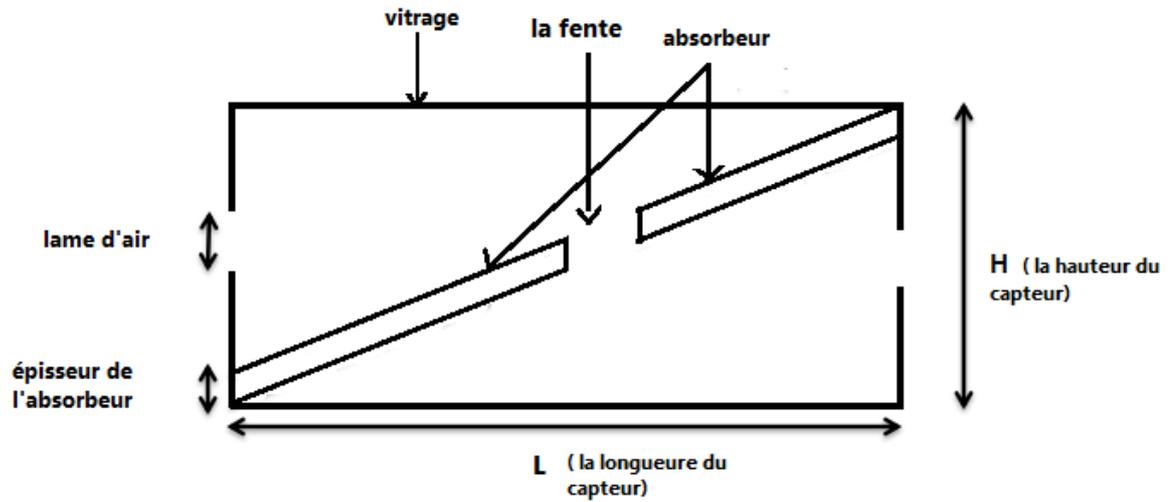


Figure IV- 7 : Schéma de la fente au milieu

IV.4.2.1. Contour des températures et des vitesses

La figure montre les contours de température et de vitesse pour le cas de la fente positionné en bas. Dans cette géométrie, l'écoulement passe sous l'absorbeur au milieu du boîtier, la zone de stagnation semble de taille inférieure et l'effet d'accumulation qu'elle procure aussi.

