



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN - TIARET

ANNEXE SOUGUEUR

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par : BENAOUA AHLEM

THÈME

**Etude numérique d'un écoulement convectif dans
un capteur solaire plan à air à double passes**

Soutenue publiquement le : 29/ 6/ 2020

devant le Jury composé de:

Mr A. BELFEDHEL	M. C .B	Université de Tiaret	Président
Mr A. DJELLOULI	M. A .A	Université de Tiaret	Examineur
Mr A. SAFA	M. A .A	Université de Tiaret	Encadreur
Mr A. BENAHMED	Docteur assistant	Université de Tiaret	Co-encadreur

PROMOTION 2019 /2020

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*À mes chers **parents***

*À mon cher frère **MOUHAMED***

*À ma chère **sœur** et leur **marie/ses enfants LYDIA et KACIMOU***

*À ma très chère **IKRAM***

*À toute la famille **BENAOUA***

*À plus mon co-encadreur que je respecte **Dr. BENAHMED***

*À mes amies **AMEL et NOURA***

À tous ceux qui me sont chers

À tous les membres de ma promotion énergétique et énergie

Renouvelables

Ahlem

Remerciement

Remerciement

Je remercie en premier lieu notre Dieu le tout puissant qui nous a dotés de la merveilleuse faculté de raisonnement, de m'avoir donnée le courage et la volonté de mener à terme le présent travail.

J'exprime tout d'abord, ma profonde gratitude à Mr. SAFA Abdelkader, Maître A.A à l'Université de Tiaret et à mon co-encadreur Dr. BENAHMED Abdelillah, pour m'avoir dirigé avec une disponibilité permanente et pour tous les efforts qu'elle a consenti tout au long de l'élaboration de ce modeste travail. Ses encouragements, ses précieux conseils, sa gentillesse et l confiance qu'elle m'a toujours témoignée m'ont été d'une très grande utilité. Qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect.

J'exprime mes sincères remerciements à Dr Abdelmounaïm BELFEDAL, Maître C.A à l'Université de Tiaret, d'avoir accepté de présider le Jury de ce Mémoire.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr. Abdelkader DJELLOULI les membres du jury, ma profonde gratitude et mon respect m'avoir fait l'honneur d'examiner et de juger mon travail.

Enfin, je remercie également tous mes collègues et amies, qui me sont chères. J'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à ce travail parfois sans le savoir ou du moins sans mesurer le porté de leur influence.

*A vous tous J'exprime
Ma profonde sympathie
Et je vous souhaite beaucoup de bien*

Résumé

Résumé

Dans le présent travail, nous sommes entrepris une étude numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement convectif dans un capteur solaire plan à air à double passes. L'écoulement à l'intérieur de l'espace confiné entre le vitrage et l'isolant est gouverné par les équations de continuité, la quantité de mouvement et de l'équation d'énergie. Le modèle de turbulence ($k-\varepsilon$) est utilisé pour modéliser la turbulence. La configuration géométrique est tracée par le logiciel **GAMBIT** et les équations gouvernantes sont résolues par le code **Fluent**, qui est basée sur la méthode des volumes finis. Cette étude montre l'influence de différents paramètres sur les performances de notre capteur et que le rendement du capteur dont l'entrée de l'air s'effectue par le haut (vitre-absorbeur) est plus élevé que celui du capteur dont l'entrée de l'air s'effectue par le bas (absorbeur-isolateur). C'est la preuve d'une bonne isolation thermique et les pertes vers le bas sont négligeables.

Mots clés : convection forcée, capteur solaire, Rendement thermique, **Fluent**.

الملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة عددية للسلوك الديناميكي والحراري لتدفق الحمل الحراري في مجمع شمسي مستوي بهواء تمرير مزدوج. يتحكم التدفق داخل المساحة المحصورة بين التزجيج والعزل بمعادلات الاستمرارية والزخم ومعادلة الطاقة. يستخدم نموذج الاضطراب ($k-\varepsilon$) لنمذجة الاضطراب. يتم تكوين التكوين الهندسي بواسطة برنامج **GAMBIT** ويتم حل المعادلات الحاكمة بواسطة برنامج **Fluent**، والذي يعتمد على طريقة الحجوم المحدودة. توضح هذه الدراسة تأثير العوامل المختلفة على أداء الخاص باللاقط الشمسي وأن كفاءة اللاقط الشمسي الذي يكون مدخله للهواء من الأعلى (ممتص الزجاج) أعلى من اللاقط الشمسي الذي ل كمية الهواء من القاع (عازل امتصاص) وهذا دليل على عزل حراري جيد والخسائر إلى أسفل لا تكاد تذكر.

كلمات مفتاحية: حمل حراري قسري، اللاقط الشمسي، المرودود الحراري، فليانت.

Abstract

In the present work, we are undertaking a numerical study of the dynamic and thermal behavior of a convective flow in a plane solar collector with double pass air. The flow inside the confined space between the glazing and the insulation is governed by the equations of continuity, the momentum and the energy equation. The turbulence model ($k-\varepsilon$) is used to model the turbulence. The geometric configuration is plotted by the **GAMBIT** software and the governing equations are solved by the **Fluent** code, which is based on the finite volume method. This study shows the influence of different parameters on the performance of our sensor and that the efficiency of the sensor, the air intake of which is carried out from above (glass-absorber), is higher than that of the sensor, whose the air intake is from the bottom (absorber-isolator). This is proof of good thermal insulation and the losses downwards are negligible.

Keywords : forced convection , solar collector , Thermal efficiency , **Fluent**.

Sommaire

Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	IV
Abstract	V
الملخص.....	VI
Sommaire	VIII
Liste des figures et des tableaux	XI
Liste des abréviations	XV
Nomenclature	XVI
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires	
I.1 Introduction	04
I.2 Historique d'un capteur solaire plan	05
I.3 Définition et principe d'un capteur solaire plan	05
I.4 Notions sur la convection	06
I.5 Notions sur le rayonnement	07
I.6 Constituants d'un capteur solaire plan	08
I.6.1 L'absorbeur	08
I.6.2 Couverture transparente (vitre)	09
I.6.3 Le fluide caloporteur	10
I.6.4 Le coffre	11
I.6.5 L'isolation	11
I.7 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à air double passe	12
I.8 Différents types des capteurs solaires plans thermiques	12
I.8.1 Capteurs plan à air	12
I.8.2 Capteur plan à eau	16
I.8.3 Capteurs solaires à concentration	19
I.9 Applications des capteurs solaires plans.....	22
I.10 Conclusion.....	23
Chapitre II : Recherche bibliographique	
II.1 Introduction	25
II.2 Travaux de recherche sur les capteurs solaires	26

II.3 Conclusion	47
Chapitre III : Modélisation mathématique du problème et Résolution numérique	
III.1 Introduction.....	49
III.2 Principe du calcul numérique.....	50
III.3 Méthodes principales de discrétisation	50
III.3.1 Différences finis	51
III.3.2 Éléments finis	51
III.3.3 Méthode des volumes finis (MVF).....	51
III.4 Les différentes étapes de l'approche numérique.....	51
III.5 Modèles de fermeture.....	52
III.5.1 Modèle $(K-\varepsilon)$	52
III.6 Géométrie du problème	53
III.7 Modèle mathématique	54
III.8 Hypothèses simplificatrices.....	55
III.9 Equations gouvernantes.....	55
III.10 Conditions aux limites.....	57
III.11 Présentation du logiciel Gambit	58
III.12 Maillage.....	59
III.13 Conditions aux limites.....	62
III.14 Présentation du code FLUENT	62
III.15 Conclusion	69
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1 Introduction.....	78
IV.2 Choix du maillage.....	79
IV.3 Validation du modèle numérique	80
IV.4 Etude dynamique	81
IV.4.1 Présentation des contours	81
IV.4.2 Présentation des profils.....	84
IV.5 Etude thermique.....	88
IV.5.1 Présentation des contours.....	88
IV.5.2 Présentation des profils	89
IV.6 Influence de la position du canal d'entrée	92
IV.7 Conclusion.....	94
Conclusion générale	95
Référence bibliographique	96

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires

Figure I-1	Capteur solaire plan à air	06
Figure I-2	Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert	07
Figure I-3	Schématisation du rayonnement dans un capteur plan.....	08
Figure I-4	Composants d'un capteur solaire plan	08
Figure I-5	Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à air double passe	12
Figure I-6	Capteurs plan à air.....	13
Figure I-7	Capteur solaire plan simple passe.....	13
Figure I-8	Capteur solaire plan simple passe.....	14
Figure I-9	Principales géométries d'absorbeur.....	15
Figure I-10	Capteurs à absorbeur perméable	15
Figure I-11	capteur plan à eau	16
Figure I-12	Capteurs solaires sans vitrage	17
Figure I-13	Capteur plan à eau. Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif	17
Figure I-14	Capteur plan vitré.....	17
Figure I-15	Vue en coupe d'un tube d'un capteur à tubes sous vide.....	18
Figure I-16	Capteur solaire moquette.....	19
Figure I-17	Capteurs paraboliques et sphériques.....	20
Figure I-18	Centrales solaires à tour.....	21
Figure I-19	Coupe schématique du capteur CPC.....	21
Figure I-20	capture cylindro-parabolique.....	22

Chapitre II : Recherche bibliographique

Figure II-1	Capteur solaire à air.....	26
Figure II-2	Schéma n capteur solaire basé sur le préchauffage de l'air.....	26
Figure II-3	Capteur solaire à air double passes avec un milieu poreux.....	27
Figure II-4	Représentation des trois types de capteurs considérés.....	28
Figure II-5	Coupe transversale du capteur à air	28
Figure II-6	Le capteur solaire plan à air avec des chicanes (obstacles).....	29
Figure II-7	Diagramme schématique des capteurs solaires à air.....	30
Figure II-8	Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement.....	30
Figure II-9	Schéma d'un capteur solaire avec ailettes.....	31
Figure II-10	Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur.....	32

Figure II-11	Schéma d'un capteur solaire ; (A) sans milieu poreux, (B) avec milieu poreux.....	32
Figure II-12	Schéma des trois capteurs étudiés, (1) à plaque plane, (2) à plaque ondulées-V, (3) à plaque munie d'ailettes.....	33
Figure II-13	Capteur à air à double passe avec un lit garni de calcaire et du gravier.....	34
Figure II-14	Vue schématique du capteur solaire à air.....	34
Figure II-15	Diagramme schématique du capteur solaire TE.....	35
Figure II-16.1	Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement...	36
Figure II-16.2	Schéma descriptif des chicanes.....	36
Figure II-17	Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux.....	37
Figure II-18	Capteur double passes avec ailettes.....	37
Figure II-19	Schéma d'un capteur solaire à air à double passage avec des ailettes placées dans le second canal.....	38
Figure II-20	Capteur solaire à air à double passe avec des ailettes placées dans le deuxième cana.....	38
Figure II-21	Arrangement double passes : (a) sans milieu poreux, (b) avec milieu poreux.....	39
Figure II-22	Capteur solaire PV/T à double passe : (a) avec ailettes, (b) sans ailettes.....	40
Figure II-23	Diagramme schématique d'un capteur solaire.....	40
Figure II-24	Schéma des deux modèles de CSA double passes étudiés, (1) Co-courant, (2) contre-courant.	41
Figure II-25	Schéma d'un capteur solaire double passes avec absorbeur à ailettes dans le second canal.....	42
Figure II-26	Schéma du collecteur d'air solaire double passes étudiant.....	43
Figure II-27	Capteur solaire avec milieu poreux.....	43
Figure II-28	Dispositifs expérimentaux pour le séchage du henné; a) modèle I, b) modèle II.....	44
Figure II-29	Capteurs solaires à air double passes avec et sans stockage de chaleur.....	45
Figure II-30	Schéma du modèle de capteur solaire étudié.....	46
Figure II-31	Schéma d'un capteur solaire à air à double passe.....	46
Figure II-32	Profil de température totale pour différentes matières.....	47
Chapitre III : Modélisation mathématique du problème et Résolution numérique		
Figure III-1	Le principe du calcul numérique.....	50
Figure III-2	Schéma du capteur solaire à double passe.....	54
Figure III-3	Lancement du Gambit.....	59
Figure III-4	Création de la géométrie.....	59
Figure III-5	Maillage surfacique.....	60
Figure III-6	Schéma montrant les trois types de maillage.....	61
Figure III-7	Schéma des conditions aux limites.....	62
Figure III-8	Type de résolution.....	63

Figure III-9	Lecture de la grille.....	64
Figure III-10	Fenêtre solveur.....	65
Figure III-11	Fenêtre de modèle visqueux.....	65
Figure III-12	Fenêtre de Matériaux.....	66
Figure III-13	Valeurs des conditions aux limites.....	66
Figure III-14	Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.....	67
Figure III-15	Fenêtre de solution initialisation.....	67
Figure III-16	Choix du nombre des itérations.....	68
Figure III-17	Allures de l'évolution des résidus de Capteur.....	68

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV-1	Influence de la taille du maillage sur la température maximale.....	79
Figure IV-2	Détails du maillage utilisé.....	80
Figure IV-3	Validation de l'étude actuelle avec les résultats des (SANDALI ,2014) pour $It = 1000 \text{ W/m}^2$...	80
Figure IV-4	Contour de la vitesse axiale.....	81
Figure IV-5	Contour de la vitesse résultante.....	82
Figure IV-6	Contour des lignes de courant.....	82
Figure IV-7	Contour de la pression dynamique.....	83
Figure IV-8	Contour d'énergie cinétique turbulente [m^2/s^2].....	84
Figure IV-9	Différentes sections choisies	84
Figure IV-10	Profil de la vitesse axiale pour les 3 différentes sections	85
Figure IV-11	Profil de la vitesse axiale pour les 2 différentes sections du coude de 180°	86
Figure IV-12	Profil de la pression dynamique pour les sections verticales.....	87
Figure IV-13	Variation du coefficient de pression le long des parois del'absorbeur.....	88
Figure IV-14	Distribution de champ de température dans le capteur solaire à double passes.....	89
Figure IV-15	Profil de température totale.....	90
Figure IV-16	Distribution du nombre de Nusselt dans la paroi supérieure du capteur.....	91
Figure IV-17	L'influence du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire.....	92
Figure IV-18	Illustration du canal d'entrée (a) Entrée par le canal supérieur, (b) Entrée par le canal inférieur.....	92
Figure IV-19	Champ de température (a) Entrée par le canal supérieur,(b)Entrée par canal inférieur.....	83
Figure IV-20	Champ de température (a) Entrée par le canal supérieur,(b)Entrée par canal inférieur.....	93
Figure IV-20	Distribution de la température de sortie.....	94

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires		
Tableau I.1	Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques	08
Tableau I.2	Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants	11
Chapitre III : Modélisation mathématique du problème et Résolution numérique		
Tableau III.1	Dimensions du capteur étudié	64
Tableau III.2	Propriétés des Matériaux utilisés dans le capteur étudié	64
Tableau III.3	Propriétés du fluide caloporteur (l'air) à $T_{\text{abm}}=27^\circ\text{C}$	65
Chapitre IV : Résultats et discussions		
Tableau IV.1	Influence de la taille du maillage sur la température et les vitesses maximales	79

Liste des notations

<i>Symbols</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
H_v	<i>Epaisseur du vitrage</i>	<i>m</i>
H_a	<i>Hauteur d'absorbeur</i>	<i>m</i>
H_i	<i>Hauteur du l'isolation</i>	<i>m</i>
H_1	<i>Hauteur de la première conduite</i>	<i>m</i>
H_2	<i>Hauteur de la deuxième conduite</i>	<i>m</i>
I	<i>Eclairement solaire globale incident</i>	<i>w / m²</i>
L	<i>Longueur de capteur</i>	<i>m</i>
L_1	<i>Longueur du vitrage</i>	<i>m</i>
L_2	<i>Longueur de l'absorbeur</i>	<i>m</i>
T_{fe}	<i>Température de fluide l'entrée</i>	<i>K</i>
T_{fs}	<i>Température de fluide sortie</i>	<i>K</i>
A	<i>Surface</i>	<i>m²</i>
V	<i>Vitesse d'écoulement</i>	<i>m/s</i>
Re	<i>Nombre de Reynolds</i>	<i>/</i>
D_h	<i>Diamètre hydraulique</i>	<i>m</i>
q_m	<i>Débit massique</i>	<i>Kg / s</i>
ρ	<i>Masse volumique</i>	<i>Kg / m³</i>
μ	<i>Viscosité dynamique</i>	<i>Kg/ (m.s)</i>
η	<i>Rendement du capteur</i>	<i>/</i>
λ	<i>Conductivité thermique</i>	<i>w/m.k</i>

Abréviations

CFD : *Computational fluid Dynamics*

V_c : *volume du control*

MDF : *Méthodes des différences finies*

MEF : *Méthodes des éléments finis*

MS : *Méthodes spectrales*

MVF : *Méthodes des volumes finis*

ECS : *d'eau chaude sanitaire*

CCPC : *Capteur Compound Parabolic Concentrator*

CSADP : *capteur solaire à air double passes*

CSA : *capteur solaire à air*

AC : *coût annuel*

AEG : *gain d'énergie annuel*

CPP : *capteurs solaire d'air à plaque plane*

C.C.T : *l'énergie cinétique turbulente*

Introduction Générale

Introduction Générale

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990. (H. Rakotondramiarana et al, 2005).

Les capteurs d'énergie solaire sont un type spécial d'échangeurs de chaleur. La composante principale de tout système solaire est la plaque d'absorption. Il s'agit d'un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant, le convertit en chaleur et transfère cette chaleur à un fluide (l'air) s'écoulant dans le capteur. L'énergie solaire ainsi collectée est transportée du fluide circulant directement à l'eau chaude ou à un équipement de conditionnement de l'espace, ou à un réservoir de stockage d'énergie thermique pouvant être utilisé pour la nuit et les jours nuageux (Soteris Kalogirou.A., 2004).

Le transfert de chaleur par convection est l'un des modes de transfert de chaleur que l'on rencontre fréquemment dans de nombreuses applications industrielles. La convection forcée est un phénomène de transfert thermique associé aux écoulements de fluide. La présence de la convection forcée influe simultanément sur les champs thermiques et hydrodynamiques (A. Dalila et al, 2010).

Les capteurs solaires plans à air dont la veine fluide au sein du capteur n'est équipée d'aucun type de promoteur de turbulence sont les capteurs plans à air sans chicanes. Ce type de capteurs date depuis les premiers travaux initiés dans ce domaine. Le rendement faible de ce type de capteurs a poussé les chercheurs à trouver d'autres moyens afin d'améliorer les performances des capteurs, d'où la naissance du deuxième type de capteur solaire plan à air munis de chicanes comme promoteurs de turbulence favorisant ainsi un meilleur transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (l'air) (K. Bouaraour et al, 2016).

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie

Solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire à double passe pour la production de l'air chaud.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre : donne des notions générales sur les capteurs solaires, définition, leurs différents composants, leurs types, leur principe de fonctionnement .
- ✓ Le deuxième chapitre : nous présentons quelques travaux sur les capteurs solaires.
- ✓ Le troisième chapitre : est consacré à la présentation des différentes équations qui modélisent Mathématiquement le comportement thermique du capteur solaire.
- ✓ Le quatrième chapitre : donne des résultats obtenus par la simulation numérique en utilisant le logiciel fluent et en finune conclusion générale qui est suivi d'un résumé.

Chapitre I : Généralité sur les capteurs Solaires



I.1 Introduction :

Les capteurs d'énergie solaire sont un type spécial d'échangeurs de chaleur. La composante principale de tout système solaire est la plaque d'absorption. Il s'agit d'un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant, le convertit en chaleur et transfère cette chaleur à un fluide s'écoulant dans le capteur. L'énergie solaire ainsi collectée est transportée du fluide circulant directement à l'eau chaude ou à un équipement de conditionnement de l'espace, ou à un réservoir de stockage d'énergie thermique pouvant être utilisé pour la nuit et les jours nuageux (Soteris Kalogirou.A ,2004).

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur les capteurs solaires, des notions et les composantes d'un capteur solaire, ainsi que ses types et ses applications dans le domaine de l'énergie solaire.