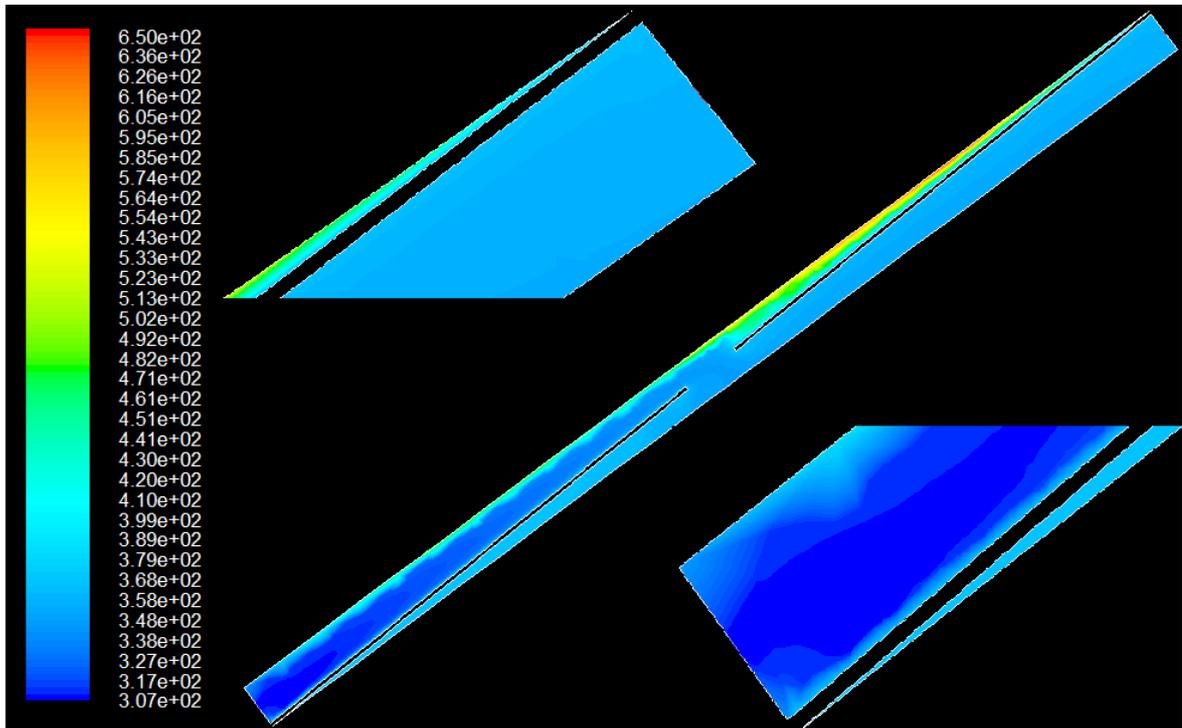


Figure IV- 8 : Contour de température de la fente au milieu

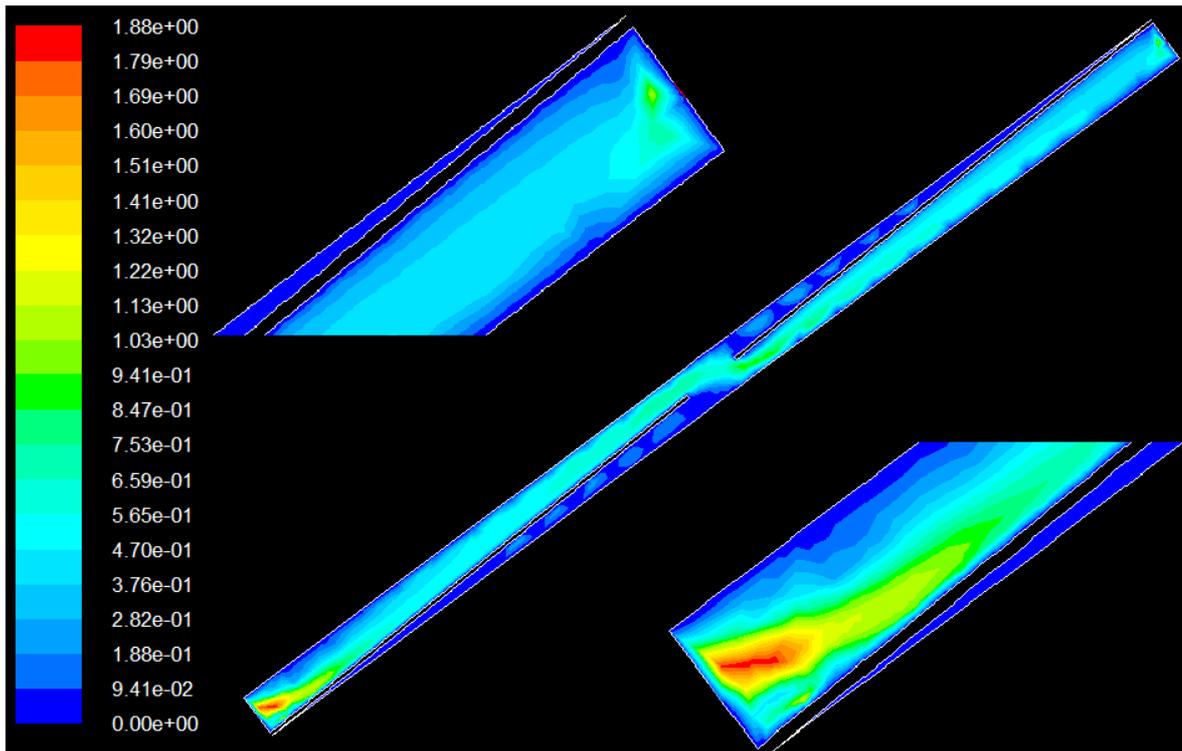


Figure IV- 9 : Contour des vitesses pour la fente au milieu

IV.4.2.2. Profil des températures de sortie

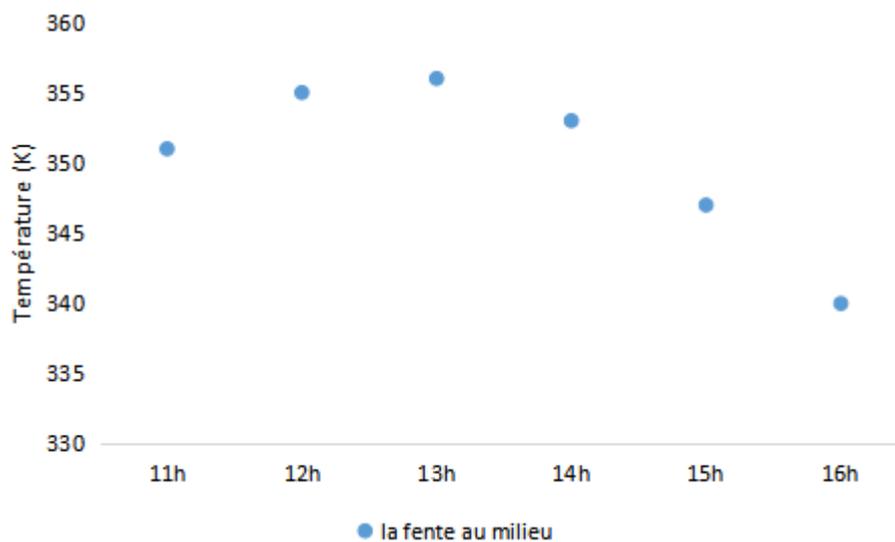


Figure IV- 10 : Profil de températures de sortie

L'allure de la courbe des températures de sortie est similaire aux cas précédents, le maximum simulé vers 13h étant de 355K est inférieur à la configuration de la fente (haut) ce qui tend à confirmer l'effet de réchauffement provoqué par une zone de stagnation importante.

IV.4.3. La fente en bas

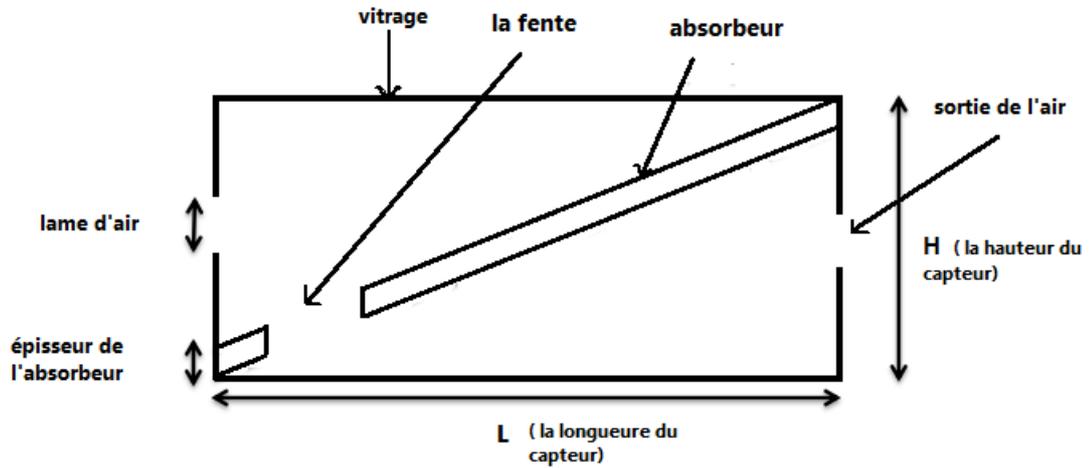


Figure IV- 11 : Schéma de la fente en bas

IV.4.3.1. Contour des températures et des vitesses

La figure montre une zone de stagnation équivalente au cas de la fente en haut. Cependant l'écoulement de l'air devient plus difficile puisqu'il a tendance à monter en haut du boîtier et évite ainsi la fente de passage. La figure suivante aide à visualiser cet effet.