I.2 Historique d'un capteur solaire plan :

Le soleil constitue une source d'énergie permettant d'équilibrer la vie de l'homme sur terre. L'utilisation des collecteurs solaires thermiques remonte dans le temps et ils peuvent être classés selon les différentes époques de l'évolution technologique et industrielle.

Vers 212 ans avant Jésus Christ, Archimède avait conçu une méthode de production de chaleur à l'aide de miroirs métalliques. 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 18^{ème} 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 19^{ème} 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 thermo solaire à taille industrielle et c'est à la fin du 20^{ème} siècle que sont lancés diverses centrales et fours solaires à concentration après 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 d'énergie, le séchage..., ont vu le jour dans plusieurs pays lors de ses 50 dernières années grâce aux collecteurs solaires (Ndiaye et al ,2018).

I.3 Définition et principe d'un capteur solaire plan :

Un capteur solaire (figure I-1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur". Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante (K. Salima ,2009).

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur (A. Dalila,2010).

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur (KHEBCHI Abderrahman et al ,2017).

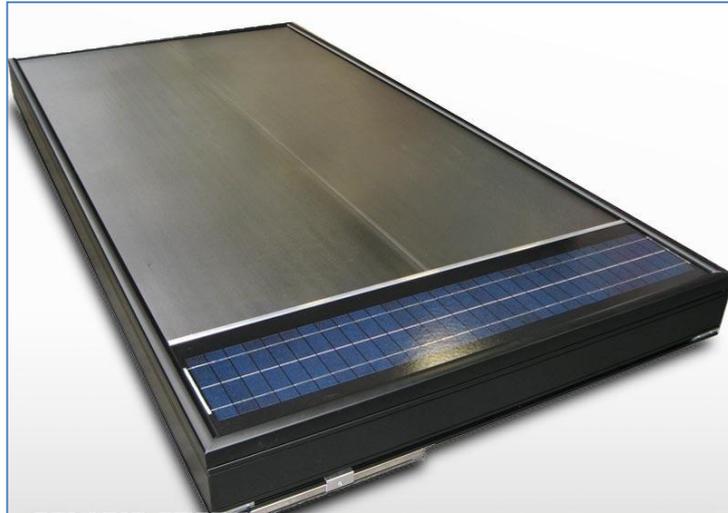


Figure I-1 : Capteur solaire plan à air (K.Salima,2009)

I.4 Notions sur la convection :

La convection est la recherche du champ de vitesse et de température dans un milieu matériel dont les différentes parties sont en mouvement les unes par rapport aux autres. Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques avec vitesse ou pression imposée (on parle alors de convection forcée). Quand les deux phénomènes coexistent ensemble, on parlera alors de convection mixte. Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement entre surfaces peut accompagner les deux transferts précédents. (HAMICI Nadjib et al.2014).

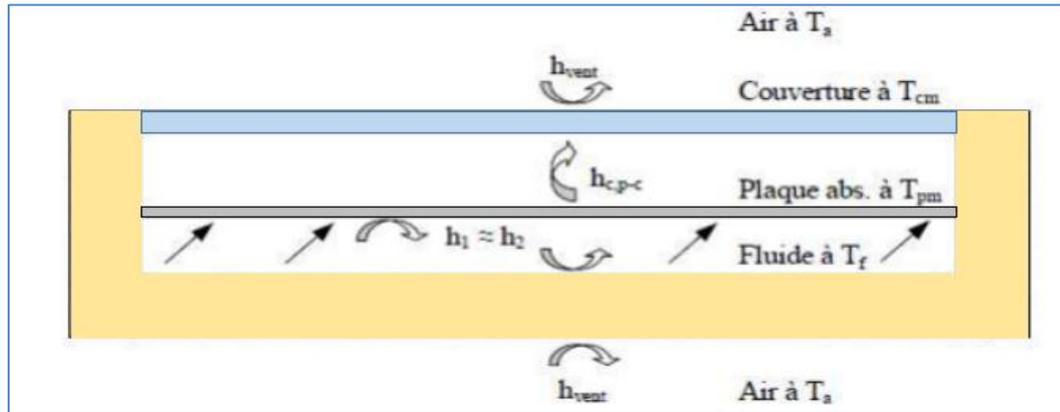


Figure I-2 : Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert (HAMICI Nadjib et al.2014).

I.5 Notions sur le rayonnement :

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique ou transparent si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur (NAIT IDIR Heni et al ,2014).

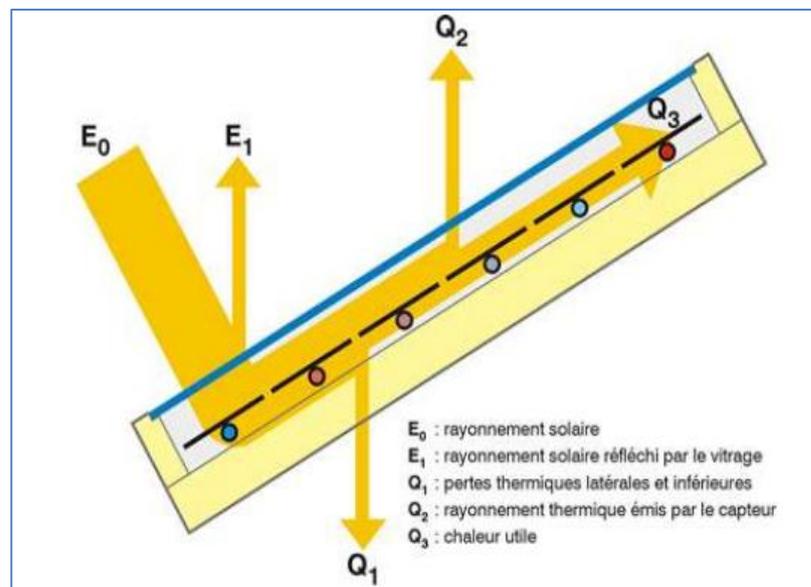


Figure I-3 : Schématisation du rayonnement dans un capteur plan (NAIT IDIR Heni et al ,2014).

I.6 Constituants d'un capteur solaire plan :

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

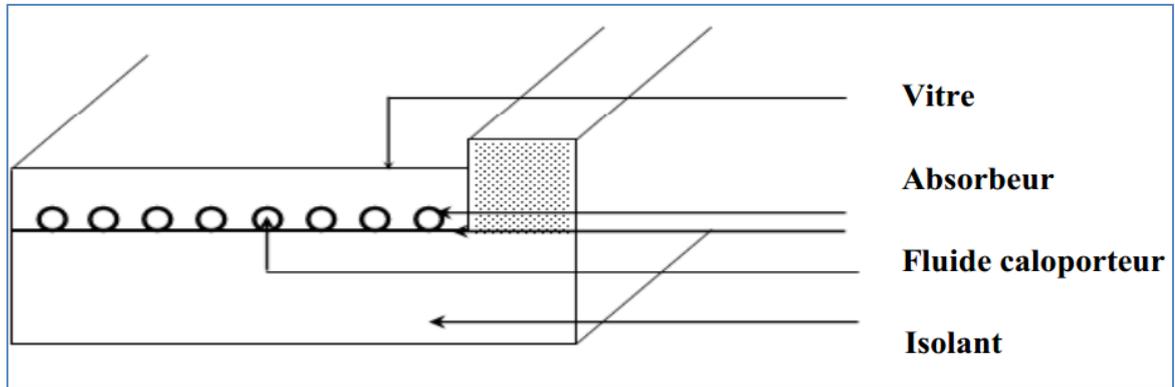


Figure I-4 : Composants d'un capteur solaire plan (Benahmed et al,2016).

I.6.1 L'absorbeur :

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. L'absorbeur doit assurer les fonctions suivantes (Saadi souad ,2010) :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie (Sandali messaoud ,2014).

Tableau I-1 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques utilisés pour l'absorbeur (Sandali ,2014).

Métal	Conductivité thermique (w/m.k)	Chaleur massique (j/kg.k)	Masse volumique (kg/m ³)	Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s)
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inox	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Avantage de l'absorbeur :

- La légèreté.
- La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.
- La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Inconvénients de l'absorbeur :

- Une mauvaise conductibilité thermique.
- Un vieillissement dû au rayonnement U. V.
- Une tenue médiocre aux températures élevées.

I.6.2 Couverture transparente (vitre) :

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse. L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C (F. Mokhtari et D. Semmar, 1999), en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, en effet:

Soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U. V et I.R. A la surface de la terre, le rayonnement solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R pour lequel la transmissivité de la vitre est faible ne pouvant ainsi s'échapper et qui sera en partie absorbé par la vitre qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle-même s'échauffe (K.J. Russell, 2006).

L'utilisation de la couverture transparente évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent.

I.6.3 Le fluide caloporteur :

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Le fluide caloporteur doit satisfaire aux conditions suivantes (Saadi souad, 2010) :

- Faible viscosité et bas point de coulée.
- Haut point d'ébullition et bas point de congélation.
- Coefficient de transfert thermique élevé.

Les fluides caloporteurs les plus utilisés sont :

L'air :

L'air comme agent de transport de calories a un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie et moins de travaux d'entretien. Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'airs très importants (Amraoui,2012).

Propriétés thermo physiques de l'air :

Les propriétés thermo physiques de l'air variant avec la température, nous donnons ci-dessous quelques corrélations (fonction de la température, pour P=1 atm) les plus utilisées (HAMICI Nadjib et NAIT IDIR Heni,2014) :

- Masse volumique :

$$\rho = \frac{353}{(\theta + 273)} = \frac{P}{r\theta} \text{ kgm}^{-3} \quad (\text{I.1})$$

- Conductivité thermique :

$$\lambda = 7,57.10^{-5} \theta + 0.0242 \text{ W m}^{-1} \text{ k}^{-1} \quad (\text{I.2})$$

- Viscosité dynamique :

$$\mu = 10^{-5} (0.0046 \theta + 1.7176) \text{ Pa s} \quad (\text{I.3})$$

- Diffusivité thermique :

$$\alpha = 10^{-5} (0.0146 \theta + 1.8343) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (\text{I.4})$$

- Chaleur spécifique de l'air :

$$C_p = 1006 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (\text{I.5})$$

L'eau :

Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel Pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des Problèmes (Amraoui, 2012).

I.6.4 Le coffre :

Le coffre 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 (KHEBCHI et al ,2017).

I.6.5 L'isolation :

Les pertes de chaleur principales du capteur sont de la couverture, puisque les cotées et le dos peuvent être isolés, alors que la face avant doit être exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante. C'est pour cela l'air est utilisé fréquemment comme une isolation contre les pertes de chaleur conductrices et convectives de l'absorbeur vers la vitre (Mekelleche et al ,2017).

Tableau I-2 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants (Amraoui ,2012).

Matériaux	Facteur de transmission solaire%	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (j/kg.k)	Diffusivité (10-6 m ² /s)
air	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polyester expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier de journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
plâtre	0.35	800	800	5.5

I.7 Différents types des capteurs solaires plans thermiques :

La technologie sur la conception des dispositifs de conversion de l'énergie solaire thermique a pris une grande ampleur ce dernier temps. Alors dans ce qui suit, nous allons donner les différents types des capteurs solaires.

I.7.1 Capteurs plan à air :

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, généralement pour le préchauffage de l'air neuf. Ils sont utilisés lorsque la température de fonctionnement doit pas dépassée (70°C), car le rendement baisse fortement avec l'augmentation de la température de l'air caloporteur. L'avantage de ces capteurs se présente dans leur faible coût ainsi que la faible complexité d'installation. Des ailettes sont introduites dans l'absorbeur pour augmenter le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur (l'air) et l'absorbeur (C. ANNAB, 2013).



.Figure I-6: Capteurs plan à air (C.ANNAB,2013).

Les types de capteurs solaires sont très divers même si leur composition reste approximativement le même. On distingue cinq grandes catégories de capteurs plans à air :

- ✓ Capteur solaire simple passe.
- ✓ Capteur solaire plan double passe
- ✓ Capteurs à absorbeur plan.
- ✓ Capteurs à absorbeur à géométrie variable.
- ✓ Capteurs à absorbeur perméable.

Capteur solaire simple passe :

Il est constitué d'un vitrage simple en verre qui réalise l'effet de serre nécessaire pour échauffer l'absorbeur qui est à base du cuivre, d'une couche d'isolation en arrière du capteur, elle permet de meilleures performances thermiques, elle est assurée par du polystyrène. La particularité est qu'il y a un seul passage pour le fluide caloporteur (air). (Mahamat, 2016).

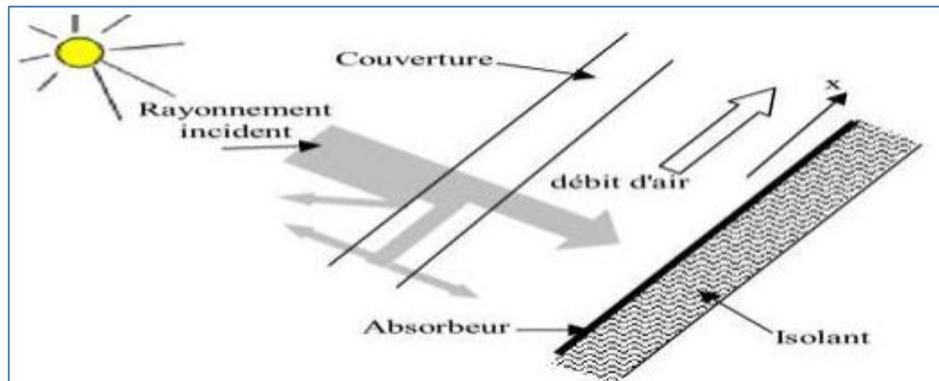
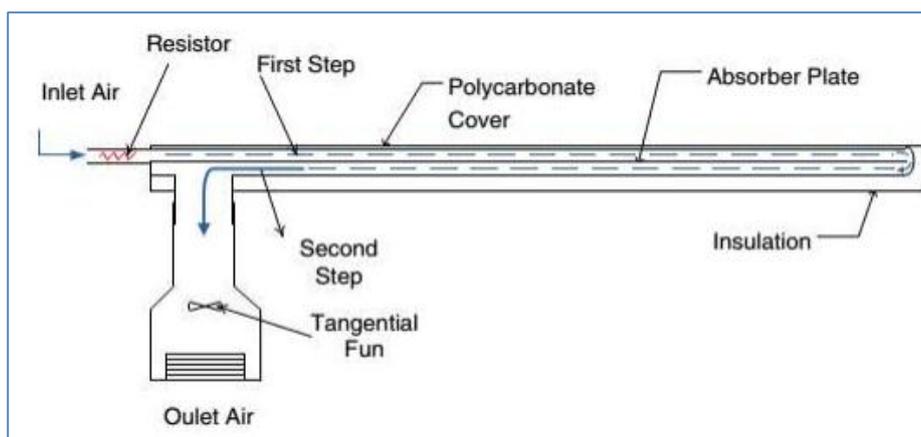


Figure I-7: Capteur solaire plan simple passe.

Capteur solaire plan double passe :

Les capteurs solaire plan à air double passe fonctionnent avec le même principe que les capteurs à air simple passe, la différence réside au niveau de nombre de passage du fluide caloporteur (air). C'est-à-dire l'élément principal plaque absorbante est placé au milieu et l'air passe entre la couverture et la plaque et deuxième passe entre la plaque et l'isolation. Ceci permet de d'augmenter l'efficacité du capteur solaire. (Mahamat, 2016)



.Figure I-8: Capteur solaire plan à double passes

Capteurs à absorbeur plan :

L'absorbeur est une tôle plane. Plusieurs types d'écoulement d'air sont envisageables dans ce genre des capteurs (Amraoui ,2012 et Mekelleche et al ,2017) :

- ✓ Écoulement au-dessus de l'absorbeur,
- ✓ Écoulement en dessous de l'absorbeur,
- ✓ Écoulement des deux côtés de l'absorbeur (multi passes).

Capteurs à absorbeur à géométrie variable :

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes, l'idée principale consiste à jouer des ailettes sur la géométrie de l'absorbeur de façon à augmenter la surface d'échange (K. aoues et al,2009).

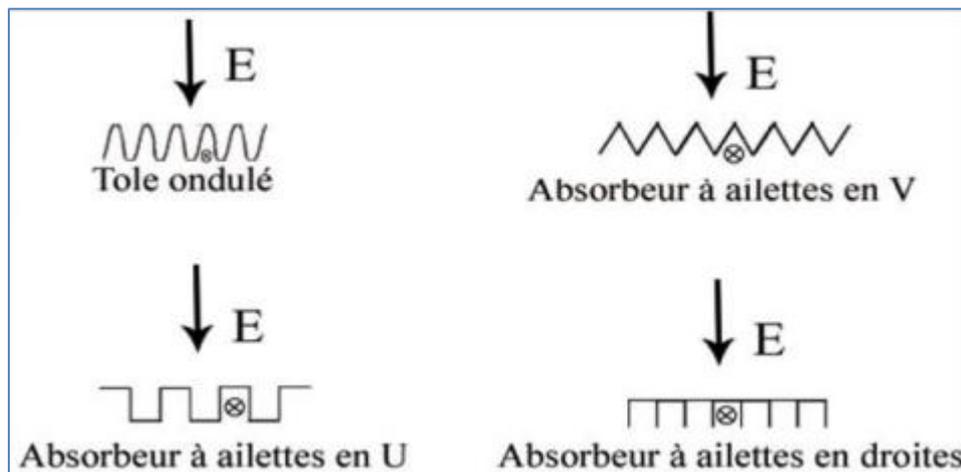


Figure I-9 : Principales géométries d'absorbeur.

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 échauffer par convection sous le vitrage. Ensuite l'air continue de s'échauffer par passage dans la matrice absorbante (K. aoues et al,2009).

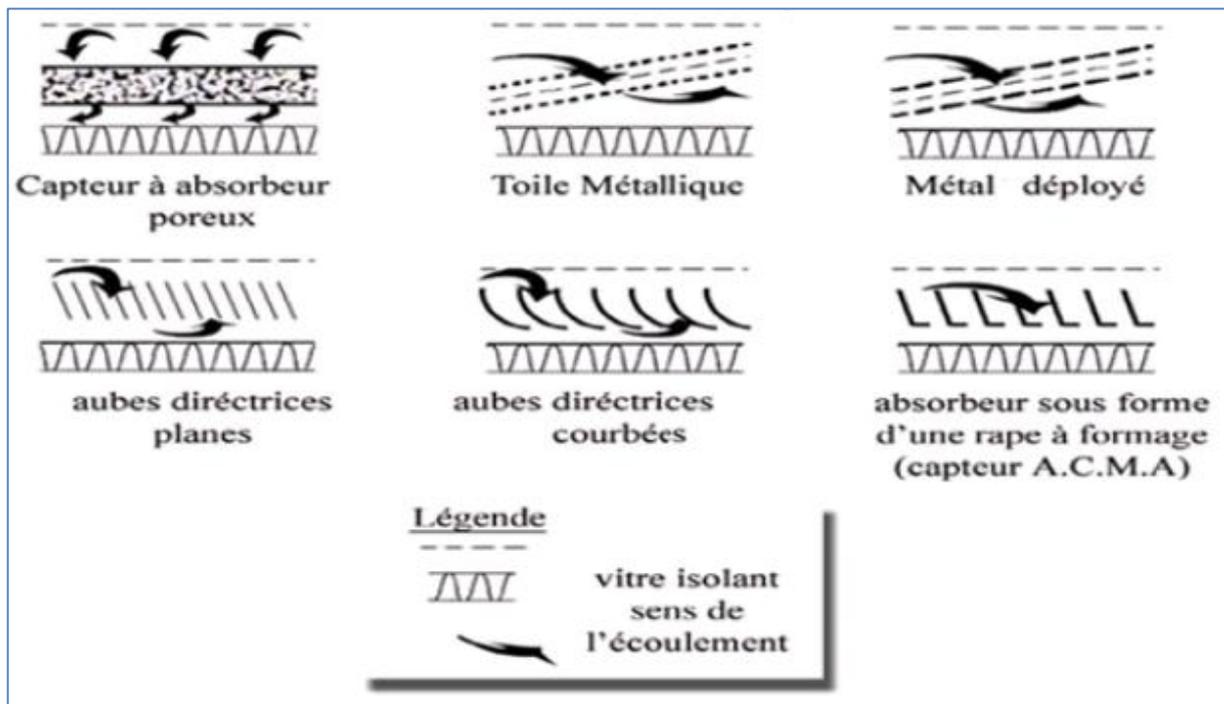


Figure I-10 : Capteurs à absorbeur perméable (K. aoues et al,2009).

I.7.2 Capteur plan à eau :

Le capteur plan à eau est constitué d'une plaque de verre sous laquelle est situé des tuyaux contenant l'eau et de l'antigel. Ce tuyau repose sur une plaque isolante (isolation thermique) peinte en noir afin d'avoir une absorption de l'énergie solaire maximale. En effet, la couleur noire est la couleur qui absorbe le plus l'énergie solaire (le blanc étant celui qui l'absorbe le moins). Le principe de ce capteur est bien connu par les agriculteurs : c'est le principe de l'effet de serre. Ils s'en servent pour cultiver des plantes sous serres dans les régions froides. (ANNAB et al, 2013)

Le capteur plan fonctionne donc comme une serre : le rayonnement solaire traverse le vitrage, il est absorbé par le revêtement noir qui s'échauffe, afin de transmettre sa chaleur au fluide (eau et antigel). L'antigel est utilisé pour éviter le gel de l'eau pendant l'hiver. Ces capteurs permettent de chauffer un liquide caloporteur (généralement un mélange eau glycol).

Ils sont utilisés généralement pour la production d'eau chaude sanitaire. Un absorbeur sélectif, ainsi qu'une vitre en verre technique permettent de garder un bon rendement avec des températures de l'ordre de 80°C (ANNAB et al, 2013).

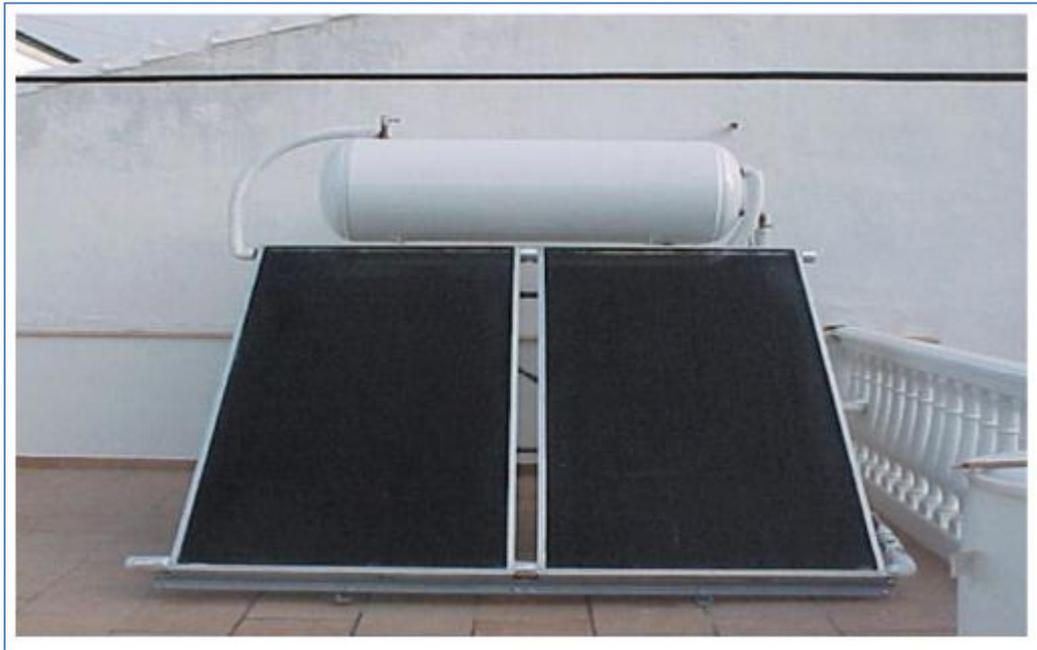


Figure I-11 : capteur plan à eau (ANNAB et al, 2013).

Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif:

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. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (I-12) (A. Dalila ,2010).



Figure I-12 : Capteurs solaires sans vitrage (A. Dalila ,2010).

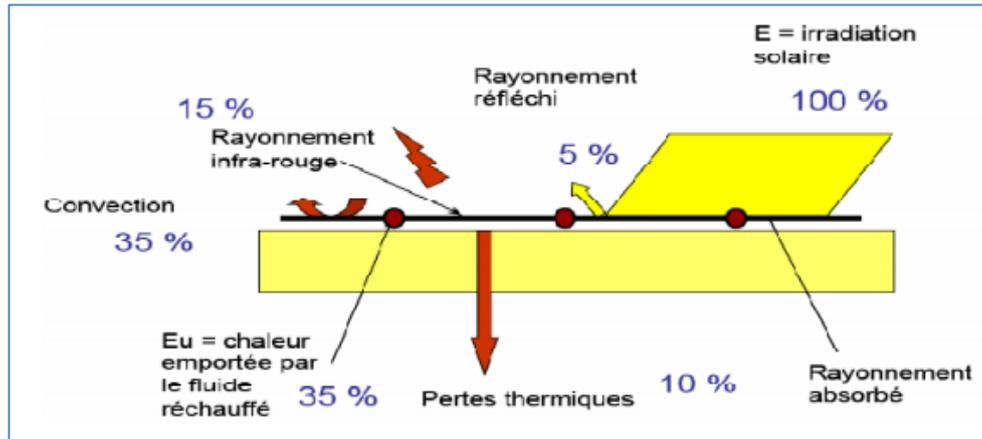


Figure I-13 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif (A. Dalila, 2010).

Capteurs plans vitrés :

Ce sont des systèmes destinés à générer de l'air chaud pour le séchage ou la production de l'eau chaude sanitaire. Ils sont constitués d'éléments plans montés en parallèle. Sa couverture transparente plane souvent en verre reçoit le maximum de rayonnement qu'il transmet partiellement à l'absorbeur qui est en tôle peinte en noir pour absorber le maximum de rayonnement solaire. Il est isolé sur les faces latérales et arrière comme l'indique la figure I-14. Ce type de capteur est installé proche des stations thermiques, ses températures de fonctionnement peuvent aller jusqu'à 100°C. (mamemordiarrandiaye, 2018)

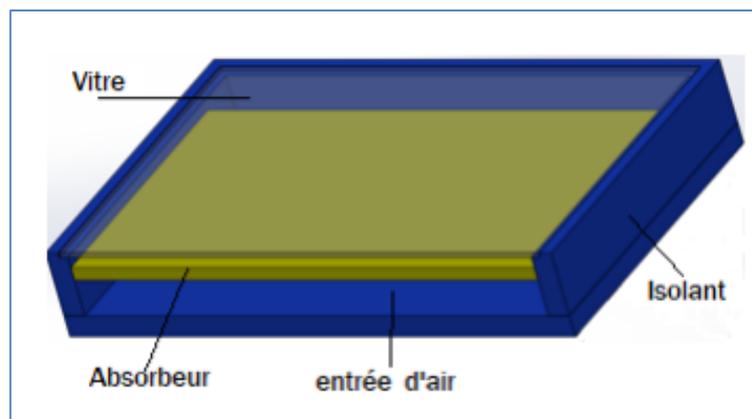


Figure I-14 : Capteur plan vitré.

Capteurs solaires à tubes sous vide :

Les capteurs solaires à tubes sous vide, comportent un absorbeur revêtu d'une surface sélective et enfermé sous vide dans un tube en verre. Ils captent bien l'énergie solaire et leurs pertes thermiques vers l'environnement sont extrêmement faibles. Les systèmes présentent

sur le marché utilisent un caloduc pour extraire la chaleur de l'absorbeur (un liquide se vaporise au contact de l'absorbeur chaud, la chaleur est récupérée dans la tête du tube lorsque la vapeur s'y condense et le condensat, retourne par gravité à l'absorbeur). Les capteurs sous vide sont bien adaptés aux applications requérant la fourniture d'énergie à des températures moyennes ou hautes (eau chaude domestique, chauffage de locaux et applications de chauffage industriel dans des gammes de températures de 60 °C à 80 °C, selon la température extérieure), en particulier dans les climats froids. (LAARABA ,2014).

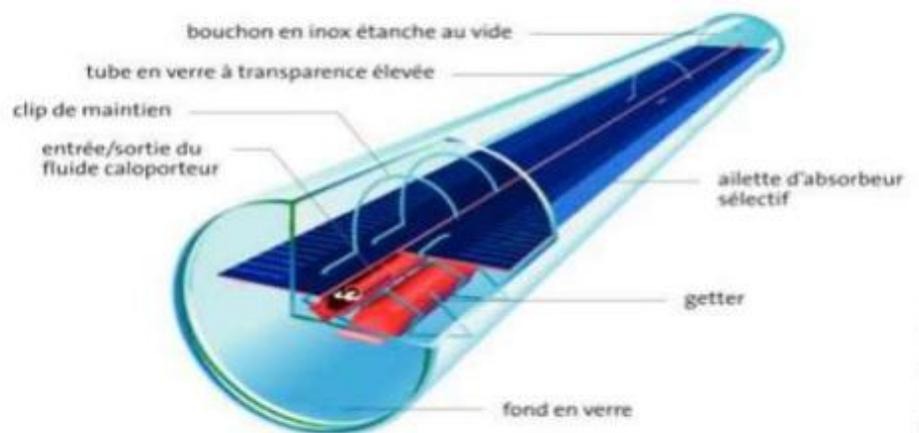


Figure I-15 : Vue en coupe d'un tube d'un capteur à tubes sous vide.

Capteur moquette :

C'est un capteur non vitré. Il consiste en un réseau de tubes noirs en matière plastique, accolés les uns aux autres (figure I-16). Pour chauffer l'eau d'une piscine, les capteurs peuvent être insérés dans le circuit de filtration. Ils sont ainsi directement parcourus par l'eau retournant au bassin. Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant (Benahmed ,2016).

Les quelques degrés supplémentaires apportés à l'eau de la piscine permettent d'en allonger le confort et la durée d'utilisation de plusieurs semaines. Le dimensionnement recommandé est de 1m² de capteur pour 2m² à 3 m² de plan d'eau. Une couverture nocturne du bassin permet par ailleurs de réduire les besoins en chaleur de la piscine.

Le capteur moquette ne permet pas la production d'eau chaude sanitaire (ECS), sauf en pays chauds. Pour chauffer des piscines d'été, individuelles ou collectives, ces capteurs représentent des investissements idéals car à moindre coût, ils répondent parfaitement aux besoins spécifiques saisonniers. (Benahmed ,2016)

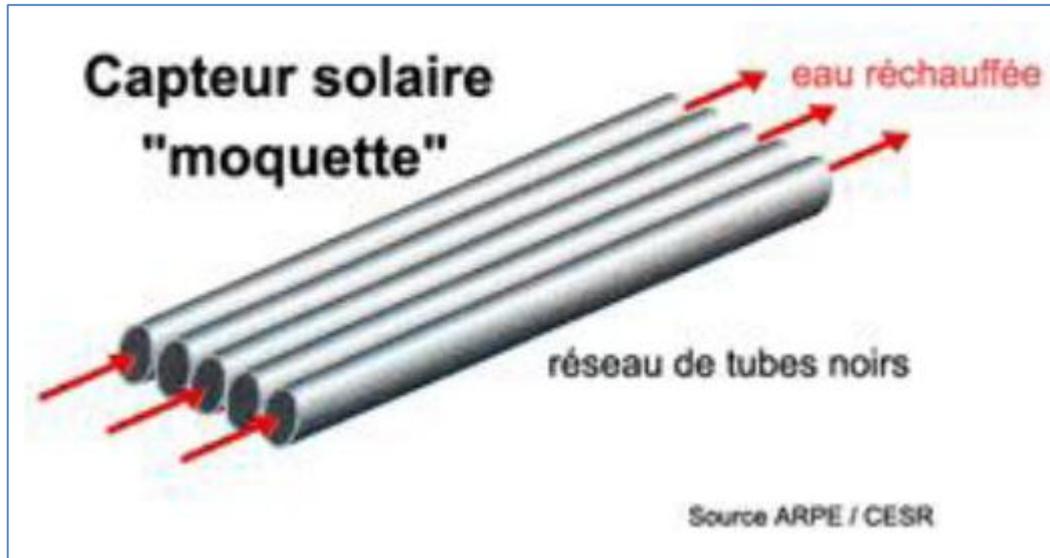


Figure I-16 : Capteur solaire moquette (Benahmed ,2016).

I.7.3 Capteurs solaires à concentration :

Pour atteindre des températures élevées (supérieures à 120°C), il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des jeux appropriés d'éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles. La contrainte principale, outre le coût des dispositifs plus élevé que celui des capteurs plans, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course. Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur les miroirs du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La réflexion, la transmission à travers le vitrage, et l'absorption se traduisent par des pertes optiques, caractérisées globalement par une efficacité. Dans les capteurs à concentration élevée, seule la composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, la composante diffuse ne pouvant être concentrée. L'absorbeur s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme essentiellement de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques. Un fluide caloporteur refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile qui est ensuite convertie ou transférée pour différents usages.

Les capteurs paraboliques ou sphériques :

Le concentrateur parabolique ou sphérique est aussi appelé assiette (Figure I.14). Les rayonnements solaires réfléchis par le miroir parabolique convergent vers un seul point, le foyer de la parabole. Le système doit être orienté à tout instant vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise selon deux axes.

Le facteur de concentration moyen dépasse le millier, ce qui permet de porter le fluide à très haute température, au-delà de 700 °C (Annab Choayb ,2013).



Figure I-17: Capteurs paraboliques et sphériques.

Les centrales solaires à tour :

Sont considérées comme hautement prometteuses bien qu'elles souffrent d'une moins longue expérience que la technologie des miroirs cylindro-paraboliques. Une tour de 40 étages soutient un capteur dominé par un champ équipé de centaines de miroirs héliostats (miroirs orienteurs), des miroirs qui suivent chacun le soleil (figure I.15). Comme pour les miroirs cylindro-paraboliques, un liquide transporte l'énergie vers la centrale énergétique. La tour solaire nécessite moins de tuyaux sur le terrain, mais elle souffre du grand nombre d'héliostats équipés de suiveurs complexes à deux axes. Les tours solaires sont entrées dans le domaine commercial en avril 2007 avec le lancement de la centrale Abengoa de 10 mégawatts, PS10, à Sanlúcar près de Séville en Espagne. Abengoa Solar et Bright Source Energy (Californie) développent des tours.



Figure I-18 : Centrales solaires à tour.

Capteur CPC (Compound Parabolic Concentrator) :

C'est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques" (figure I.19). 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. (Sandali ,2014).

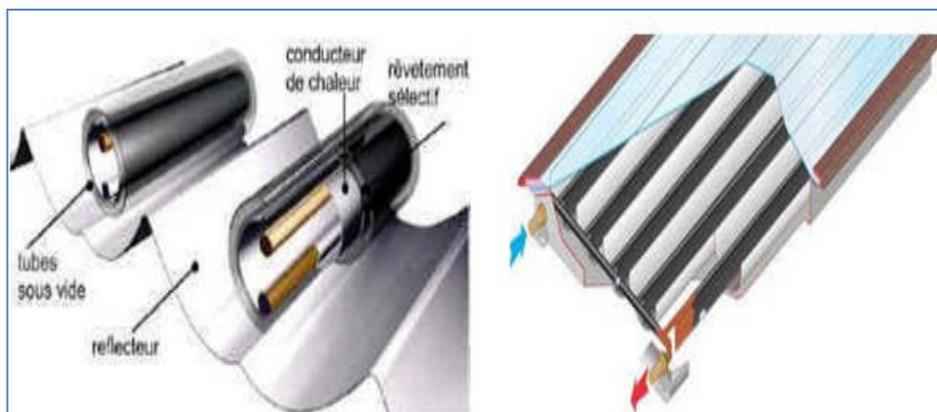


Figure I-19 : Coupe schématique du capteur CPC

Capteurs cylindro-paraboliques :

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80. Il est composé d'un réflecteur

parabolique (miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire (figure II.3). Aussi appelés concentrateurs linéaires à auge, ces miroirs de section parabolique concentrent les rayons du soleil vers une ligne focale. Le récepteur est un tube placé sur ce foyer linéaire, au-dessus de l'auge, et dans lequel circule un fluide caloporteur. Avantage de ces miroirs paraboliques, le suivi du soleil est simplifié : il s'effectue sur un seul axe au lieu de deux pour les héliostats. Les concentrateurs sont généralement orientés nord-sud et pivotent d'est en ouest pour suivre la course du soleil (K.Heinloth,2006). La concentration maximale de ce capteur est $C^*_{\max}=215$ et le rendement maximal est $\eta_{\max} = 50 \%$.



Figure I-20: Capture cylindro-parabolique.

I.8 Applications des capteurs solaires :

Plusieurs applications de l'énergie solaire captée par des capteurs solaires sont utilisées. Parmi les plus répandues (Faris .A ,2016 et Benahmed, 2016) :

- Chauffages solaire.
- Climatisation solaire.
- Séchage solaire.
- Distillation solaire.
- Disselement solaire.
- Refroidissement solaire.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu quelques notions générales sur les capteurs solaires telles que leurs types, leurs composantes avec les propriétés thermophysiques de chaque constituants, leur principe de son fonctionnement et leurs domaines d'application.

Chapitre II : Recherche bibliographique



II.1 Introduction :

Les capteurs d'énergie solaire sont un type spécial d'échangeurs de chaleur. La composante principale de tout système solaire est la plaque d'absorption. Il s'agit d'un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant, le convertit en chaleur et transfère cette chaleur à un fluide (l'air) s'écoulant dans le capteur. L'énergie solaire ainsi collectée est transportée du fluide circulant directement à l'eau chaude ou à un équipement de conditionnement de l'espace, ou à un réservoir de stockage d'énergie thermique pouvant être utilisé pour la nuit et les jours nuageux (Soteris Kalogirou.A, 2004).

En raison de la mauvaise conductivité thermique et de la faible capacité calorifique de l'air, le taux de transfert de chaleur convectif dans le canal d'écoulement d'air chauffé est faible ; de nombreuses études ont été faites pour augmenter ce taux. L'une des façons efficaces d'augmenter le taux de transfert de chaleur par convection est d'augmenter la zone de transfert de chaleur ou augmenter la turbulence à l'intérieur du canal (El-Sebaï.A,et al 2001).

La fabrication des chauffe-eau solaires a commencé à partir des années 50. Leur industrie a augmenté très rapidement dans beaucoup des pays du monde. Le manque de l'eau était toujours un problème de l'humanité, par conséquent parmi les premières tentatives est d'utiliser l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau de mer. La distillation solaire a été dans la pratique pendant longtemps, l'utilisation des concentrateurs solaires dans la distillation solaire a été rapportée par Pasteur (1928) qui a employé un concentrateur pour focaliser les rayons solaires sur une chaudière de cuivre contenant de l'eau (A. Dalila ,2010).

II.2 Travaux réalisés sur les capteurs solaires :

Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin (1995), ont étudié théoriquement et expérimentalement l'influence du rayonnement solaire capturé sur l'efficacité de capteur solaire simple. Ils ont trouvé que le taux du rayonnement solaire et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur accroît avec l'augmentation de la surface du capteur, mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur.

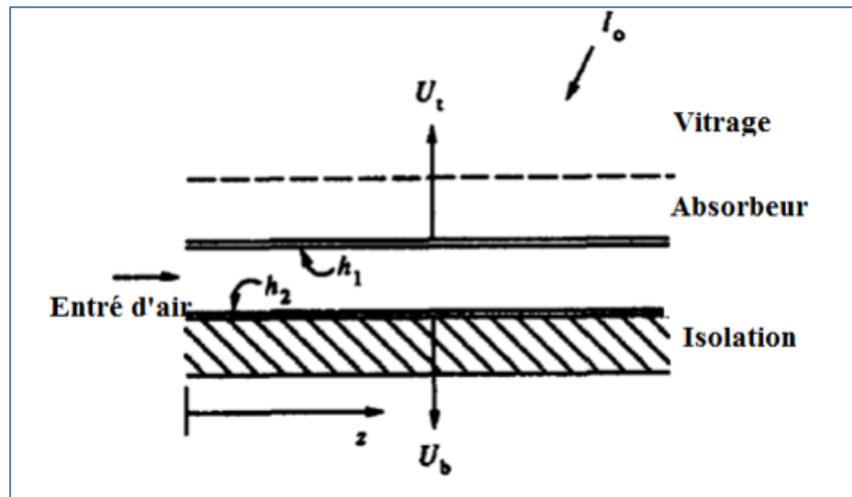


Figure II-1 : Capteur solaire à air (Ho-Ming,1995).