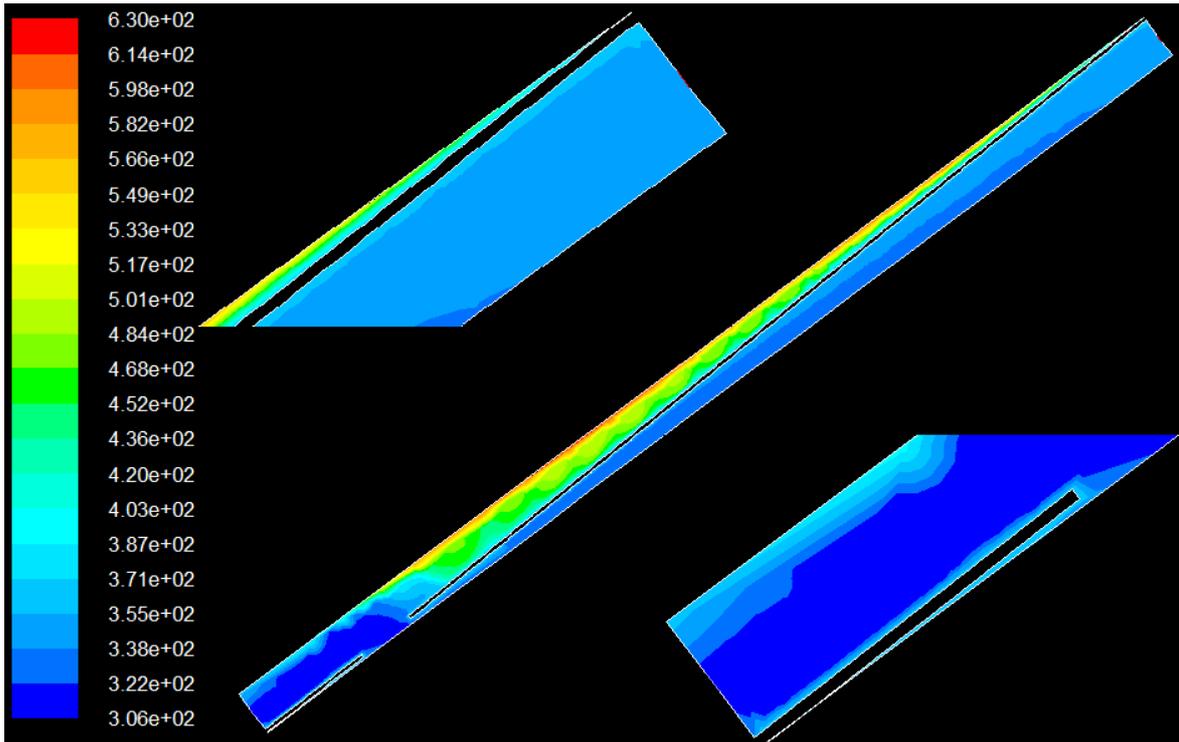


Figure IV- 12 : Contour de température de la fente en bas

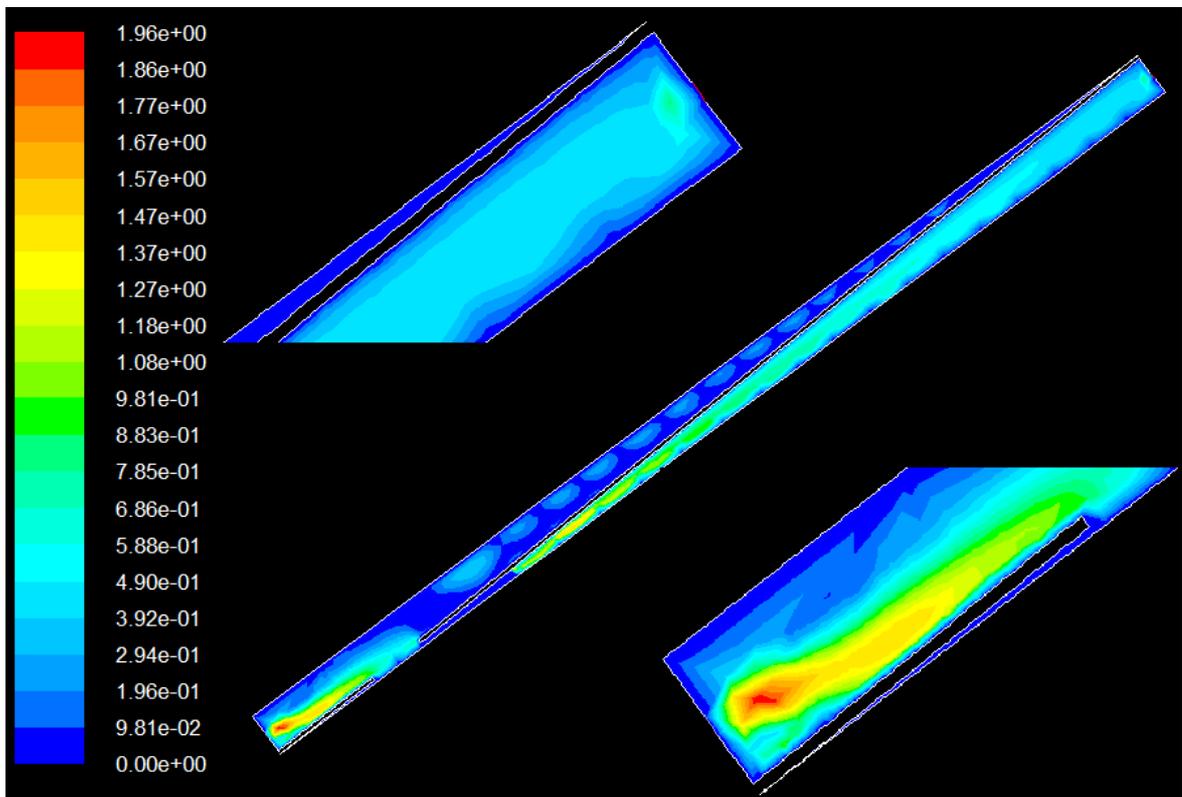


Figure IV- 13 : Contour des vitesses pour la fente en bas

IV.4.3.2. Profil des températures de sortie

La simulation montre que le passage de l'air sous l'absorbeur ne bénéficie pas à la température de sortie. Ce ci est montrer sur la courbe des températures.

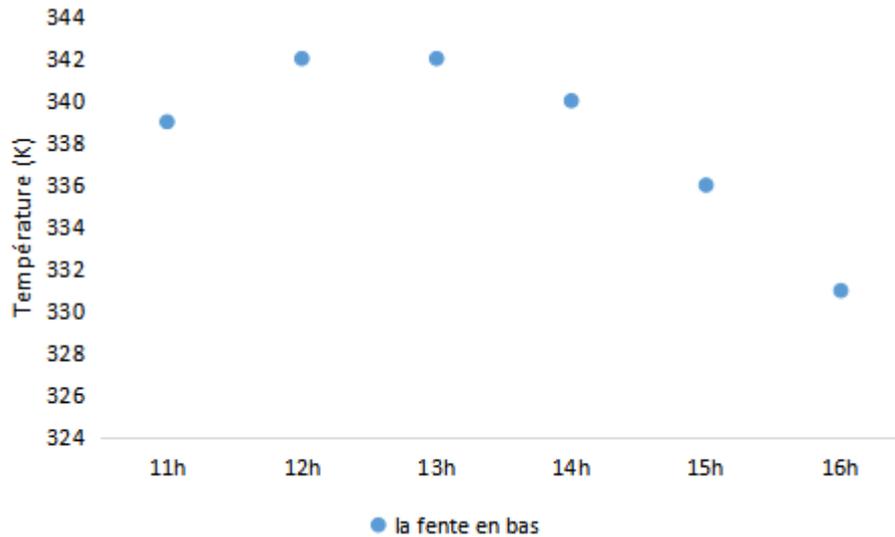


Figure IV- 14 : Profil de températures de sortie de la fente en bas

IV.4.3.3. Comparaison entre les trois positions

Ainsi on peut conclure que la meilleure position de la fente est celle du haut.

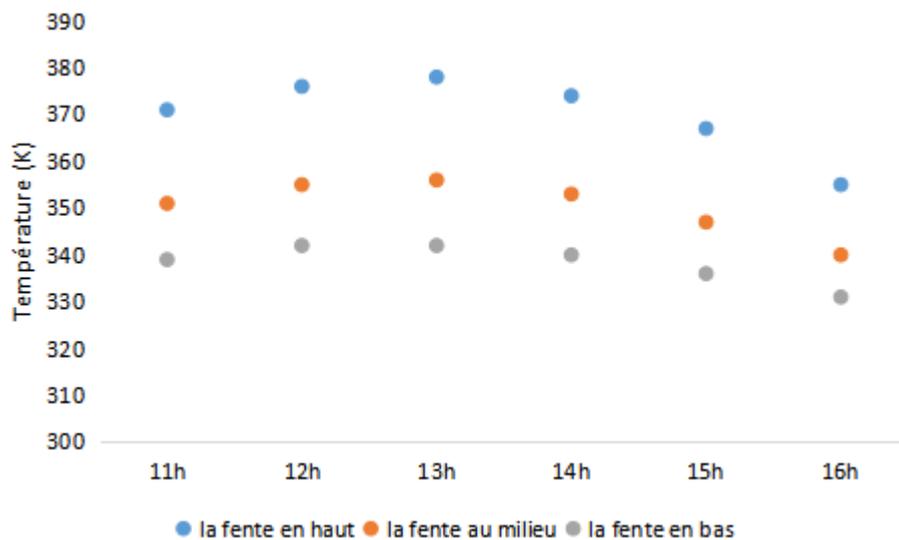


Figure IV- 15 : Comparaison des températures de sortie pour les trois cas

IV.5. Influence de la taille de la fente

Dans ce paragraphe on va faire l'étude de l'influence de la taille de la fente sur les températures de sortie du capteur. On va prendre la section de la taille prise dans l'étude expérimentale puis on va la multiplier fois 2, fois 3 et fois 4. Ensuite on va la diviser par 2, par 3 et enfin par 4.

Dans l'étude précédente, on a déduit que lorsque la position est en haut donnent de meilleurs résultats donc dans cette étude on prend la position en haut

Pour chaque cas on tracera les profils de température de sortie et compare entre eux afin de déterminer la taille optimale de la section.

IV.5.1. Augmentation de la taille de la fente

La figure ci-dessous montre un exemple des contours des vitesses et des températures pour le cas de taille de la fente x2 :