A. Mohamad (1997), a étudié la minimisation des pertes de la chaleur qui passe de la couverture vers l'ambiance ; Il a proposé de forcer l'air pour circuler sur la couverture de verre avant leur passage par l'absorbeur, et d'utiliser un absorbeur poreux pour augmenter le transfert thermique à l'air et d'ajouter une deuxième couverture.

Tout d'abord, les inconvénients de l'air solaire conventionnel les radiateurs sont identifiés, qui sont la perte de chaleur ambiante à travers le couvercle en verre et une mauvaise chaleur convection de l'absorbeur au courant d'air. Ensuite, les performances d'un solaire à contre-courant le réchauffeur d'air à matrice poreuse est analysé et les résultats sont comparés à l'énergie solaire conventionnelle réchauffeurs d'air. Dans des conditions de fonctionnement normales, l'analyse indique que le réchauffeur suggéré l'efficacité thermique peut dépasser 75%. L'efficacité de ce type de collecteur est beaucoup plus élevée que l'efficacité des aérothermes conventionnels. Le collecteur minimise les pertes de chaleur dans l'environnement et maximise le transfert de chaleur vers le flux d'air. Le coût de construction du chauffage à contre-courant est comparable au coût de construction du chauffage à double vitrage. Cependant, la pression la chute (puissance de pompage) est plus élevée pour le réchauffeur suggéré, mais ce facteur n'est pas si important pour les faibles débits.

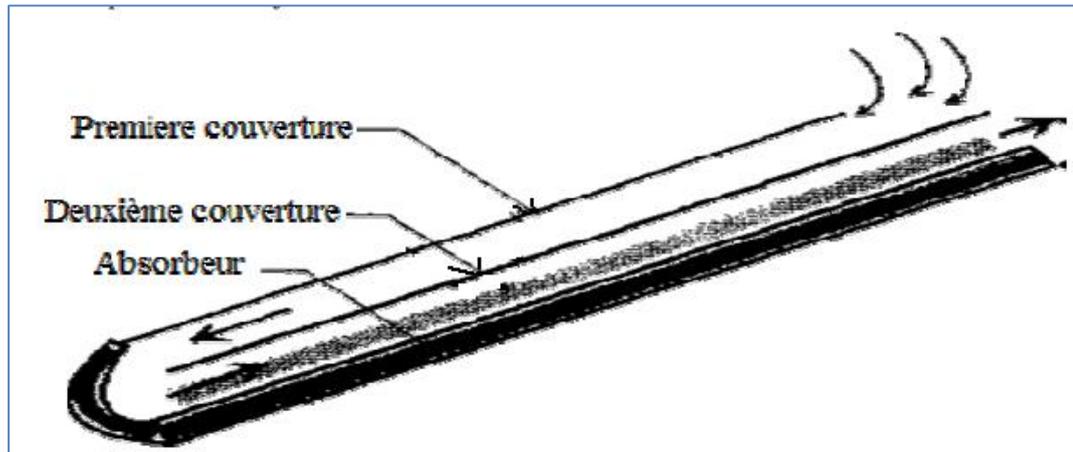


Figure II-2 : Schéma n capteur solaire basé sur le préchauffage de l'air (A.Mohamad,1997)

Sopian et al ,1998 ont conclu que les effets du débit massique, du rayonnement solaire et de la hausse de la température jouent un rôle important sur le rendement thermique du capteur solaire. De plus, plusieurs combinaisons de profondeurs de canaux supérieures et inférieures ont été utilisées. L'introduction du milieu poreux dans le deuxième canal augmente également la zone de transfert de chaleur. Ce type de collecteur a une performance thermique plus élevée par rapport au collecteur solaire classique à simple passage. L'efficacité thermique typique du collecteur solaire double-passe avec des milieux poreux est d'environ 60à70%. En outre, l'efficacité du capteur solaire à double passes avec des milieux poreux est 20 à70% plus élevé que le collecteur sans support poreux. Les résultats indiquent que ce type de collecteur peut être utilisé pour une grande variété d'applications, telle que la chaleur solaire industrielle et le séchage solaire de produits agricoles.

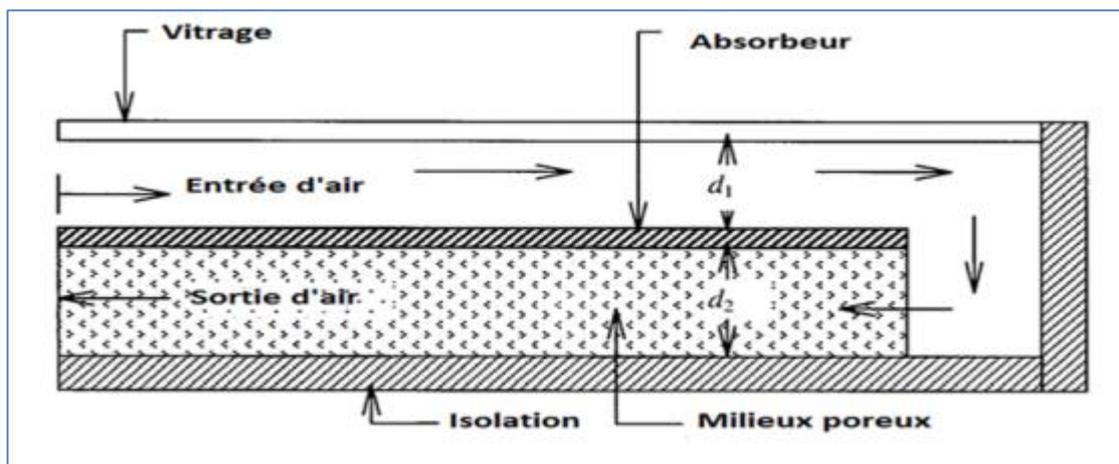


Figure II-3 : Capteur solaire à air double passes avec un milieu poreux (Sopian etal,1998)

D'après une étude expérimentale réalisée par Mokhtari et al,1999 sur des différentes configurations de capteur solaire à air le but est tester la performance en deux régimes, convection naturelle et convection forcée. Trois configurations de capteurs (a, b et c) sont représentées, la campagne de mesures a été effectuée au site de Bouzaréah (C.D.E.R) durant six jours pour les deux modes de circulation de l'air dans le capteur. Alors, les résultats de ces dernières ont conclu que le rendement a une variation logique. Seulement le point de 13h, on remarque la chute du rendement malgré l'importance du ΔT , ceci peut être expliqué par la faible vitesse de l'air en ce point. La courbe de la température de sortie du fluide suit une évolution logique en fonction de l'évolution du flux solaire. Fig. (I-4).

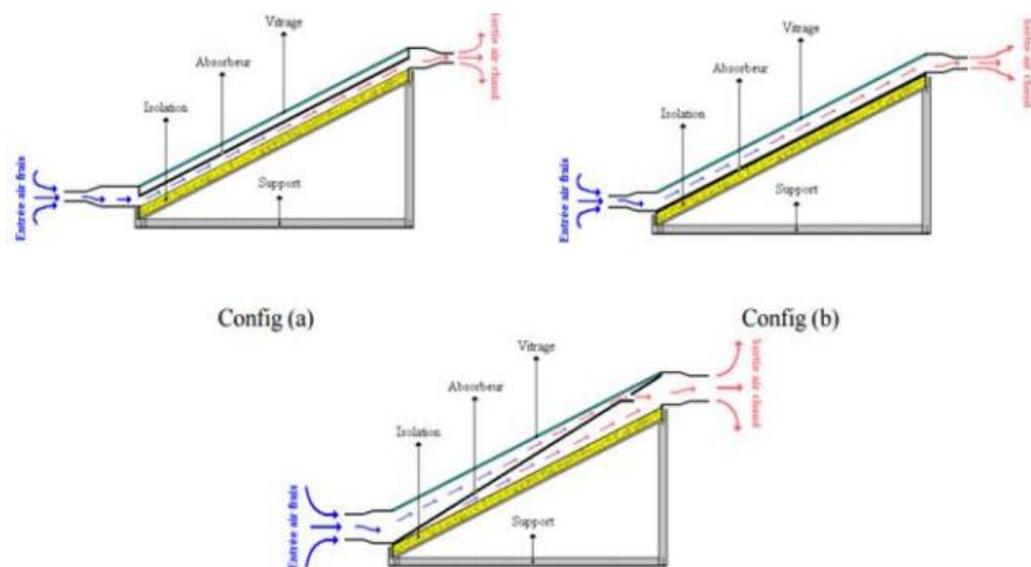


Figure II-4 : Représentation des trois types de capteurs considérés (F.Moukhtari et D.Semmar 1999).

F. Moukhtari et D. Semmar (1999) ont fait une étude expérimentale d'un capteur solaire à air. Ils ont présenté les résultats des essais effectués sur le capteur solaire à air. En premier lieu, ils ont donné la méthode de réalisation du modèle expérimental en se référant aux modèles standards des capteurs à air, ensuite une campagne de mesures a été menée afin de juger les performances thermiques de ce système. Les paramètres mesurés permettent d'appuyer l'analyse théorique, ils valorisent son capteur solaire à air, et pour une éventuelle utilisation de son capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires.

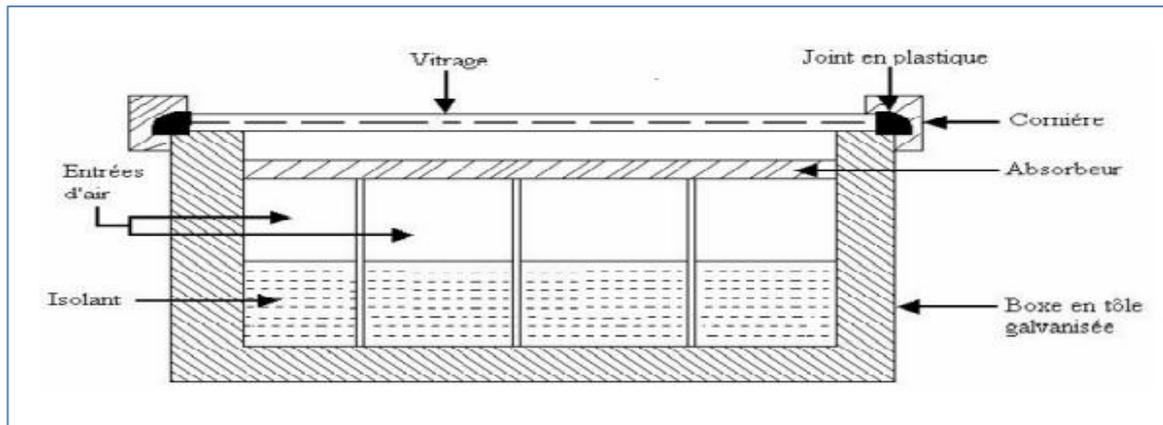


Figure II-5 : Coupe transversale du capteur à air.

La courbe de l'éclairement présente une allure avec des fluctuations dues au passage nuageux (Fig. 6). La courbe de la température de sortie du fluide suit une évolution logique en fonction de l'évolution du flux solaire.

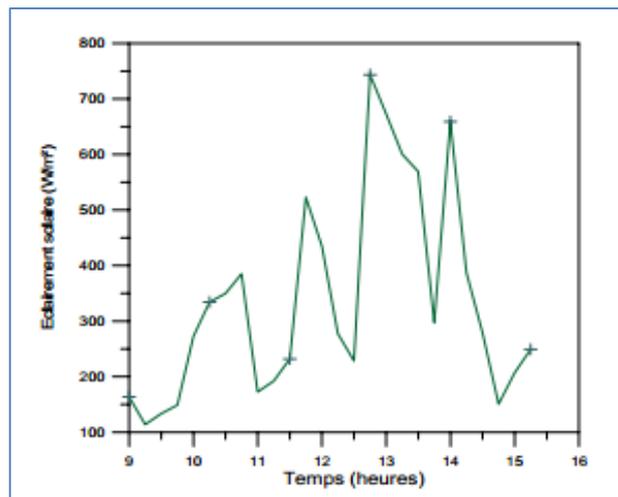


Figure II-6 : Evolution de l'éclairement global incliné.

Les résultats présentés dans ce document nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La température de sortie du fluide varie en fonction du flux solaire.
- ✓ Notre conception a permis d'obtenir des températures du fluide assez élevées à la sortie, favorable pour les exploiter dans le séchage des produits agro-alimentaires.
- ✓ Ces résultats expérimentaux nous aideront à une éventuelle analyse théorique du système expérimental.

A. Ahmed-Zaïd et al (2001), Ont étudié expérimentalement l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur. L'utilisateur est amené à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique. Ils ont introduit des chicanes (obstacles) pour améliorer le couple rendement-écart de température du capteur.

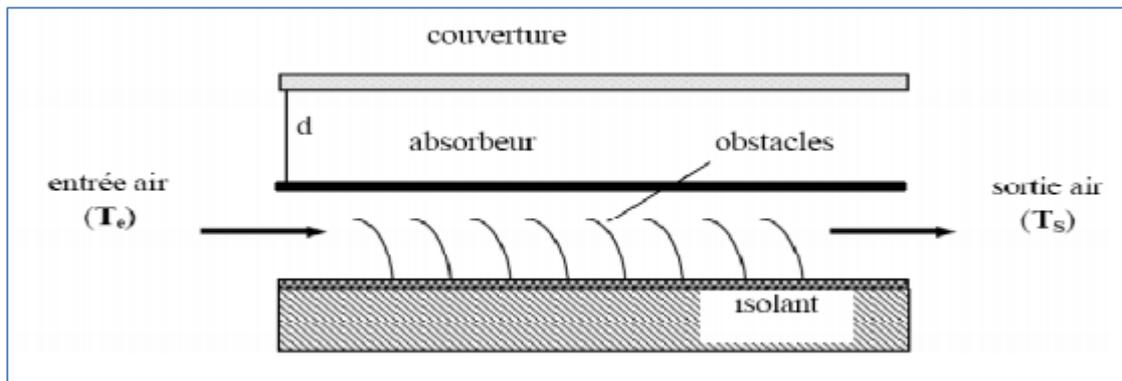


Figure II-7 : Le capteur solaire plan à air avec des chicanes (obstacles).

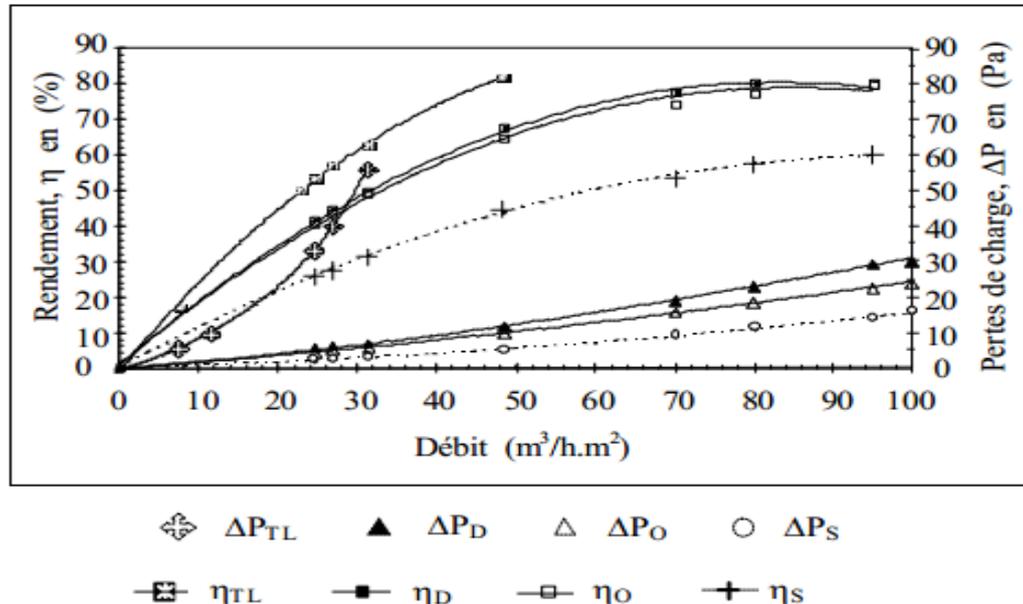


Figure II-8 : Variation du rendement (η) et des pertes de charge (DP) en fonction du débit Q_v , capteur SC, Capteur muni de DCL, OCL puis TL.

Cette étude a montré que l'usage des chicanes dans la veine dynamique d'un capteur solaire plan demeure un moyen efficace pour l'amélioration de ses performances. L'ensemble des résultats présentés montre bien la nette amélioration apportée par

l'utilisation des obstacles TL et DCL. Les quantités de chaleur récupérée par l'air en léchant l'absorbeur dépendent des bonnes performances du capteur [7]. Cependant, le respect de la température idéale de l'air de séchage est indispensable pour prendre en considération quelques contraintes (qualité, saveur, couleur et valeur alimentaire) imposées par le produit fini. Par conséquent, à l'entrée de l'armoire la température de séchage doit être limitée à la valeur maximale exigée par le produit fini.

Naphon et Congtragool,2003 ont étudié numériquement les caractéristiques du transfert de chaleur et des performances thermiques de cinq différents capteurs solaires à air avec des plaques d'absorption planes (figure I.7). Parmi ces modèles, le capteur avec simple vitrage (figure I.7 (A)) offre la plus faible efficacité thermique, car les pertes de chaleur convectives et radiatives forcées sont dominantes, tandis que, la performance thermique du modèle (E) est la plus élevée. Pour diminuer les pertes de chaleur et augmenter la performance thermique, il faut développer les configurations du réchauffeur à air solaire comme les modèles (B), (C), (D) et (E) (figure I.7). En outre, la position de la plaque d'absorption est aussi un facteur important pour l'amélioration de l'efficacité du capteur solaire.

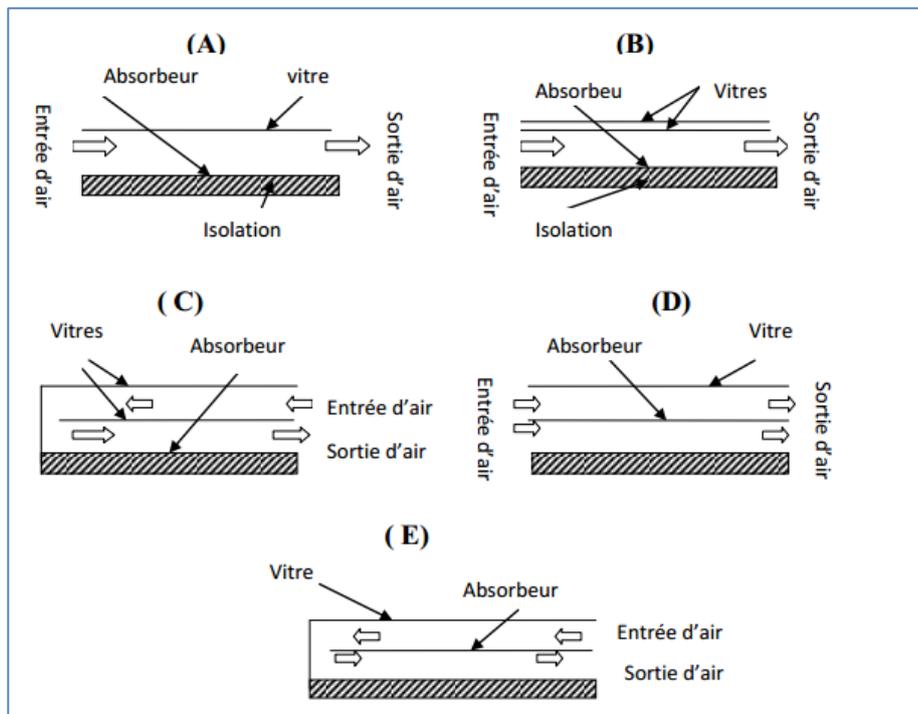


Figure II-9 : Diagramme schématique des capteurs solaires à air.

N. Moumimi et al (2004), Au début ils ont créé un écoulement turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière et ont réduit les zones mortes par l'utilisation des obstacles avec des

formes variées rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement pour améliorer le facteur d'efficacité de ces capteurs solaires. Deuxièmement et pour la même configuration, ils ont entrepris une étude sur l'évaluation du coefficient du transfert.

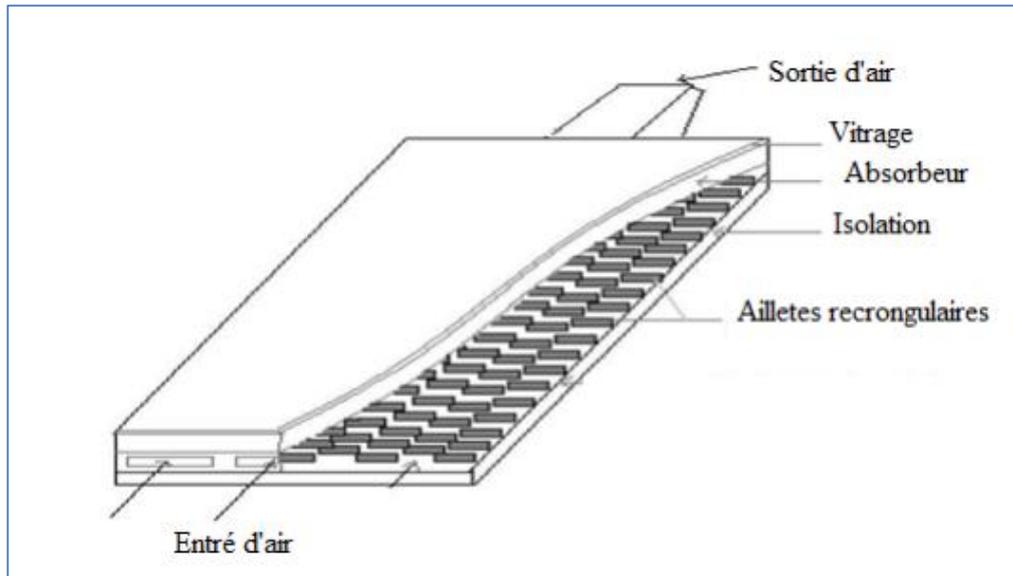


Figure II-10 : Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement.

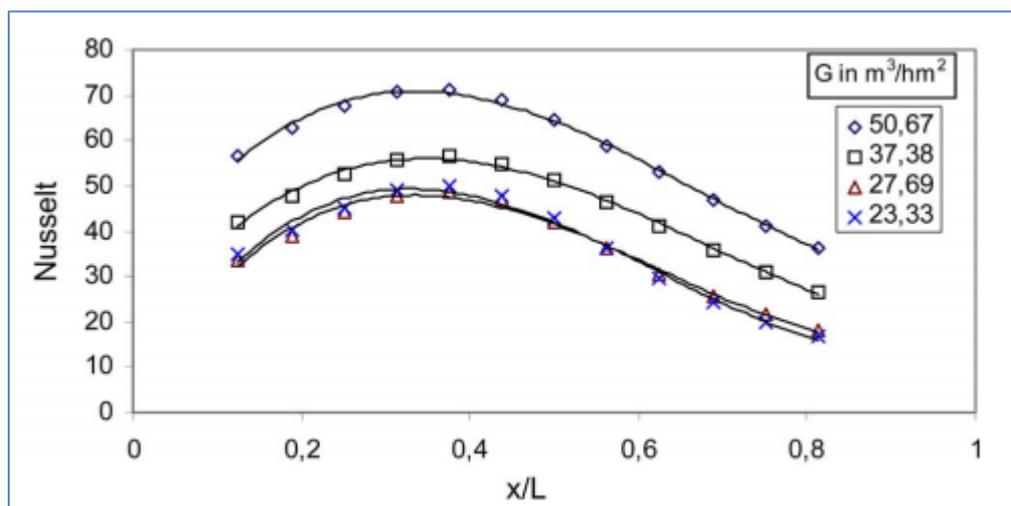


Figure II-11 : Nombre de Nusselt par rapport au paramètre (x/L) pour différents débits de débit d'air inférieurs à $50 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (plaque à ailettes avec absorbteur non sélectif, $U \frac{1}{4} 900 \text{ W} = \text{m}^2$ et $T_{fe} \frac{1}{4} 26 \text{ vC}$).

Au terme de cette étude, à travers les expériences entreprises, il sont déterminé les profils de température de l'air et de la plaque absorbante en présence d'ailettes rectangulaires. Il résulte des valeurs enregistrées que l'ajout d'ailettes permet d'augmenter

le transfert de chaleur. Quant à la sélectivité de l'absorbeur, elle ne représente pas une amélioration remarquable de la présence d'ailettes. Cela s'explique par le fait que l'absorbeur non sélectif se réchauffe en l'absence d'ailettes et émet d'avantage, donc il y a plus de pertes thermiques, alors que si l'absorbeur est sélectif, les pertes sont relativement faibles et la différence des coefficients d'émission est compensée par la présence d'ailettes qui refroidir l'absorbeur. Nous avons également donné une approche approximative au calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection dans le conduit du canal d'air, le modèle adopté tient compte de la géométrie de la nature de l'absorbeur.

Paisarn, 2005. A étudié numériquement la performance et la génération de l'entropie dans un capteur solaire à air double passe avec ailettes longitudinales. Les caractéristiques du transfert de chaleur du double passage de l'air sont dérivées à partir des équations de conservation de l'énergie. Il a étudié les effets du dimensionnement d'ailette sur le transfert de chaleur. Les prévisions sont faites pour un débit massique d'air compris entre 0,02 et 0,1 kg/s. Il a constaté que l'efficacité thermique augmente en augmentant la hauteur et le nombre des ailettes. La génération d'entropie est inversement proportionnelle à la hauteur et au nombre des ailettes.

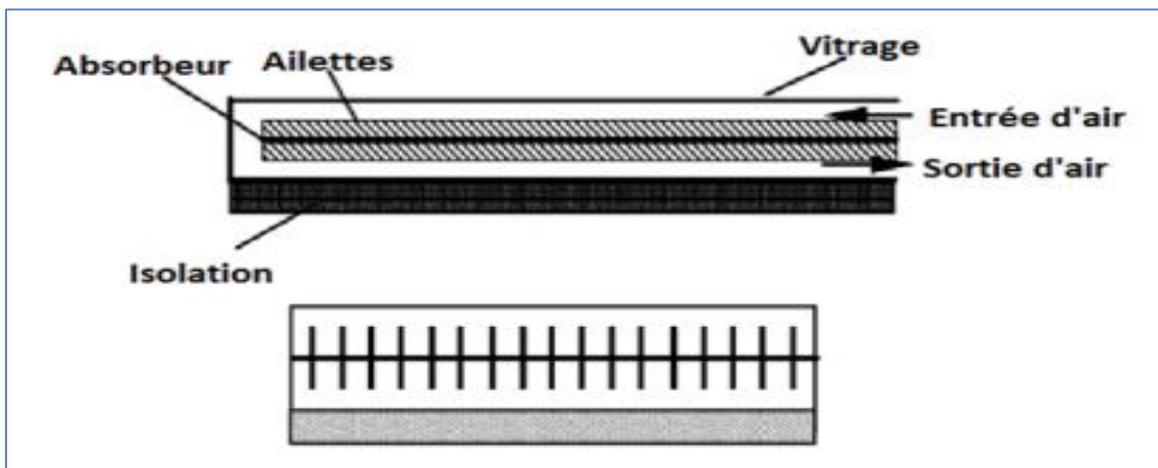


Figure II-12 : Schéma d'un capteur solaire avec ailettes.

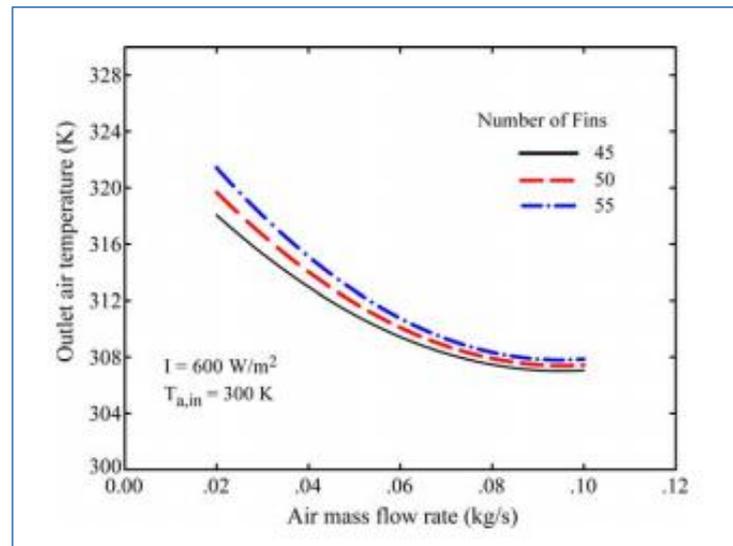


Figure II-13 : Variation de la température de l'air de sortie avec la masse d'air pour le débit.

Cette étude présente le modèle mathématique pour prédire les caractéristiques de transfert de chaleur, les performances et la génération d'entropie du réchauffeur d'air solaire à double passage avec ailettes longitudinales. L'effet de la hauteur et du nombre d'ailettes sur les performances et la génération d'entropie est considéré. Il a été constaté que l'efficacité thermique augmente avec l'augmentation de la hauteur et du nombre d'ailettes. La génération d'entropie est inversement proportionnelle à la hauteur et au nombre d'ailettes.

S. Youcef-Ali (2005), a fait une étude expérimentale sur un capteur solaire, auquel il a introduit des plaques minces rectangulaires orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur. L'étude compare aussi expérimentalement le cas d'un capteur à doubles couvertures à celui d'un capteur à triples couvertures.

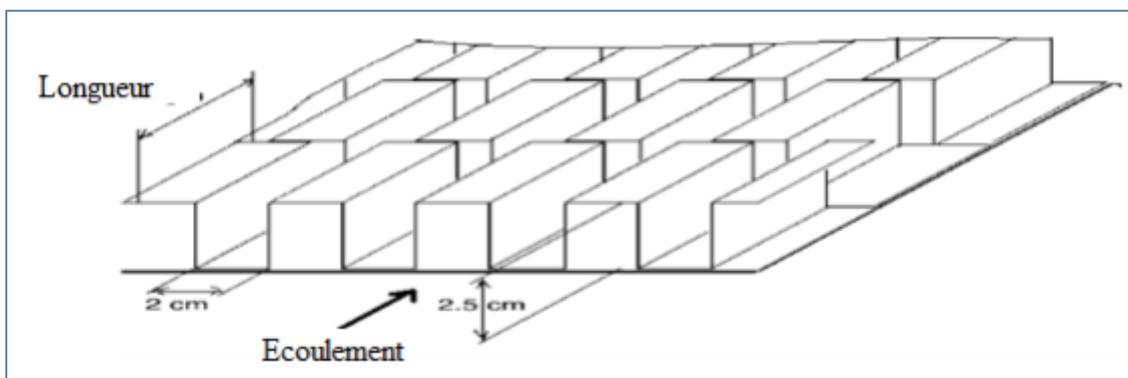


Figure II-14 : Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur.

Paisarn ,2005 a étudié numériquement l'effet du milieu poreux sur la performance d'un capteur solaire à air à double passe. L'effet de la conductivité thermique des milieux poreux sur les caractéristiques de transfert de chaleur et sur les performances est pris en considération. A la fin de son étude, il a trouvé que le capteur solaire avec le milieu poreux a une efficacité thermique de 25.9% plus élevée que sans milieu poreux. La conductivité thermique du milieu poreux a un effet considérable sur la performance thermique du capteur solaire.

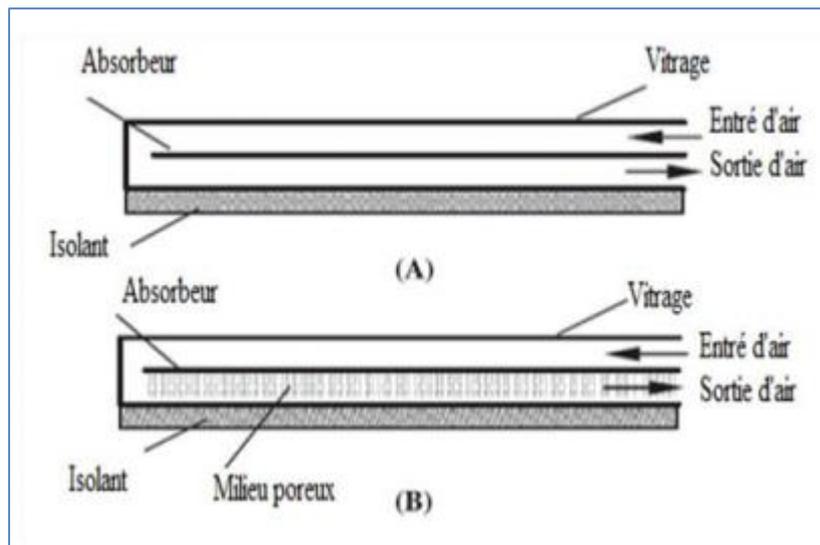


Figure II-15 : Schéma d'un capteur solaire ; (A) sans milieu poreux, (B) avec milieu poreux.

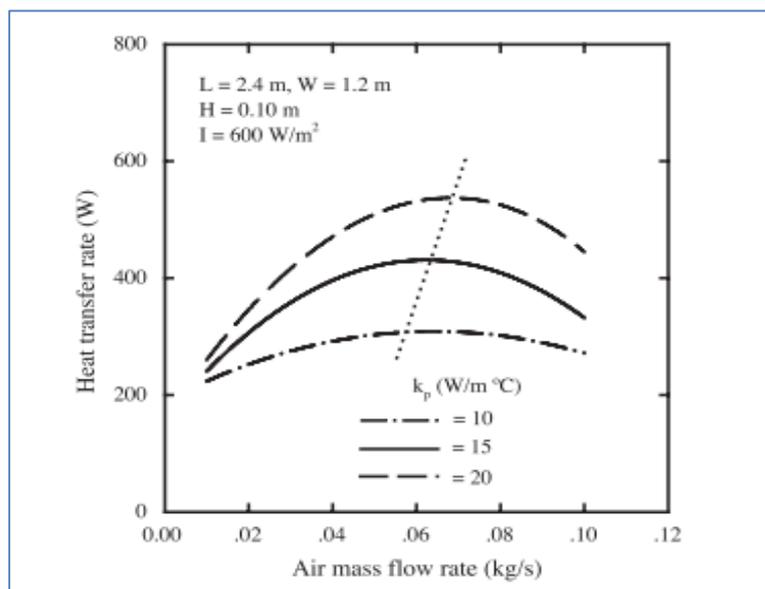


Figure II-16 : Effet de k_p sur Q .

Cette étude présente le modèle mathématique pour prédire les caractéristiques de transfert de chaleur et les performances du réchauffeur d'air solaire avec et sans milieu poreux. Le réchauffeur d'air solaire avec les milieux poreux offre une efficacité thermique 25,9% plus élevée que celui sans milieux poreux. La conductivité thermique des milieux poreux a un effet significatif sur les performances thermiques de l'aérotherme solaire. Le modèle est validé par comparaison avec les données expérimentales de Sopian et al. avec des erreurs moyennes de 18,4% et 4,3% pour les aérothermes solaires avec et sans média poreux, respectivement

Karim et Hawlader, 2006 Ont étudiés théoriquement et expérimentalement trois capteurs solaires à air avec différentes formes d'absorbeurs, à savoir, plaque plane, à ailettes et en Ondulé. Les capteurs ont été testés en modes simple et double passe pour étudier l'ampleur de l'amélioration de l'efficacité qui pourrait être obtenue sans augmenter la taille ou le coût du capteur solaire. Des séries d'expériences ont été réalisées, dans des conditions climatiques de Singapour. L'opération à double passage a amélioré l'efficacité de tous les trois collecteurs, l'efficacité maximale est obtenue à un débit de 0,056 kg/(m².s). Ils ont constaté que le capteur en V-ondulé était le capteur le plus efficace et que celui à plaque plane était le moins efficace. Les résultats ont montré que le collecteur de V-ondulée est de 10 à 15 et 5 à 11% plus efficace en modes simple passe et doubles passes, respectivement, par rapport aux capteurs plans, de plus, il est de 2 à 5% et de 5 à 11% plus efficace par rapport aux capteurs à ailettes et à plaque plane, respectivement, cela est expliqué par l'avantage significatif d'absorber une plus grande quantité de rayonnement solaire, en raison de la réflexion multiple et de l'absorption du rayonnement incident.

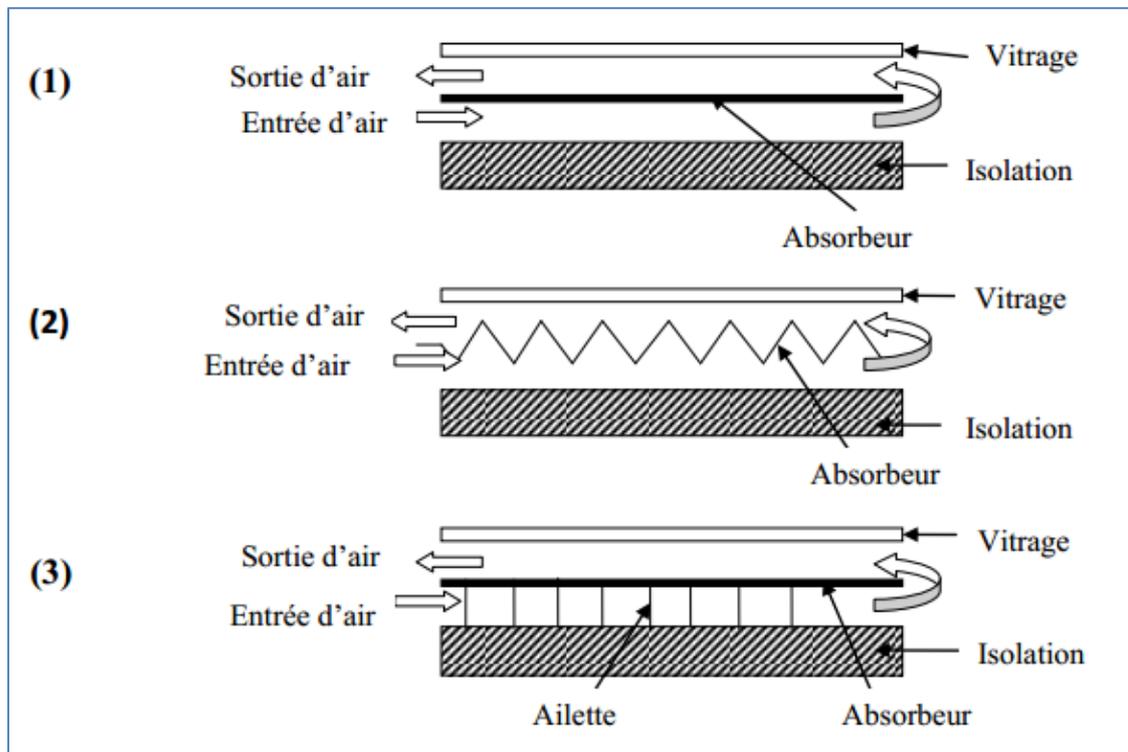


Figure II-17 : Schéma des trois capteurs étudiés, (1) à plaque plane, (2) à plaque ondulées-V, (3) à plaque munie d'ailettes.

Une étude expérimentale et théorique a été réalisée par [El-Sebaï et al, 2007](#) leur idée consiste à placer un lit garni de calcaire et du gravier sous la plaque chauffante d'un capteur solaire à double passes et à double vitrage aussi. Ce mélange de calcaire et du gravier a été fourni pour agir comme un support étendu pour le transfert de chaleur. Le capteur était orienté vers le sud et incliné avec un angle de 30° par rapport à l'horizontale pour maximiser le rayonnement solaire incident sur le verre. Pour un débit de 0.05 kg/s , ils ont trouvé que la température finale a augmenté de 22-27% par rapport à un capteur solaire sans lit.