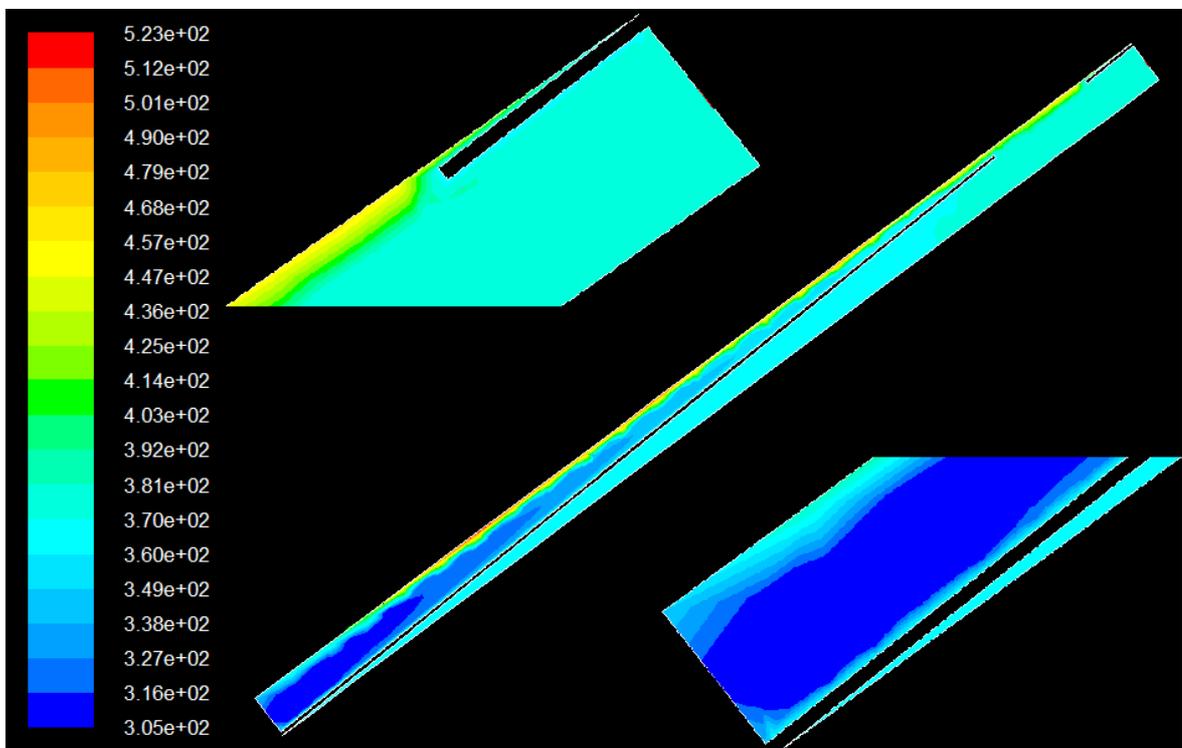


Figure IV- 16 : Contour de température cas de la taille x2

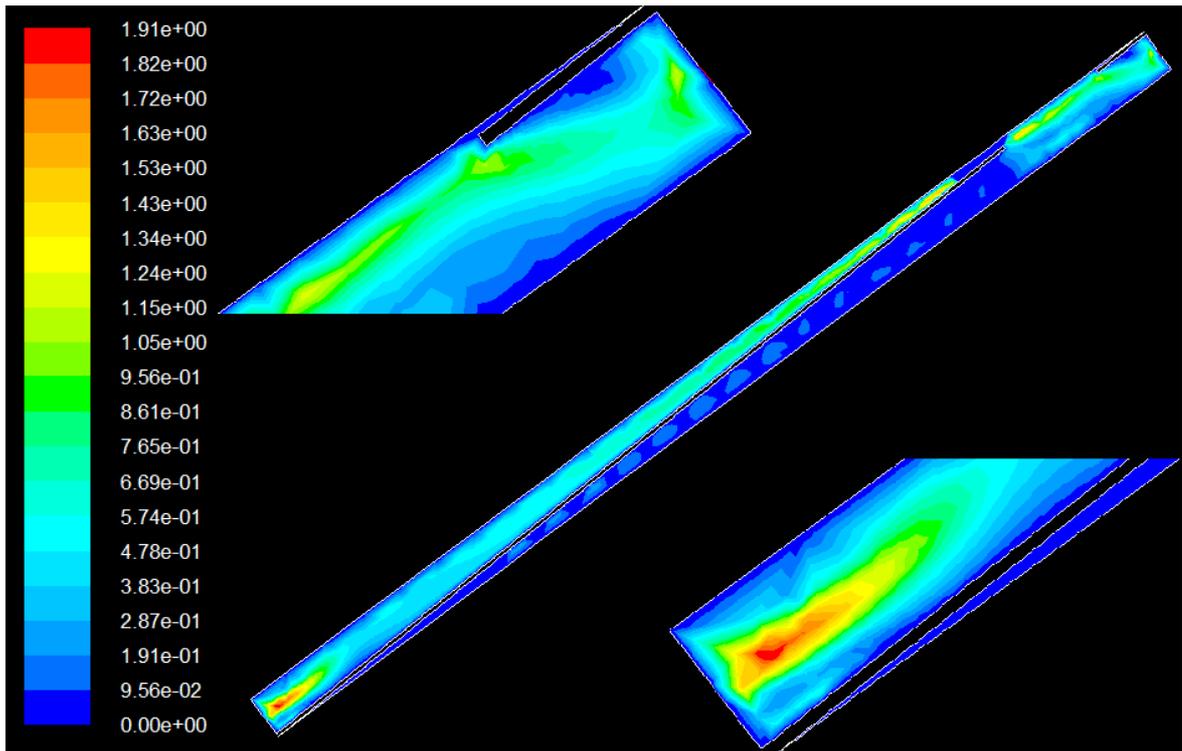


Figure IV- 17 : Contours des vitesses cas de la taille x2

IV.5.1.1. Comparaison des températures

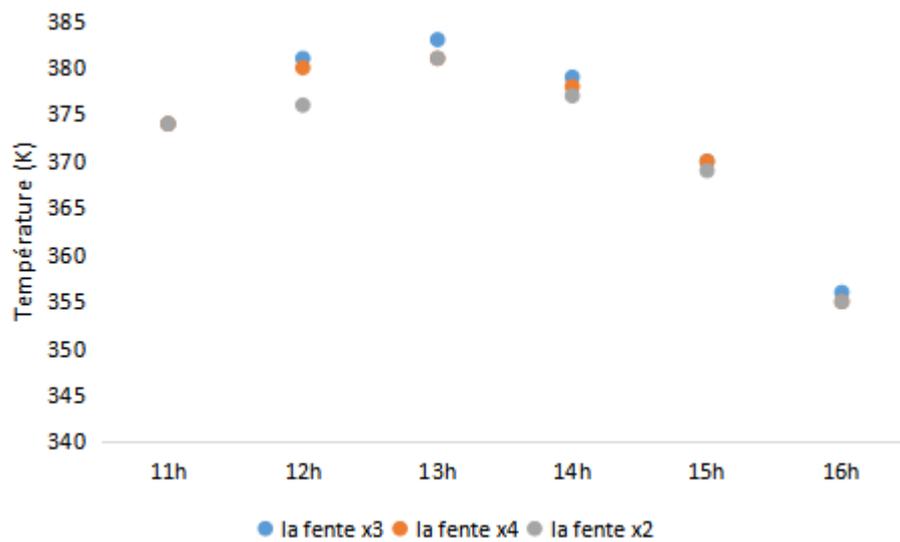


Figure IV- 18 : Comparaison des températures cas de l'augmentation de la section

D'après ce graphe on remarque une légère supériorité de profil des températures de (la fente x3).

Donc, lorsque la section de la fente est multipliée par 3 présente les meilleurs résultats et si on l'augmente plus ou si on la réduit on remarque que la température de sortie commence à décroître.

IV.5.2. Réduction de la taille de la fente

La figure ci-dessous montre un exemple des contours des vitesses et des températures pour le cas Taille de la fente /2 :

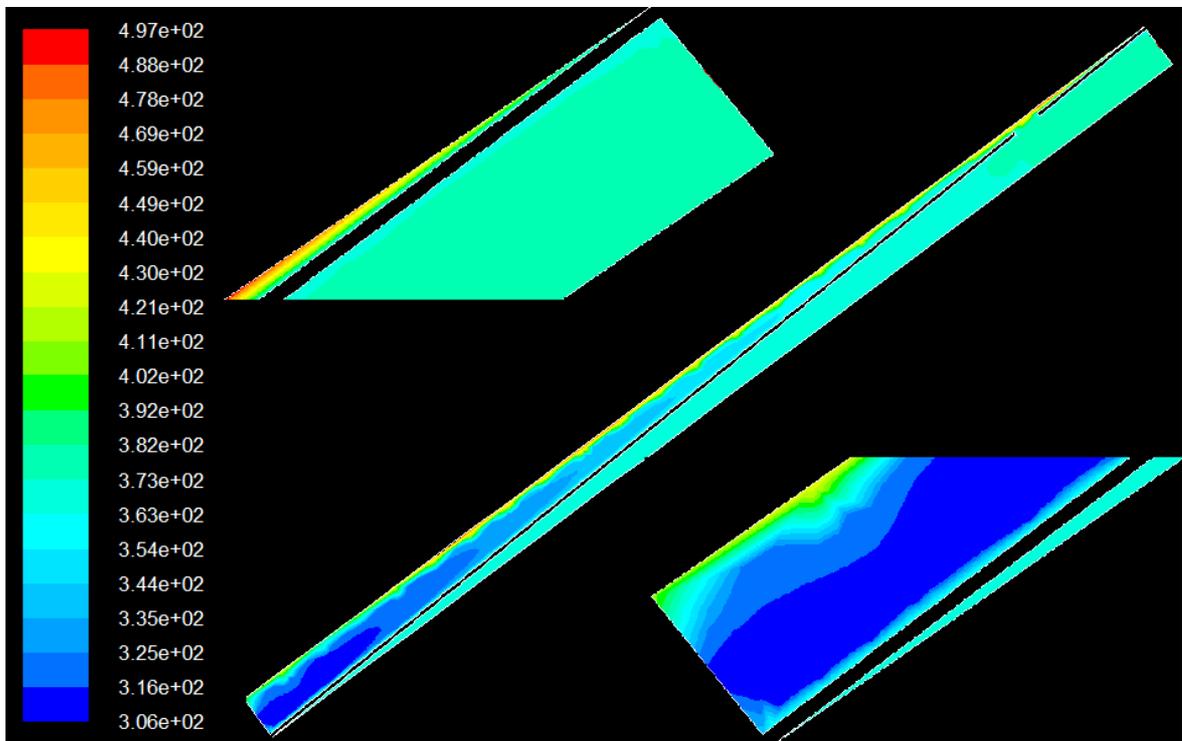


Figure IV- 19 : Contour de température pour le cas de la taille de la fente par 2