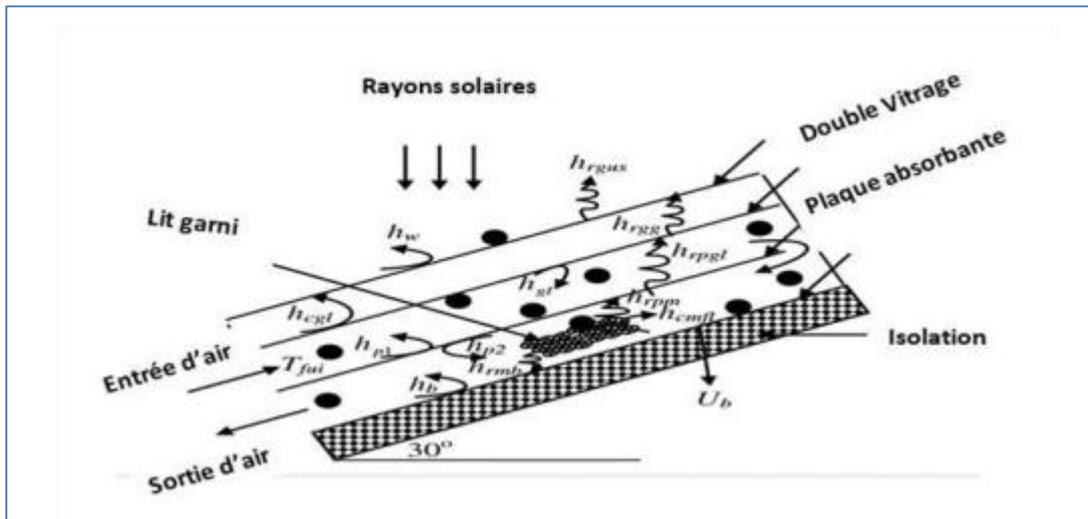


Figure II-18 : Capteur à air à double passe avec un lit garni de calcaire et du gravier.

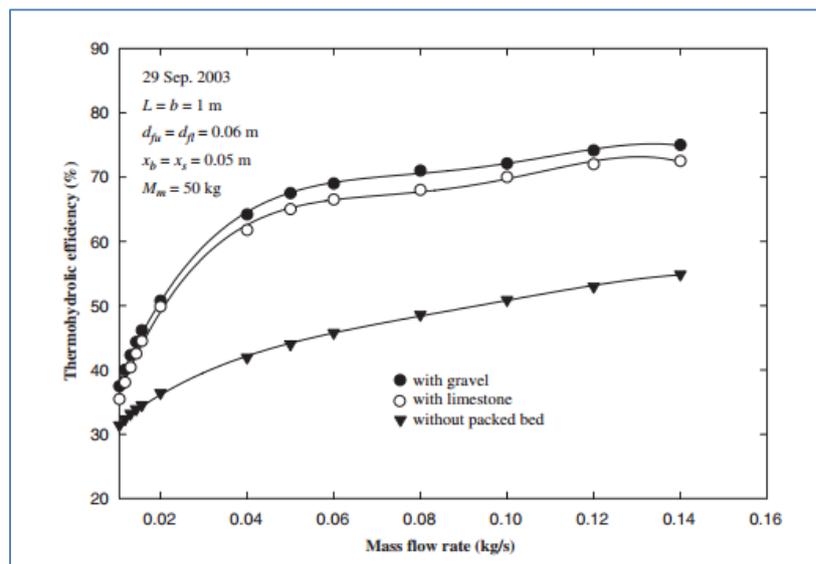


Figure II-19 : Capteur à air à double passe avec un lit garni de calcaire et du gravier

Sur la base des résultats obtenus pour le DPSAHPB, les conclusions suivantes sont tirées:

(i) Pour atteindre une température de sortie T_{f1f0} plus élevée de l'air suivant, après le coucher du soleil, il est conseillé d'utiliser le système avec des masses plus élevées ou de faibles porosités de l'emballage lit. (ii) L'efficacité thermohydraulique ZTH augmente avec l'augmentation de m_f jusqu'à une valeur typique de 0,05 kg / s au-delà de laquelle l'augmentation de ZTH devient insignifiante. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser le DPSAHPB avec des valeurs de m_f égales à 0,05 kg / s ou moins pour avoir une chute de pression plus faible à travers le système. (iii) Le gravier donne des performances légèrement

meilleures que le calcaire. (iv) Le modèle théorique proposé peut être utilisé pour prédire les performances thermiques du DPSAHPB avec une précision raisonnable compte tenu de certaines conditions climatiques.

C. Lertsatitthanakorn et al 2008, ont analysé la performance d'un capteur solaire thermoélectrique (TE) à double passe. Ce capteur est constitué d'un vitrage transparent, ouverture d'air, une plaque absorbante, modules électriques et ailettes rectangulaires. La radiation solaire incidente chauffe la plaque absorbante, alors cette différence de température est créée entre les modules thermoélectriques qui génèrent un courant direct. Seulement une petite partie de radiation solaire absorbée est convertie en électricité, tandis que le reste augmente la température de la plaque absorbante. L'amélioration du système peut être atteinte par l'utilisation du système capteur solaire à double passe et TE technologie.

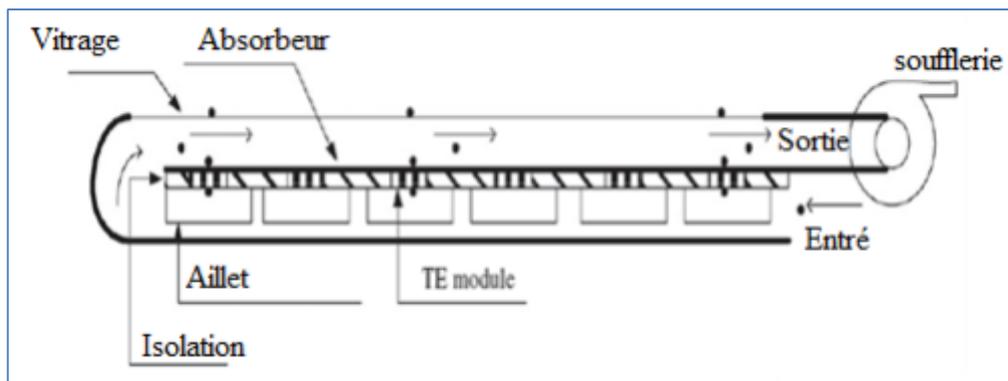


Figure II-20 : Diagramme schématisique du capteur solaire TE.

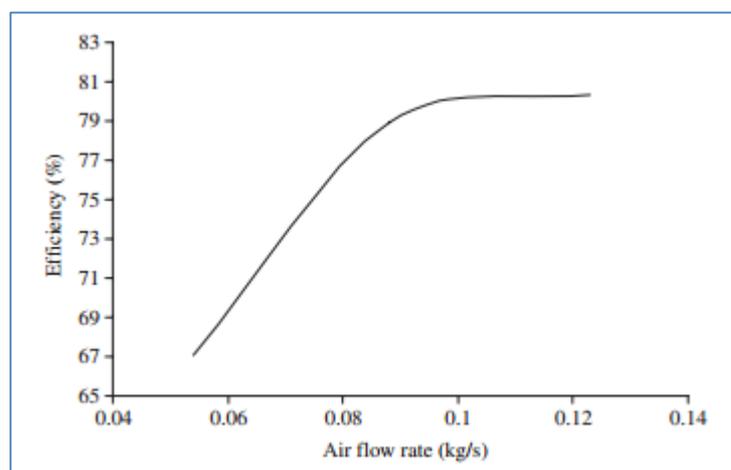


Figure II-21 : Diagramme schématisique du capteur solaire TE.

La technologie de capteur solaire TE fournit une solution pour améliorer les rendements énergétiques par unité de surface d'un capteur solaire. L'approche des aérothermes solaires TE est particulièrement adaptée à la plupart des applications de séchage agricole. Nous avons utilisé l'air comme fluide suivant pour extraire la chaleur des modules TE et améliorer l'efficacité thermique du capteur solaire. Les résultats ont montré que le capteur solaire TE génère une puissance électrique de 2,13 W à la différence de température de 22,8 °C. L'efficacité thermique augmente avec l'augmentation du débit d'air. L'efficacité thermique maximale était de 80,3% au débit d'air de 0,123 kg / s, l'efficacité électrique d'environ 5,7%. Pendant ce temps, l'efficacité globale maximale était de 72,2% au débit d'air de 0,088 kg / s. Le modèle théorique proposé peut être utilisé pour prédire la puissance de sortie des modules TE avec une précision raisonnable compte tenu des conditions de différence de température.

Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires à air, [K. Aoues et al,2009](#) 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.

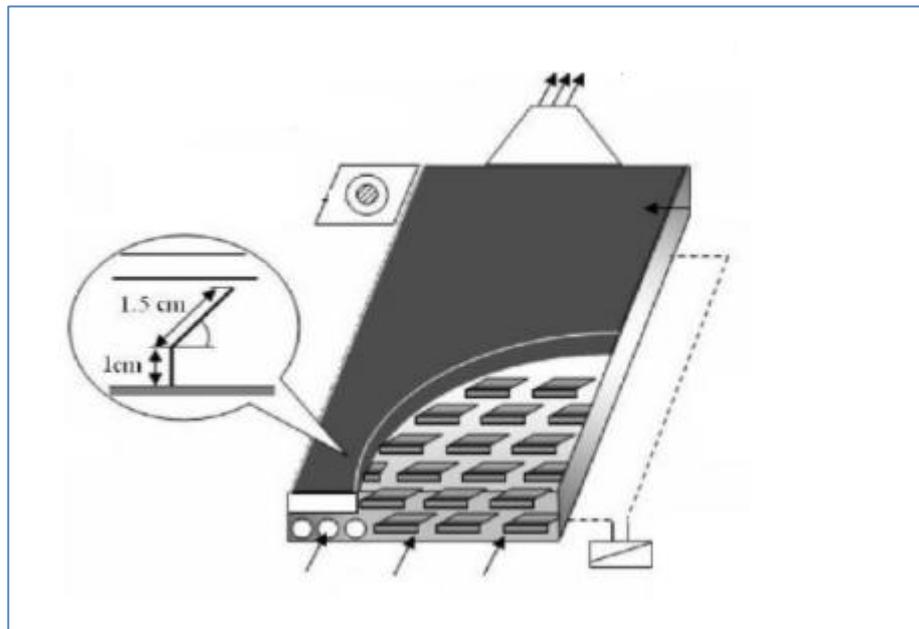


Figure II-22.1 : Dispositif expérimental.

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 $d=10\text{cm}$ et $d=5\text{cm}$ suivant deux configurations A et B qui se différencient par le nombre de rangés respectivement égale à 152 et 256 chicanes.

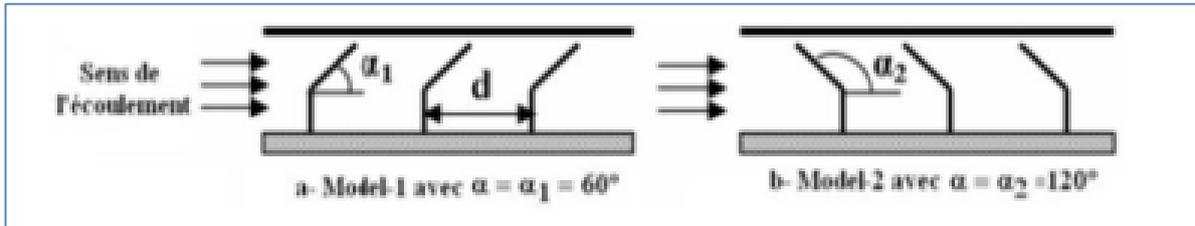


Figure II-22.2 : Schéma descriptif des chicanes.

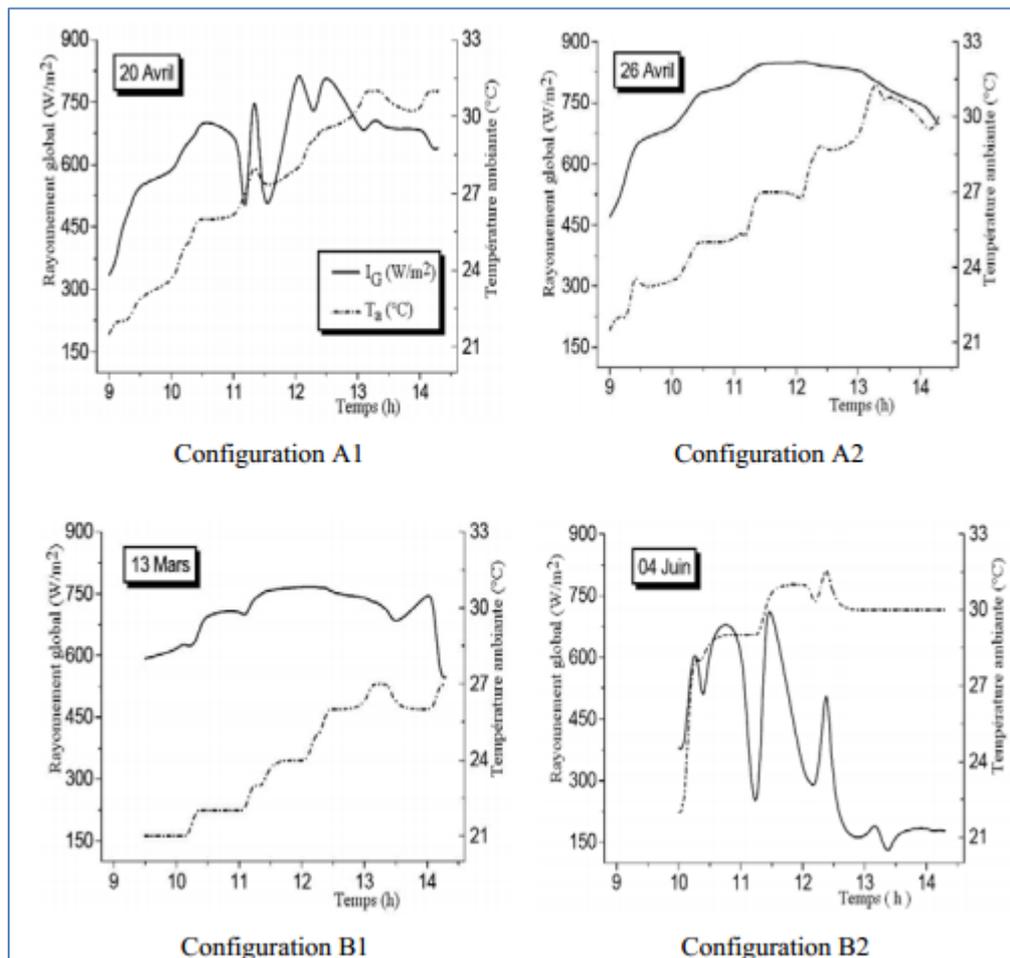


Figure II-23 : Evolution du rayonnement global et de la température ambiante en fonction du temps.

K. Sopian et al ,2009. Ont étudié l'évaluation de l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec et sans milieu poreux. Un modèle théorique a été développé pour le capteur solaire à double passe. Une organisation expérimentale a été étudiée. Le milieu poreux a été arrangé avec différents porosité pour augmenter le transfert de chaleur. Ils ont étudié les effets du débit massique et de la radiation solaire sur l'efficacité thermique du capteur solaire à double passe.

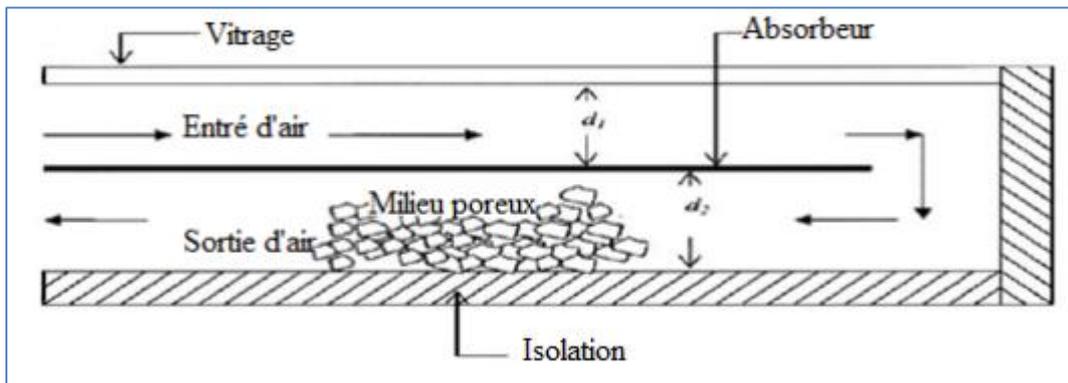


Figure II-24 : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux.

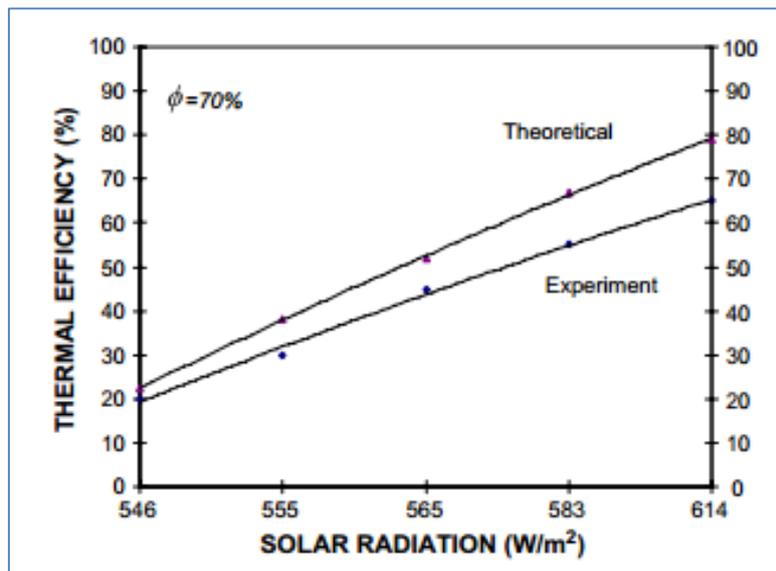


Figure II-25 : variation des rendements expérimentaux et théoriques du capteur solaire à double passage avec poreux

L'ajout des milieux poreux dans le deuxième canal du le capteur solaire à double passage augmente les performances du capteur. Le modèle théorique a été développé et la validation expérimentale a été effectuée. Il a été démontré que la simulation théorique et les données

expérimentales étaient en étroite concordance. Présentation des supports poreux dans le second canal augmente la zone de transfert de chaleur. Ce type de collecteur a performances thermiques supérieures par rapport au capteur solaire à passage unique conventionnel. L'efficacité thermique typique du capteur solaire à double passage avec milieu poreux est d'environ 60 à 70%.

Ahmad Fudholi et al,2009. Ont évalué les performances d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes placées dans le second canal. Ils ont étudié théoriquement et expérimentalement l'effet du débit massique et du rayonnement solaire sur les performances thermiques d'un capteur solaire. Un état d'équilibre implique une solution pour déterminer la température du fluide à la sortie.

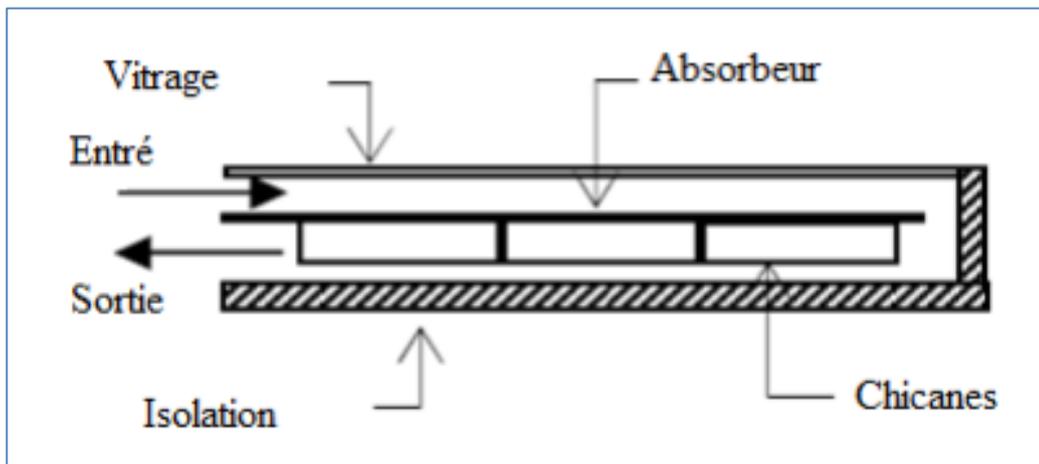


Figure II-26 : Schéma d'un capteur solaire à air à double passage avec des ailettes placées dans le second canal.