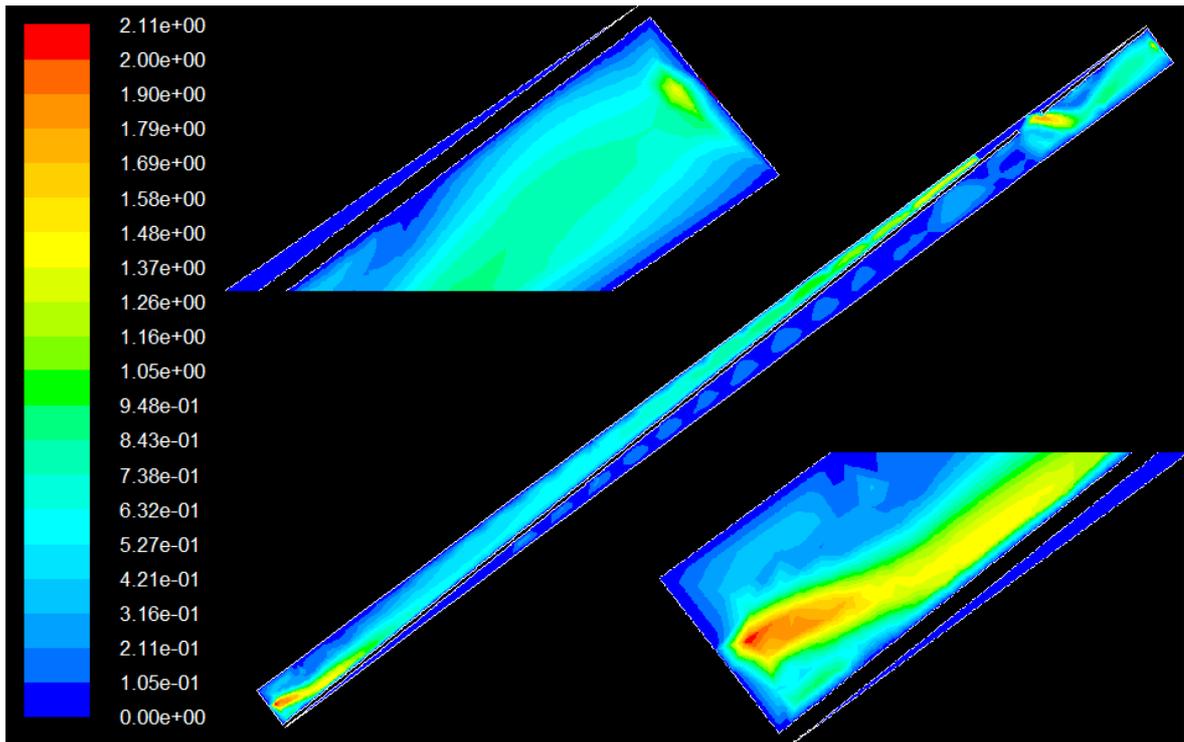


Figure IV- 20 : Contour des vitesses cas de la taille de la fente par 2

IV.5.2.1. Comparaison des températures

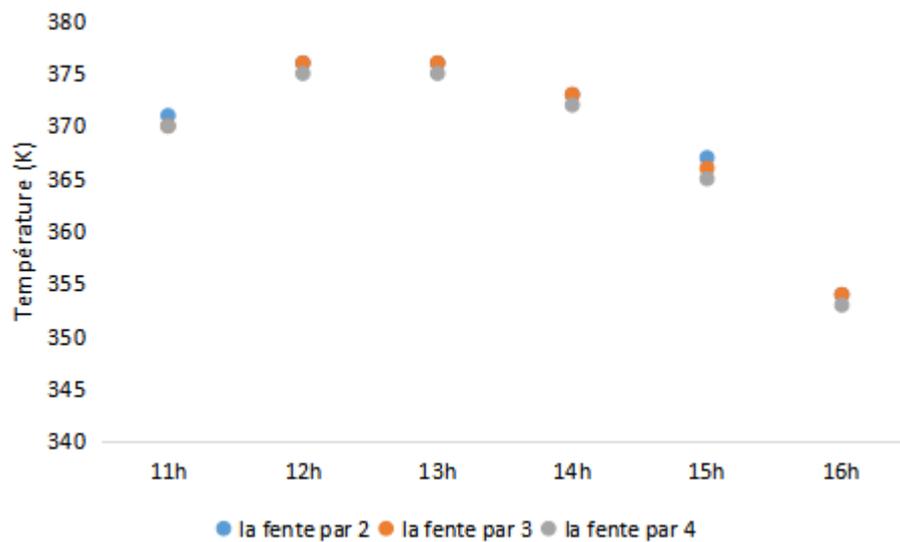


Figure IV- 21 : Comparaison entre les températures de sortie cas de réduction de la fente

Dans ce graphe on remarque que le profil de température de (la fente par 2) est légèrement supérieur a ceux de (la fente par 3) et (la fente par 4).

Donc ce cas présente de meilleurs résultats par rapport aux deux autres cas et chaque fois qu'on réduit la taille de la fente les températures de sortie diminuent.

IV.5.3. Détermination de la taille optimale

Pour déterminer la taille optimale de la section, on va prendre les tailles de la section qui présente les meilleurs résultats qu'on a déduits lors de l'étude précédente et on va les comparer avec la taille de la section prise lors de l'étude expérimentale.

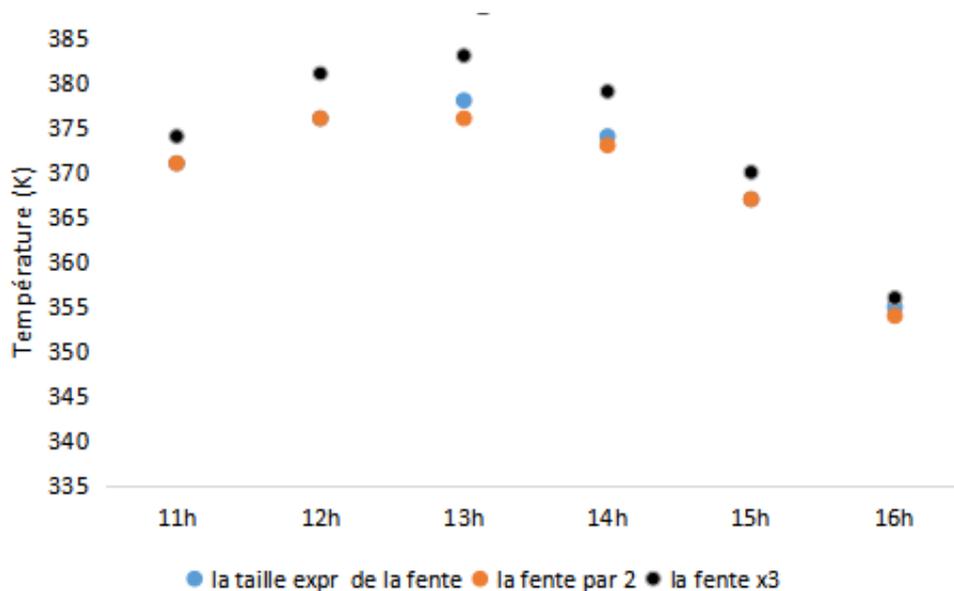


Figure IV- 22 : Comparaison des Profils de la température pour les meilleurs cas

Donc et d'après ce graphe on remarque que l'évolution de la température de sortie de (la fente x3) est nettement supérieure aux températures des autres cas (la taille expérimentale et la taille de la fente par 2).

Cette taille donne la meilleure rentabilité plus que toute autre taille alors c'est la taille optimale.

IV.6. Influence du débit

Dans cette partie on va faire l'étude de l'influence du débit d'air sur la rentabilité du capteur a air pour les deux modes: libre et forcé.

Pour cela on va prendre le capteur avec la taille de la fente optimale obtenue dans la partie précédente.

IV.6.1. Mode libre

Pour ce mode on va prendre la vitesse d'entrée égale à 0.9 m/s et on a eu les résultats suivants:

❖ **Contour des températures et des vitesses:**

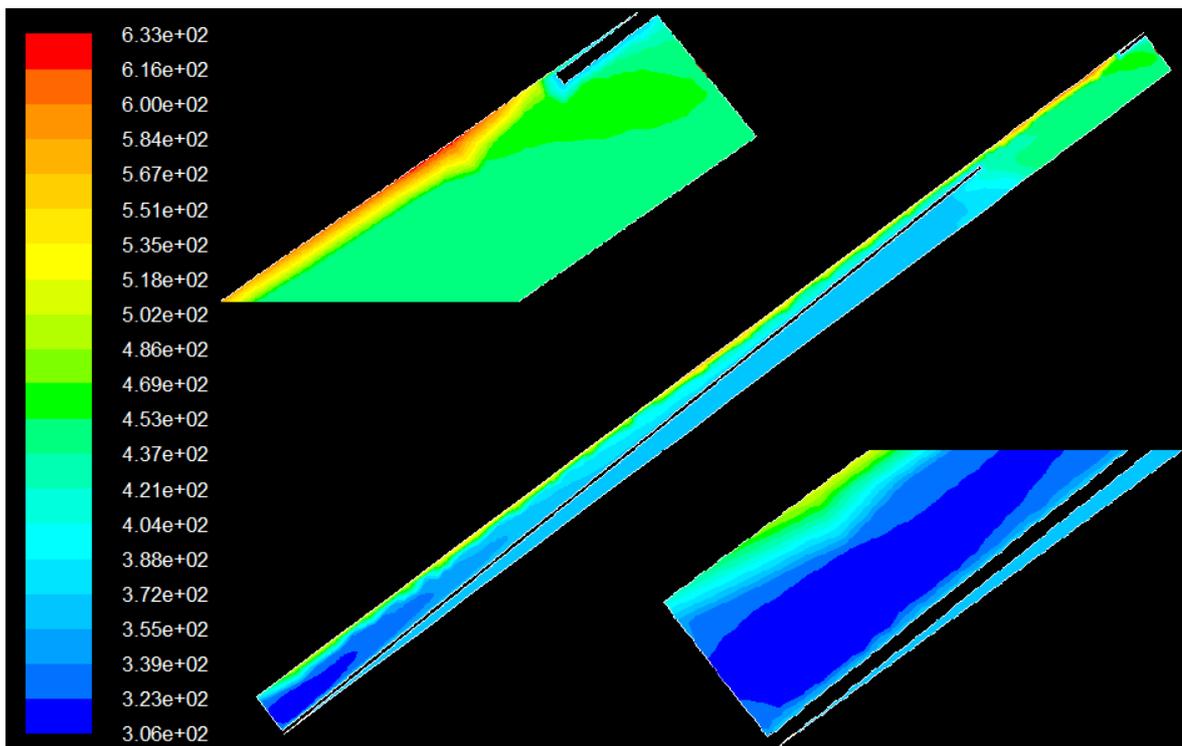


Figure IV- 23 : Contour de température pour le mode libre

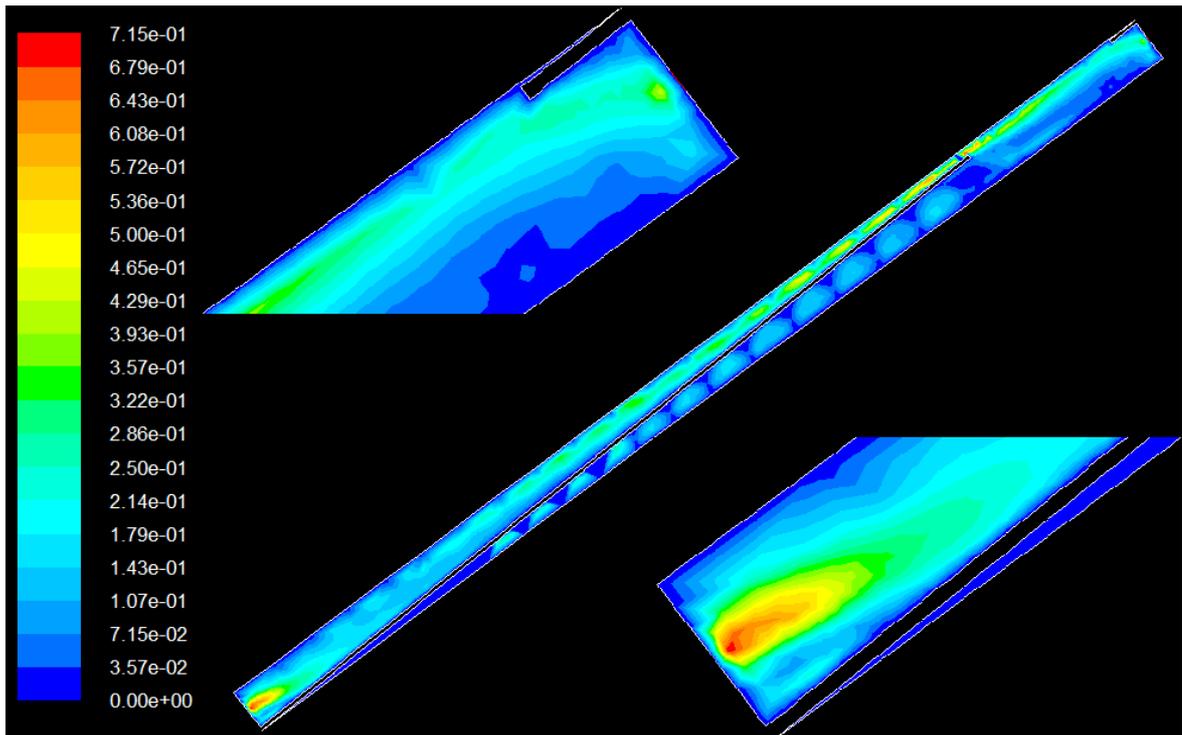


Figure IV- 24 : Contour des vitesses pour le mode libre

❖ Profil de température de sortie

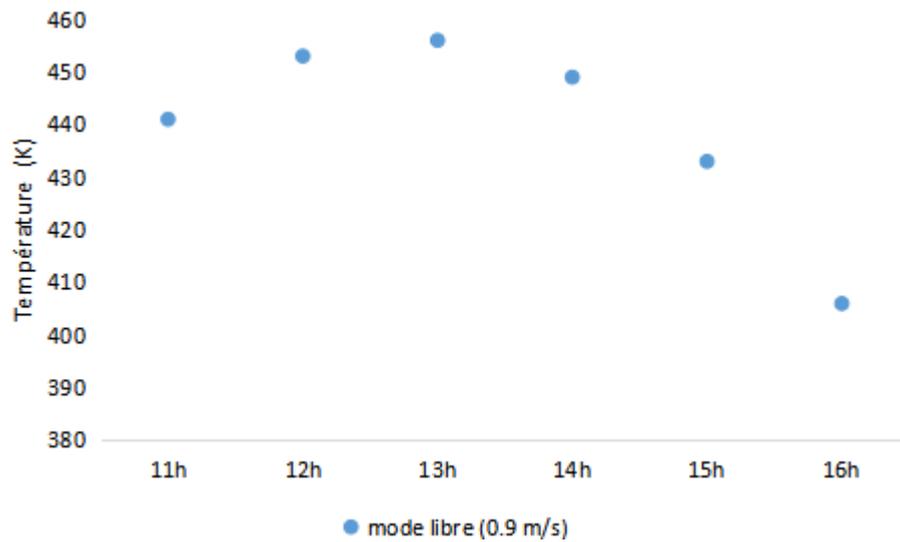


Figure IV- 25 : Profil de température de sortie pour le mode libre

IV.6.2. Mode forcé

Pour ce mode de circulation forcé on va prendre a chaque fois des débits d'air différent représentés dans fluent par les vitesses d'entrée: 1.6 m/s , 2.6 m/s et 3.6 m/s (puisque l'écoulement est incompressible). Ensuite on va comparer les résultats obtenus pour déterminer le débit qui donne les résultats les plus rentables.