Ils trouvaient pour trois valeurs du rayonnement solaire $I=123\text{w/m}^2$, $I=772\text{w/m}^2$ et $I=788\text{w/m}^2$, l'efficacité du capteur augmente en fonction du débit massique comme la montre la Figure. II-23, et cette dernière décroît linéairement lorsque le rapport $(T_0-T_a)/I$ augmente (Figure. I-19), ils concluaient aussi que le rendement du capteur est fortement dépendant du débit massique, par contre le capteur solaire à double passage avec des ailettes échelonnées en lignes a une efficacité de plus de 75% pour un débit massique de plus de 0.08 kg/s.

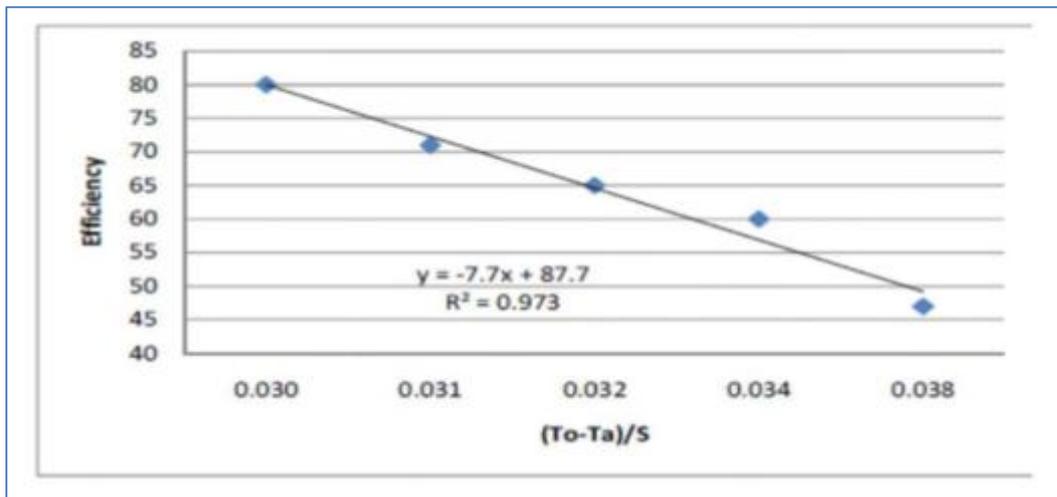


Figure II-27 : Variation du rendement thermique en fonction du rapport $(T_o - T_a)/S$.

Une analyse théorique et expérimentale a été réalisée par Ramani et al, 2010 sur un capteur solaire à air double passes (CSADP) avec et sans matériau poreux. Ils ont constaté que, les performances thermiques du CSADP avec un milieu poreux sont fortement influencées par la porosité. La comparaison des résultats révèle que le rendement thermique du collecteur solaire double passes avec matériau absorbant poreux est de 20-25% et 30-35% supérieur à celui du collecteur solaire double passes sans matériau absorbant poreux et du collecteur à simple passe respectivement. Un facteur important qui doit être considéré lors de l'utilisation de matériau poreux dans le but d'augmenter le taux de transfert de chaleur est la chute de pression.

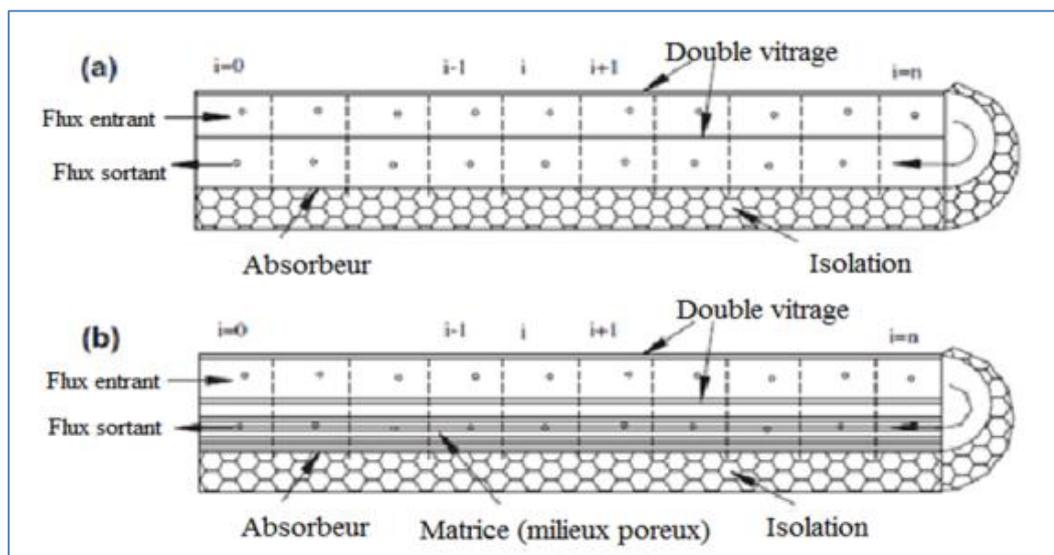


Figure II-28 : Arrangement double passes : (a) sans milieu poreux, (b) avec milieu poreux.

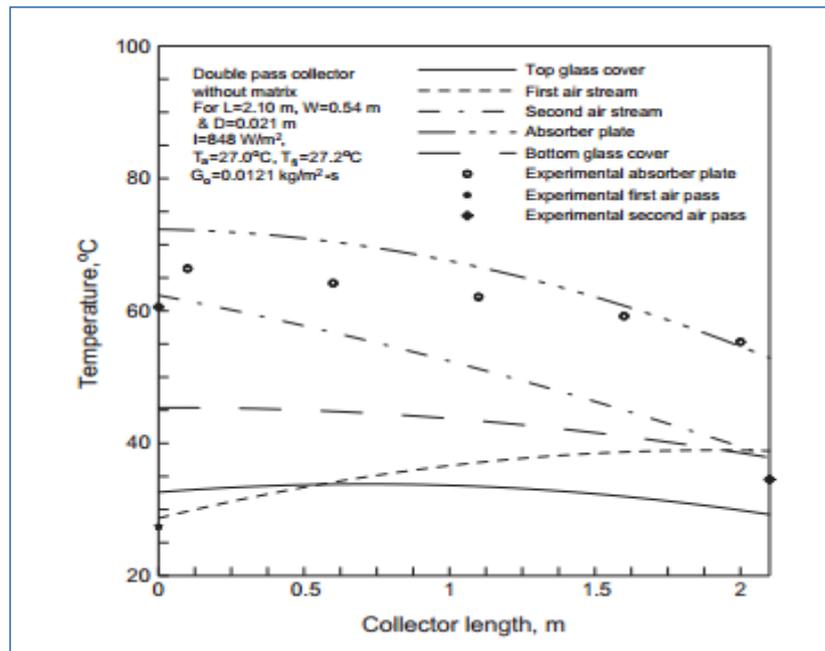


Figure II-29 : Variations de température sur toute la longueur du collecteur (sans matériau poreux).

La conclusion suivante a été tirée de cette étude :

- ✓ Capteur solaire à double flux à contre-courant avec poreux le matériau dans le deuxième passage d'air est l'une des conceptions importantes et attrayantes pour améliorer la chaleur performance.
- ✓ Performance thermique du collecteur d'air solaire à double passage avec un matériau absorbant poreux est 25% plus élevé que celui de capteur solaire à double passage sans porosité
- ✓ Matériau absorbant et 35% plus élevé que celui d'un seul passer le collecteur.
- ✓ Pour un capteur solaire à efficacité thermique plus élevée doit fonctionner à un flux massique plus faible et une porosité plus élevée

Rakesh Kumar et Marc A. Rosen 2011, ont étudié la performance d'un capteur solaire PV/T à air à double passe avec et sans ailettes placées dans le canal inférieur. Les ailettes sont arrangées perpendiculairement à la direction de l'écoulement de l'air pour agrandir l'efficacité et le taux du transfert thermique. Les effets des paramètres de fonctionnement et les paramètres climatique sont évalués sur la température de sortie de l'air, la température de la cellule, l'efficacité thermique, et l'efficacité électrique. Les effets de la présence des

ailettes dans le canal inférieur, les profondeurs des canaux, le débit massique et la température de l'entrée de l'air sont évalués dans l'efficacité thermique et électrique.

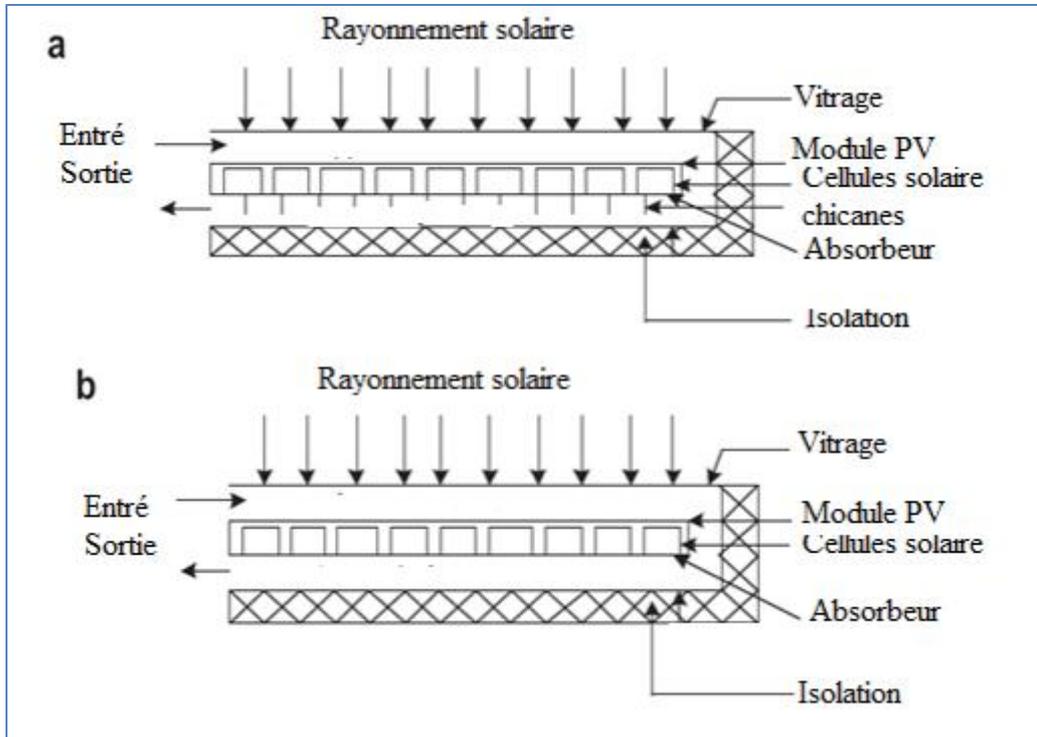


Figure II-30 : Capteur solaire PV/T à double passe : (a) avec ailettes, (b) sans ailettes.

Chii-Dong Ho et al 2011, ont étudié l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air à double passe. Le dispositif double passage a été construit par insertion de la plaque absorbant dans la conduite d'air pour diviser la en deux canaux (supérieur et inférieur) et pour doubler la surface de transfert de chaleur. De plus l'avantage du recyclage externe appliqué aux capteurs solaires est de l'augmentation de la puissance de la convection thermique forcé.

L'efficacité du collecteur augmente lorsque m' , n et I_0 augmentent. Une amélioration considérable de l'efficacité du collecteur peut être obtenue si le l'opération est réalisée avec un recyclage externe. L'amélioration augmente avec l'augmentation du taux de reflux, en particulier pour un fonctionnement à un débit d'air inférieur avec une température d'air d'admission plus élevée. Il est montré que l'effet souhaité d'augmenter la vitesse du fluide en utilisant le recyclage l'opération pour surmonter la force motrice indésirable diminue (différence de température) pour le transfert de chaleur dû au remisage entrée. Nous pouvons

voir plus de 80% d'amélioration de l'efficacité du collecteur est obtenue en utilisant l'opération de recyclage

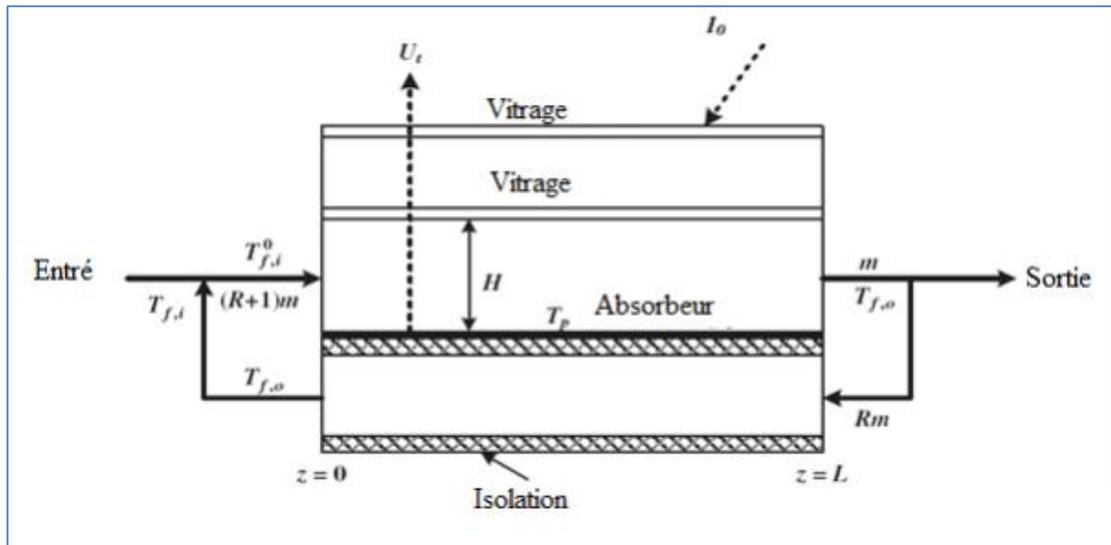


Figure II-31 : Diagramme schématique d'un capteur solaire.

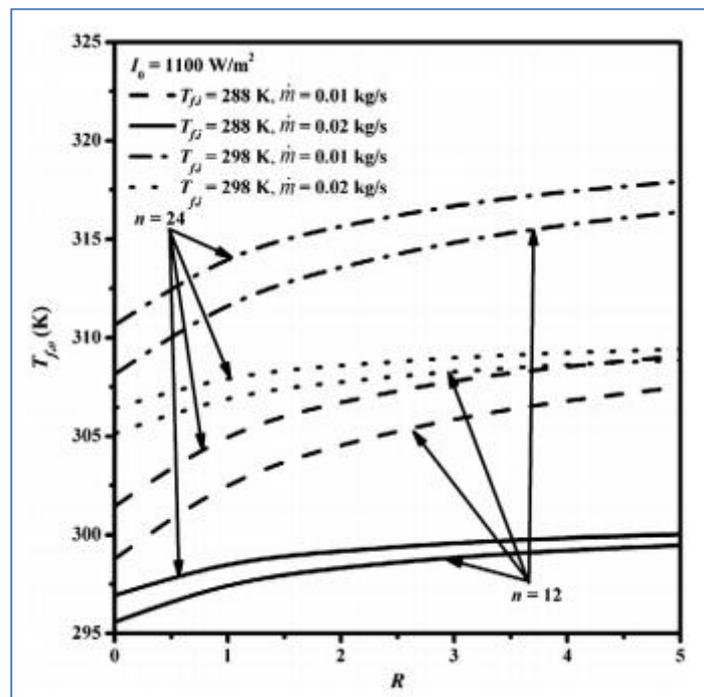


Figure II-32 : Diagramme schématique d'un capteur solaire

Hernández et Quiñonez ,2013. ont développés deux modèles analytiques décrivant le comportement thermique des réchauffeurs d'air solaire double passes Co-courant et contre-courant. Le modèle correspondant au capteur solaire à air (CSA) double passes Co-courant indique que l'écoulement d'air entre la plaque d'absorption et le vitrage est plus important

que celui qui circule à travers le canal inférieur. Le modèle correspondant au CSA double passage à contre-courant indique que l'augmentation du débit d'air augmente proportionnellement le pourcentage d'élévation de la température d'air dans le canal. Par conséquent, si le débit massique d'air doit être élevé, il est plus commode d'utiliser des CSA doubles passes à écoulement parallèles qu'un écoulement à double passe contre-courant. À partir des bilans énergétiques dans chaque partie des deux types de CSA, des expressions algébriques pour les facteurs d'efficacité et les coefficients généraux de perte de chaleur ont été déduites, ainsi que les distributions de température de l'air le long des collecteurs. Dans les conditions climatiques de la simulation, l'efficacité intégrée de la période de 10h était de 46% pour le capteur à passage unique, 51% pour le capteur solaire à double passes parallèles et 57% pour le capteur double passage à contre-courant.

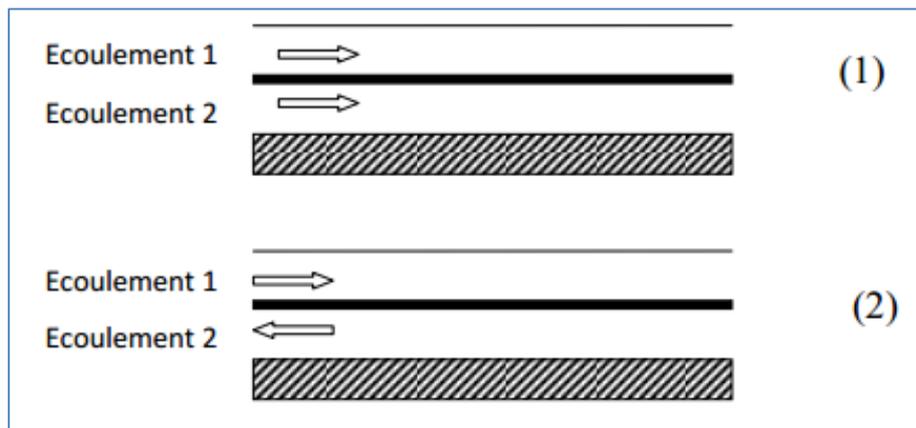


Figure II-33 : Schéma des deux modèles de CSA double passes étudiés, (1) Co-courant, (2) contre-courant.

Le modèle correspondant au capteur solaire à double flux parallèle prédit que le débit massique d'air passant entre la plaque d'absorbant et le couvercle transparent est plus grand que le débit massique circulant dans l'autre canal. Pour cette raison, la température de l'air dans le canal supérieur est inférieure à celle de l'air circulant entre la plaque absorbante et la surface inférieure de la plaque. La température de l'air à la sortie du collecteur est les températures de sortie moyennes pondérées des deux canaux, les poids de leurs flux massiques respectifs.

Avec tous les paramètres dérivés pour les deux configurations de flux étudié, il est possible d'évaluer le facteur d'évacuation de la chaleur du collecteur FR et, par conséquent, l'énergie utile générée par ces capteurs et leur efficacité instantanée. Les expressions

analytiques développés dans ce travail sont des outils précieux qui peuvent être inclus dans codes de calcul pour la conception et l'analyse thermique de l'énergie solaire des installations de chauffage à air ou pour optimiser des installations déjà opération.