➤ **Contours des températures et des vitesses**

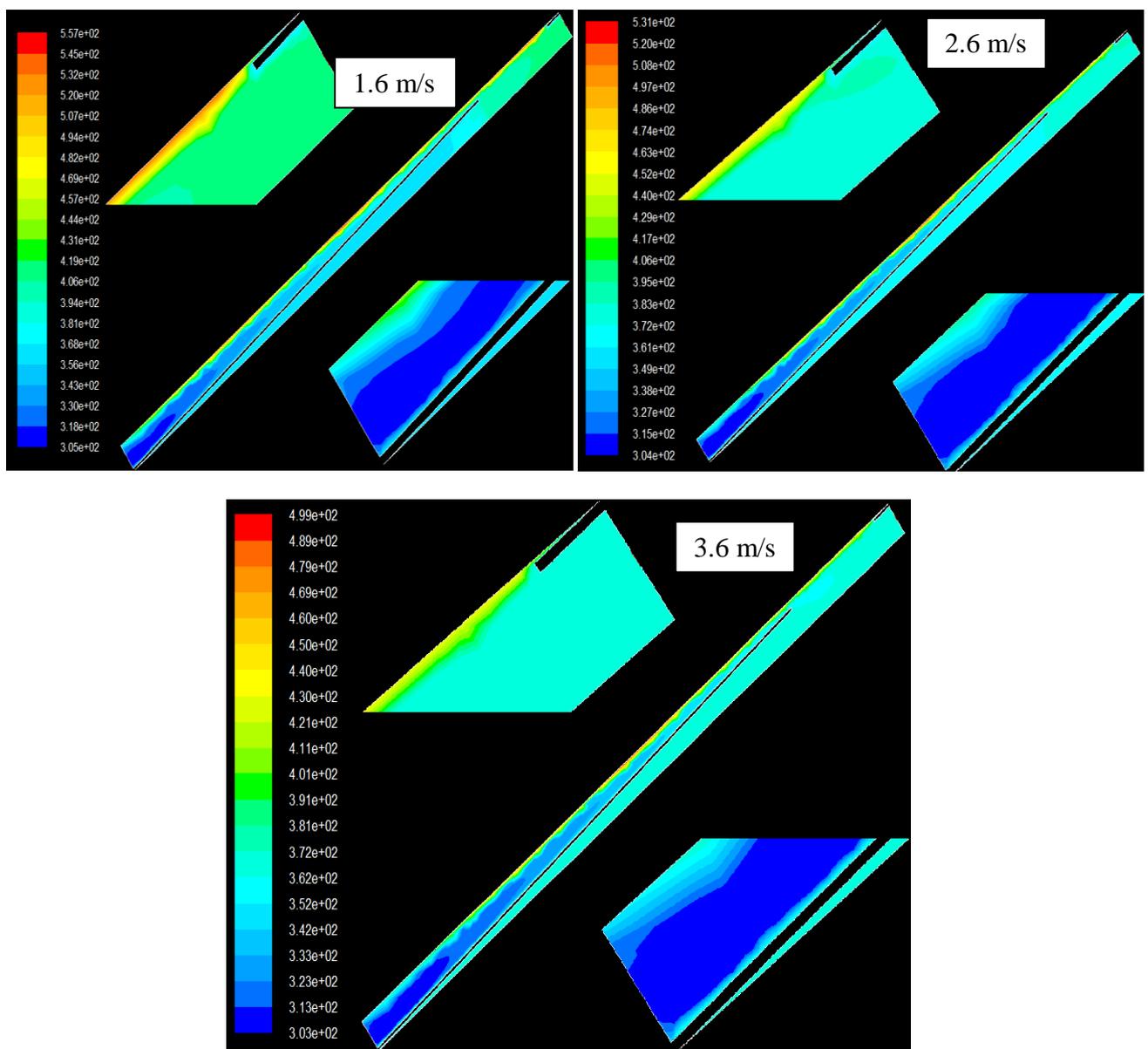


Figure IV- 26 : Contours des températures pour une ventilation forcée

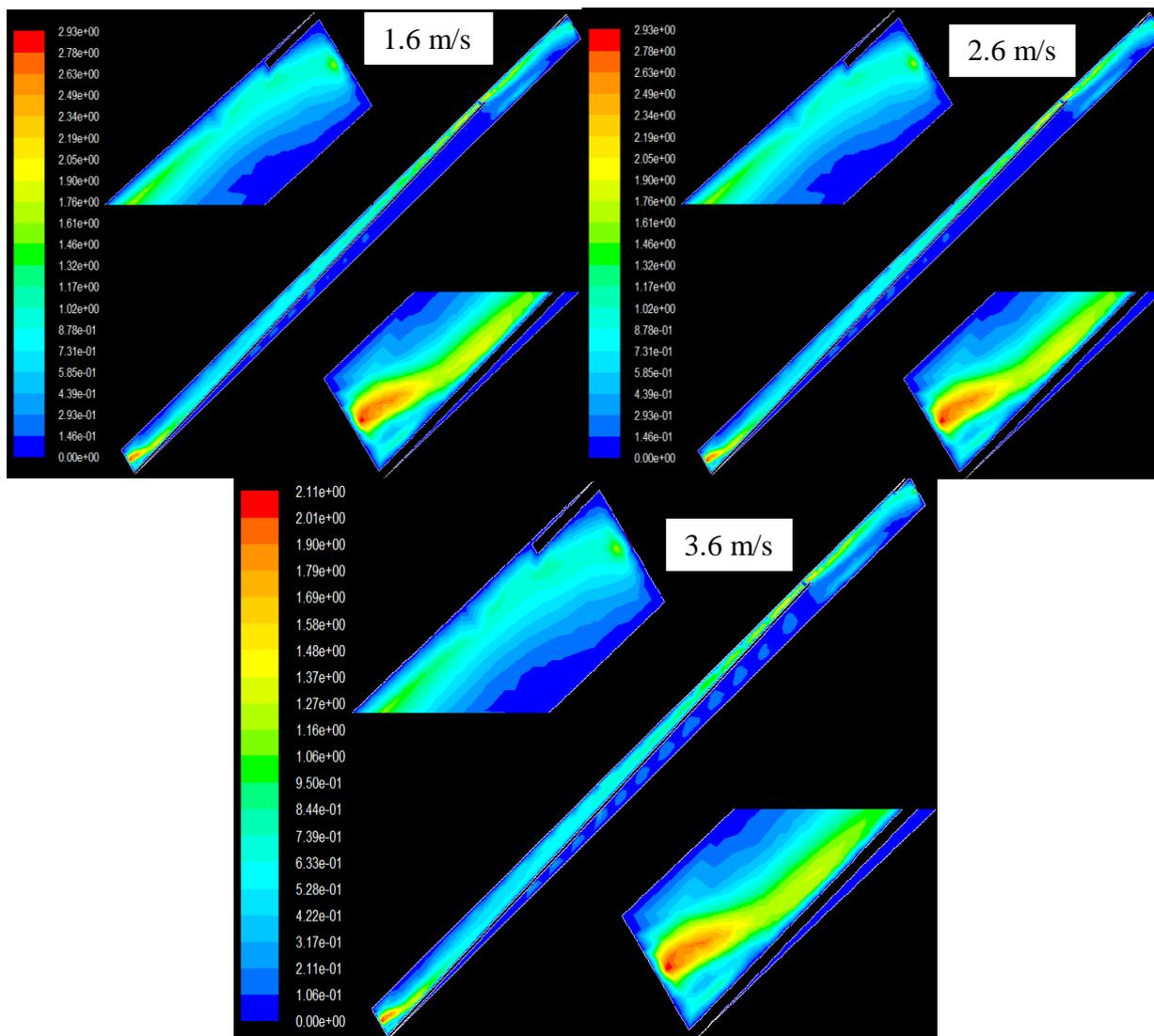


Figure IV- 27 : Contours des vitesses pour une ventilation forcée

IV.6.3. Comparaison

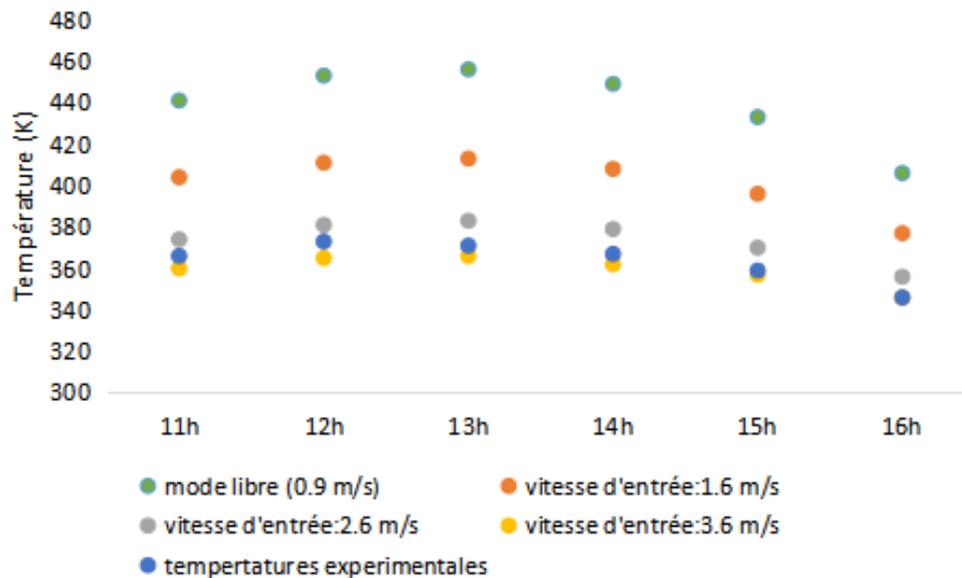


Figure IV- 28 : Comparaison entre les différentes ventilations

À partir de ce graphique on remarque que le profil de température pour le mode de circulation libre de l'air est quasiment supérieur à celui de circulation forcée.

Pour le mode de circulation forcé on remarque que le profil de température de sortie pour le cas où la vitesse d'entrée est égale à 1.6 m/s est supérieur aux profils des températures des autres cas (2.6 m/s et 3.6 m/s).

Ce résultat concorde avec les données expérimentales d'autres études où la vitesse (débit) d'entrée la plus faible donne les températures de sortie les plus élevées. Il est à noter, toutefois, que le débit est un paramètre important et qu'un compromis (température de sortie/débit d'air) est souvent nécessaire pour mettre en œuvre ce type de systèmes.

IV.7. Conclusion

Après avoir mené cette étude nous avons constaté que la position de la fente, la taille de fente ainsi que le débit de circulation de l'air peuvent avoir une grande influence sur la performance du capteur à air.

On constate que les valeurs numériques sont plus élevées que les valeurs expérimentales, cette différence peut être due aux différents processus de pertes thermiques qui ont été négligés dans la phase de simulation (parois adiabatiques).

La position de la fente influe énormément sur la température de sortie du capteur et d'après les résultats obtenus la fente en haut du capteur donne de meilleurs résultats.

Pour avoir une température de sortie plus élevée, la taille de la fente doit être optimale ni grande ni petite, pour cela on a déterminé la taille optimale qui est trois fois la taille de la fente prise dans l'étude expérimentale (la taille optimale égale environ 300 mm).

Le changement du débit de circulation de l'air dans le capteur a un effet remarquable sur la température de sortie, on a conclu que la ventilation de 1.6m/s donne des températures plus élevées et à chaque fois qu'on augmente le débit la température de sortie diminue.

Conclusion générale

Ce travail est une contribution pour l'amélioration des performances d'un capteur solaire plan à air. Cette amélioration consisté doit assurer le meilleur échange thermique entre le fluide caloporteur (l'air), l'absorbeur et l'ambiance avec un choix judicieux des composants des capteurs. L'optimisation des performances menée dans cette étude porte plus particulièrement sur la circulation du fluide caloporteur ainsi que la taille de la fente.

La revue bibliographique à permit de présenter les principaux travaux réalisés par les chercheurs dans ce domaine, en particulier ceux menés en Algérie. L'étude théorique que nous avons menée a porté sur deux grands axes: une partie sur l'étude du gisement solaire qui est pour but de donner les notions fondamentales pour tout calcul d'une installation solaire, et d'évaluer le flux solaire reçu au niveau du capteur. L'autre partie sur la modélisation mathématique adoptée pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur de l'air dans le conduit du capteur solaire à air.

La modélisation numérique à permis de construire le modèle composé des équations différentielles simplifiées à résoudre sur un maillage construit et préparer pour la résolution. Cette dernière se fera grâce au logiciel Fluent.

Au terme de notre étude concernant les calculs des performances des capteurs solaires, nous avons à travers les simulations menées, déterminé les champs de températures de l'air de sortie pour différentes tailles et positions de la fente de l'absorbeur et pour différents débits.

Bibliographie et Webographie

- [1] **B. Mourad**. "Contribution a l'étude, la simulation et l'analyse des pompes à chaleur assistées par l'énergie solaire". Thèse de magister (2008) 05-24.
- [2] **Alain Ricaud**, «Gisement solaire et transferts énergétiques », Université de CERGYPONTOISE 2011.
- [3] **Pr M.MERZOUK** cours de conversion thermique solaire Département des Energies Renouvelables, Université Saad Dahlab Blida 1
- [4] **S. Karroute** "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009) 03-15.
- [5] **Raud René**, capteur solaire thermique concentrateur a conduite manuelle, Association SOLEIL & VAPEUR, juin 2007
- [6] **Y.Chiba** , étude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire, mémoire magister en génie climatique, option thermique du Batiment et Refrigeration, université M'entouré Constantine, décembre 2005.
- [7] **S.SALMI et H.OUMELLAL**, 2007. « Calcul et dimensionnement d'une installation de chauffage et production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire d'une maison individuelle type pavillon » Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, UMMTO
- [8] **D. Bahrehmand and M. Ameri**, "Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with natural convection," Renewable Energy, vol. 74, pp. 357-368, 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2014.08.028.
- [9] **Kays W. M.**, Convective Heat and Mass Transfer. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [10] **Z. Sen**, Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy, Springer Science & Business Media, 2008.
- [11] **D. Y. Goswami and F. Kreith**, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, CRC Press, 2007.
- [12] **A. A. M. Sayigh and C. E. Backus**, Solar energy engineering, Academic Press, 1977
- [13] **J. A. Duffie and W. A. Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, 2013.
- [14] **B. Norton**, Solar energy thermal technology, Springer Science & Business Media, 2012.

- [15] **S. A. Kalogirou**, Solar energy engineering: processes and systems, Academic Press, 2013.
- [16] <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/energie-thermique/histoire-du-solaire-thermique.html>.
- [17] **S. Saadi**. "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan". Thèse de magister (2010) 05-19
- [18] **D. Ababsa**. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives". Thèse de magister (2010) 17-39.
- [19] **M. SANDALI**, Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux, Année Universitaire: 2013-2014.
- [20] **Bemer, C., Durst, F., McEligot, DM.** (1984) "Numerical study of fluid flow and heat transfer in a parallel plate channel with baffles", Journal of Heat Transfer, pp. 106-743.
- [21] **BEKKOUCHE S-A** « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires » Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique (2003) 47-51
- [22] **B. Mahfoud** Simulation de la combustion stoechiométrique de méthane CH₄ dans une chambre à combustion-Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figure-III2-Schema-du-volume-de-contrôle-a-maillage-decale-pour-u-e-b-maillage_fig8_331532891 [accessed 7 Sep, 2021]
- [23] **Loan C. POPA**, « modelisation numerique du transfert thermique méthode du volume finie », universitria craiova, 2002
- [24] **D. SEMMAR** « ETUDE NUMERIQUE DES ECOULEMENTS LAMINAIRES DANS LES CAVITES BIDIMENSIONNELLES : APPROCHE AU CAS DU CAPTEUR SOLAIRE A AIR » Thèse de Magister, CENTRE DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES, 19 février 1995.
- [25] **Suhas V. Patankar**, « Numerical Heat Transfer and Fluid Flow », Hemisphere publication corporation NEWYORK.
- [26] **M. Amraoui** « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité ». Université de Tlemcen 2012.
- [27] **K. Aoues, N. Moumni, M. Zellouf, A. Moumni, A. Labeled, E. Achouri, A. Benchabane**, « amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air », étude expérimentale dans la région de Biskra, revue des énergies renouvelables, vol 12, n°2, p 237-248, Université Mohamed Khider B.P. 145, Biskra, Algérie (2009).

[28] **F. BENYELLES, B. BENABADJIA, B.BENYOUCEF et Z.ZIANI**, «Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans », 13emes Journées Internationales de Thermique.2007

[29] **S. OUDJEDI**, « Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage », Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 . PP 255-266.Alger. 2008

[30] **I. TABET**, «étude ,réalisation et simulation d'un capteur solaire », Thèse doctorat.2016

[31] **F. Mokhtari , D. Semmar, A. Hamid** « L'Influence de la Configuration de l'Absorbeur sur les Performances Thermiques d'un Capteur Solaire à Air » Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 159-162.

[32] **K. Aoues, N. Moumni, M. Zellouf, A. Labeled, E. Achouri**, « 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, p 219 227,(2008).

[33] **K. Sopian, Suprantob, W.R.W. Daudb, M.Y. Othman, B. Yatime**, “Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media”, Renewable Energy, 18 (1999), pp. 557-564

[34] **A. Labeled, N. Moumni, K. Aoues, M. Zellouf, A. Moumni**, « Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle », Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561, (2009).

[35] **A. Labeled, N. Moumni, K. Aoues, M. Zellouf, A. Moumni**, « Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle », Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561, (2009).

[36] **N. Moumni, S. Youcef-Ali , A. Moumni, J.Y. Desmons**, “Energy analysis of a solar air collector with rows of fins”. Renewable Energy, 29 (2004), pp. 2053–2064.

[37] **Prasad, S.B. et al**, “Investigation of heat transfer and friction characteristics of packed bed solar air heater using wire mesh as packing material”, Sol. Energy, (2009), doi:10.1016/j.solener.2008.11.011

[38] http://www.neufplanetes.org/systeme_solaire/earth.html juin 2011

[39] **K. Sopian, M.A. Alghoul, E.M. Alfeji, M.Y. Sulaiman, E.A. Musa**. “Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media”. Renewable Energy 34 (2009) 640–645.