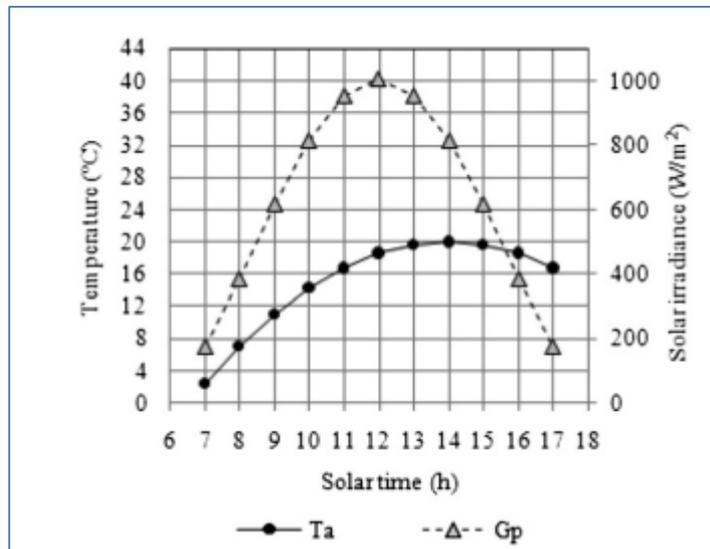


Figure II-34 : valeurs de la température ambiante et de l'irradiance solaire globale sur le plan du collecteur.

Fudholi et al.2013. Ont développé un modèle théorique utilisant l'analyse en régime permanent et ils l'ont comparé avec les résultats expérimentaux pour évaluer les performances et le cout d'un capteur solaire double passes avec et sans ailettes. Les résultats indiquent que le rendement thermique est proportionnel à l'intensité solaire à un débit massique spécifique, et l'augmentation du nombre de Nusselt provoque une augmentation de l'efficacité énergétique.

D'autre part, la fluctuation de l'efficacité de l'exergie était basée sur le nombre de Nusselt, la longueur du collecteur et le niveau d'intensité solaire. Les résultats montrent que, le capteur solaire double-passe avec ailettes produit un rendement énergétique de 10 à 78%, avec une température de sortie d'environ 35 à 115°C au nombre de Nusselt de 5,42 à 36,34, pour un débit massique allant de 0,04 à 0,09 kg /s, et d'une intensité solaire de 425 à 790 W/m², d'autre part, l'efficacité de l'exergie est comprise entre 6% et 30%. L'évaluation du coût annuel (AC) et du gain d'énergie annuel (AEG) du collecteur est effectuée. Le rapport coût-bénéfice (AC / AEG) du capteur solaire double passe avec et sans ailettes est présenté dans différentes combinaisons de débits massiques et d'intensités solaire. Le capteur solaire

double-passe avec ailettes est plus économique par rapport au capteur solaire double passe sans ailettes.

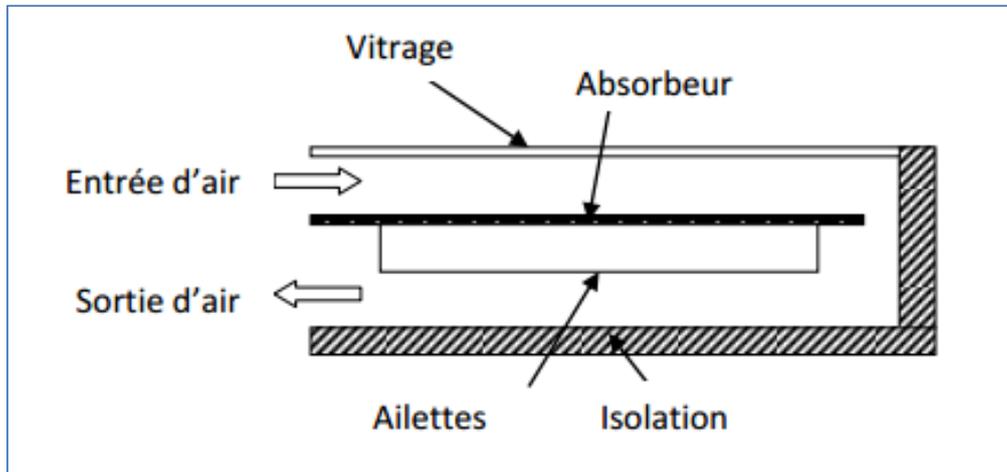


Figure II-35 : Schéma d'un capteur solaire double passes avec absorbeur à ailettes dans le second canal.

González et al,2014. Ont réalisés une étude expérimentale sur l'efficacité thermique d'un chauffe-air solaire double passe conçu et fabriqué pour le chauffage de l'air de la maison et le modèle thermique théorique développé pour décrire son comportement thermique. L'expérience a été effectuée pendant une période hivernale. Le capteur a été monté avec une pente de 40° orienté vers le nord, afin de maximiser l'intensité de l'éclairement solaire pendant l'hiver, le débit massique d'air moyen était de $0,020 \text{ kg /s}$. Le capteur a été simulé pour une irradiation solaire de 1000 W/m^2 , et une température d'air extérieur de 18°C . Les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle théorique ont été jugés en bon accord. Les températures de sortie d'air atteignaient respectivement 80°C et 75°C à l'heure du soleil avec et sans l'utilisation d'une résistance électrique. Le capteur a atteint une efficacité thermique d'environ 80%.

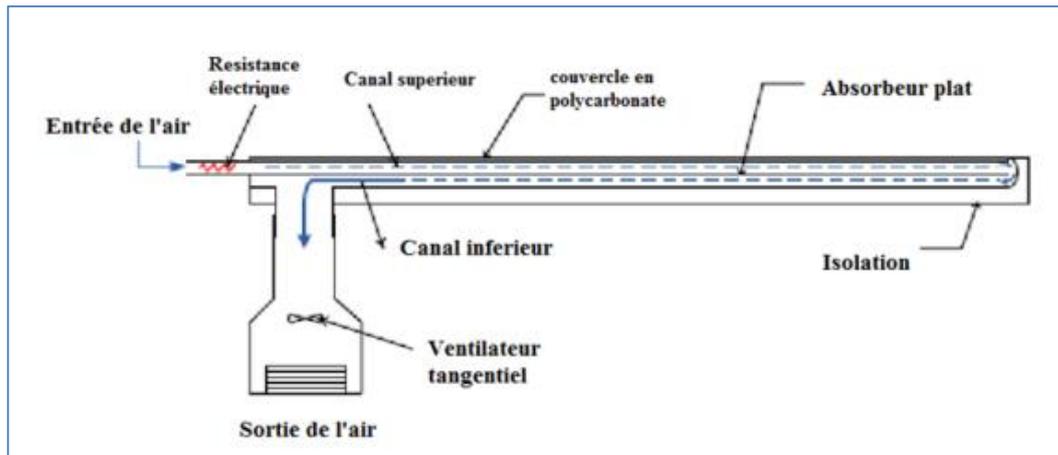


Figure II-36 : Schéma du collecteur d'air solaire double passes étudié.

Les résultats expérimentaux du 21 au 24 juin 2012. Dans les Figs. 3 et 4, il peut voir le jour le plus représentatif, qui est le 23 juin.

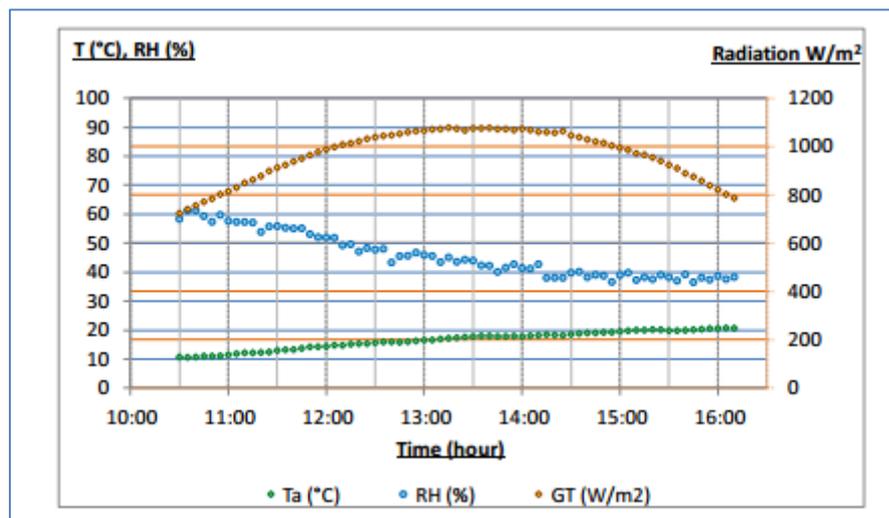


Figure II-37 : Schéma du collecteur d'air solaire double passes étudié.

L'étude expérimentale de l'efficacité thermique d'un aérotherme solaire à double passage conçu et construit à INENCO, Universidad Nacional de Salta, et le modèle thermique théorique développé pour décrire son comportement thermique ont été décrits. Ce modèle permet d'estimer la température de l'air à la sortie du capteur à partir de valeurs connues de la température extérieure et de l'éclairement solaire sur le plan du capteur. Le prototype a été expérimentalement caractérisé pendant quatre jours d'hiver sans nuages, avec un rayonnement solaire maximal sur le plan du collecteur d'environ 1100 W / m² et des températures de l'air extérieure allant de 8 °C à 23 °C. Des résultats expérimentaux ont été

réalisés pour une période hivernale et les prévisions du modèle théorique se sont révélées être en bon accord avec les données surveillées.

Labeled et al,2015 se sont concentrés sur les effets de l'utilisation de séchoirs solaires pour améliorer le temps de séchage. Ainsi, ils ont mené une étude comparative entre deux types de capteurs solaire d'air à plaque plane (CPP) avec une rugosité artificielle dans le conduit de canal d'air. Le modèle I: CPP d'air solaire à simple passe comportant des obstacles de forme trapézoïdale, et le modèle II: CPP d'air solaire à double passage comportant des obstacles de forme trapézoïdale aussi, et l'espace sous la plaque arrière est réservé au séchage de la récolte. La comparaison de ces deux modèles a pour but de déterminer le modèle le plus performant pour l'utilisation du séchage. Les rendements maximaux pour ces deux capteurs (modèle I et modèle II) sont 76,2% et 79,9%, respectivement à $q_m = 0,044$ kg/s. Ils ont utilisé le meilleur CPP (modèle II) pour sécher le henné avec des débits d'air différents, ils ont observé qu'il est plus intéressant de fonctionner avec un débit d'air d'environ 0,024 kg/s et une température de séchage moyenne autour de 45°C. Par conséquent, l'utilisation du CPP à double passage avec obstacles trapézoïdaux (modèle II) réduit de 20% le temps de séchage du henné par rapport au modèle I, et de 75% par rapport au séchage traditionnel.

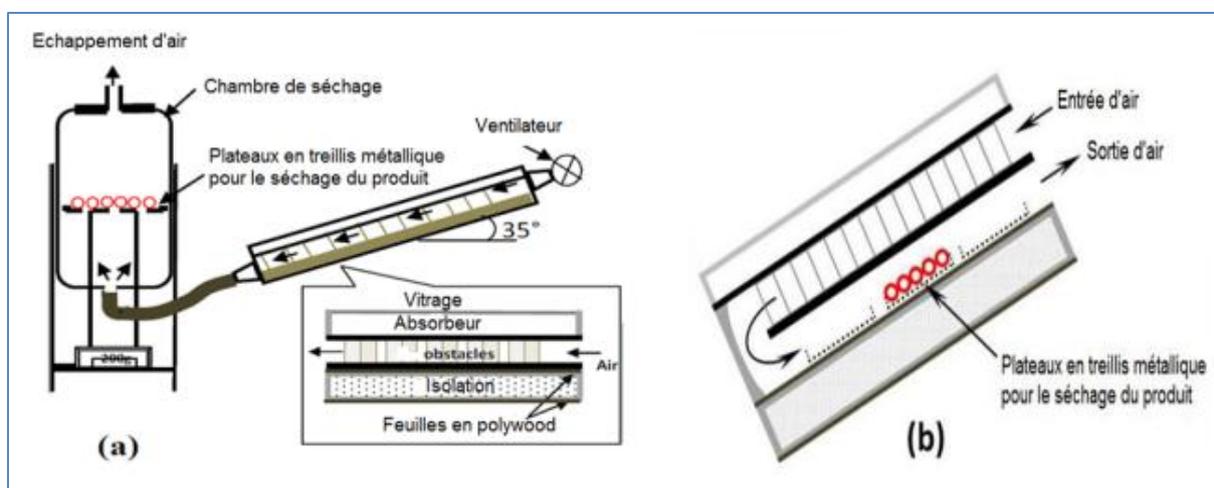


Figure II-38 : Dispositifs expérimentaux pour le séchage du henné; a) modèle I, b) modèle II.

Kalaiarasi et al.2016 ont fait une étude expérimentale comparative du capteur solaire à air (CSA) sans stockage de chaleur (type I) et avec un absorbeur et unité de stockage (type II) dans la ville de Madurai en Inde, sa latitude et sa longitude sont de 9,9N et 78,1E respectivement les performances ont été analysées en fonction de l'efficacité énergétique et

exégétique. Les deux CSA ont été testés à partir de 10: 00h à 18: 00 h pour deux différents débits massiques, $M1 = 0,018 \text{ kg /s}$ et $M2=0,026 \text{ kg / s}$. Le débit massique plus élevé améliore les performances du capteur. L'énergie maximale et l'efficacité d'exergie de la CSA de type I pour un débit massique de $M2=0,026 \text{ kg/s}$ est 32,07% et 19,79% respectivement. L'énergie maximale et l'efficacité d'exergie de la CSA de type II pour le même débit massique sont 59,02% et 37,53% respectivement. L'analyse énergétique et exégétique du CSA (type II) a révélé que son rendement est nettement plus élevé que le rendement conventionnel de la CSA (type I) ainsi les pertes thermiques diminuent et les performances thermiques augmentent.

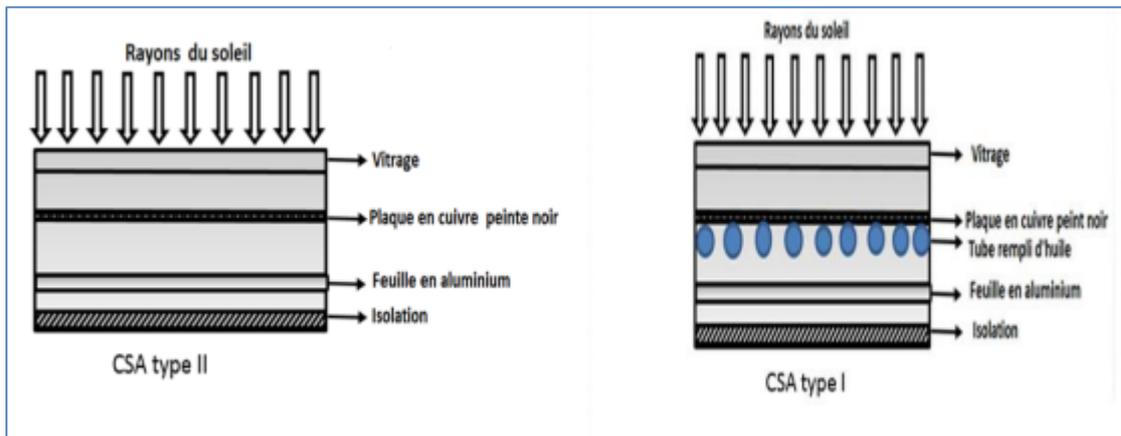


Figure II-39 : Capteurs solaires à air double passes avec et sans stockage de chaleur.

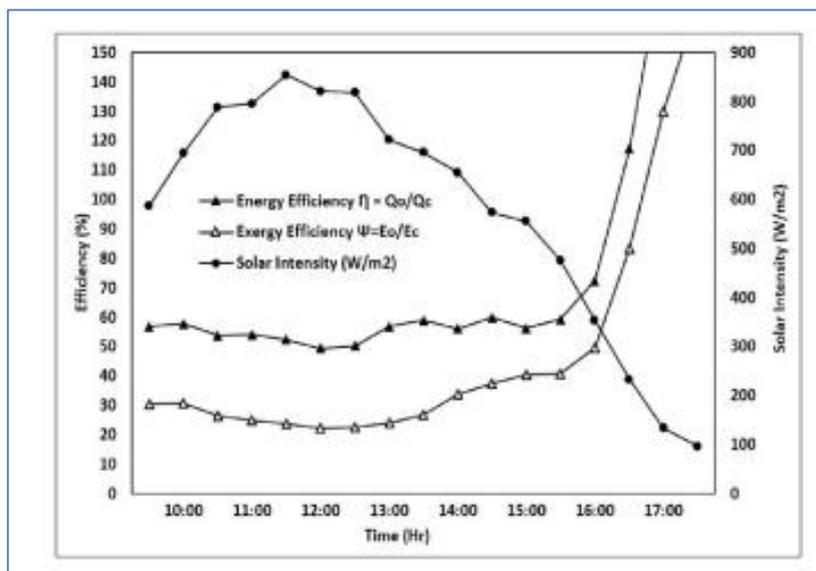


Figure II-40 : Capteurs solaires à air double passes avec et sans stockage de chaleur.

Une étude expérimentale comparative de l'HSA avec et sans chaleur absorbante-sensible intégrée spécialement conçue l'unité de stockage a été réalisée dans la ville de Madurai en Inde. Leur la performance a été analysée sur la base des performances énergétiques et exégétiques. Gains d'efficacité. Les deux SAH ont été testés de 10: 00e18: 00 h IST pour deux débits massiques différents, $m_{\dot{}} \frac{1}{4} 0,018 \text{ kg / s}$ et $0,026 \text{ kg / s}$. le des faits et des résultats intéressants de l'étude comparative pourraient être résumés comme suit.

B.Abdelillah et al, 2016, Ont fait une simulation numérique d'un capteur solaire à air à double passe .Au milieu du capteur solaire pour augmenter le transfert de chaleur dans les deux veines d'air dynamique par l'augmentation de la surface d'échange thermique entre le fluide caloporteur et l'absorbeur. Une étude thermique a été réalisée sur les effets de la variation des dimensions géométriques (la hauteur et la longueur de l'absorbeur) sur l'efficacité thermique du capteur solaire à air.

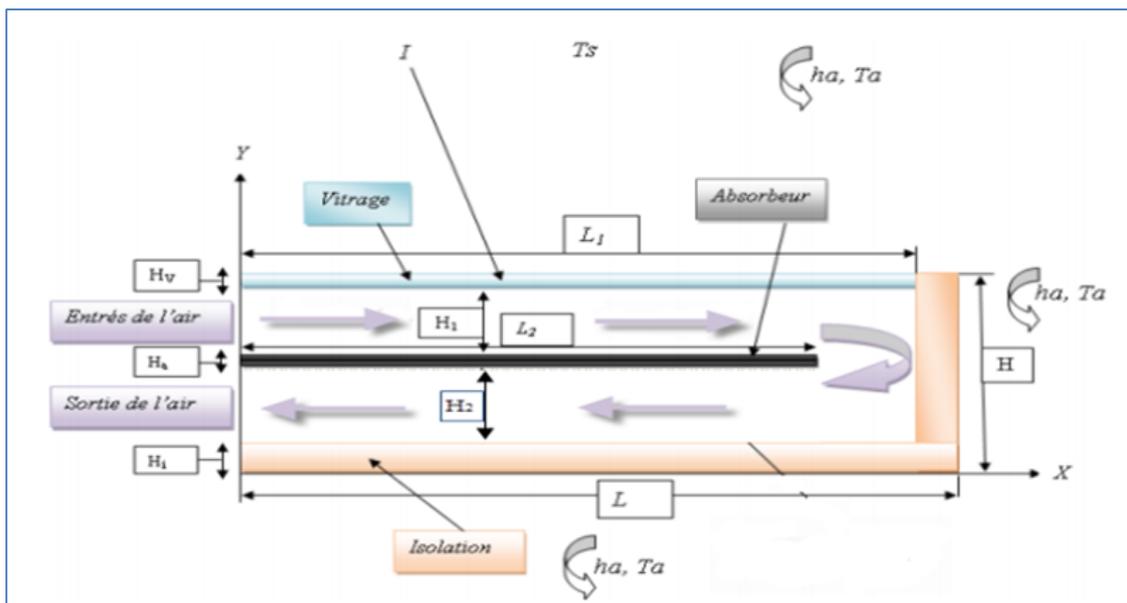


Figure II-41 : Schéma d'un capteur solaire à air à double passe.

Simulations numériques a été réalisée par R.Messouda et al, 2018. De l'influence du matériau de l'absorbeur sur le comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à double passe, en utilisant le code Fluent pour étudier l'effet du matériau de l'absorbeur sur le comportement dynamique et le flux d'air du programme thermique récente.

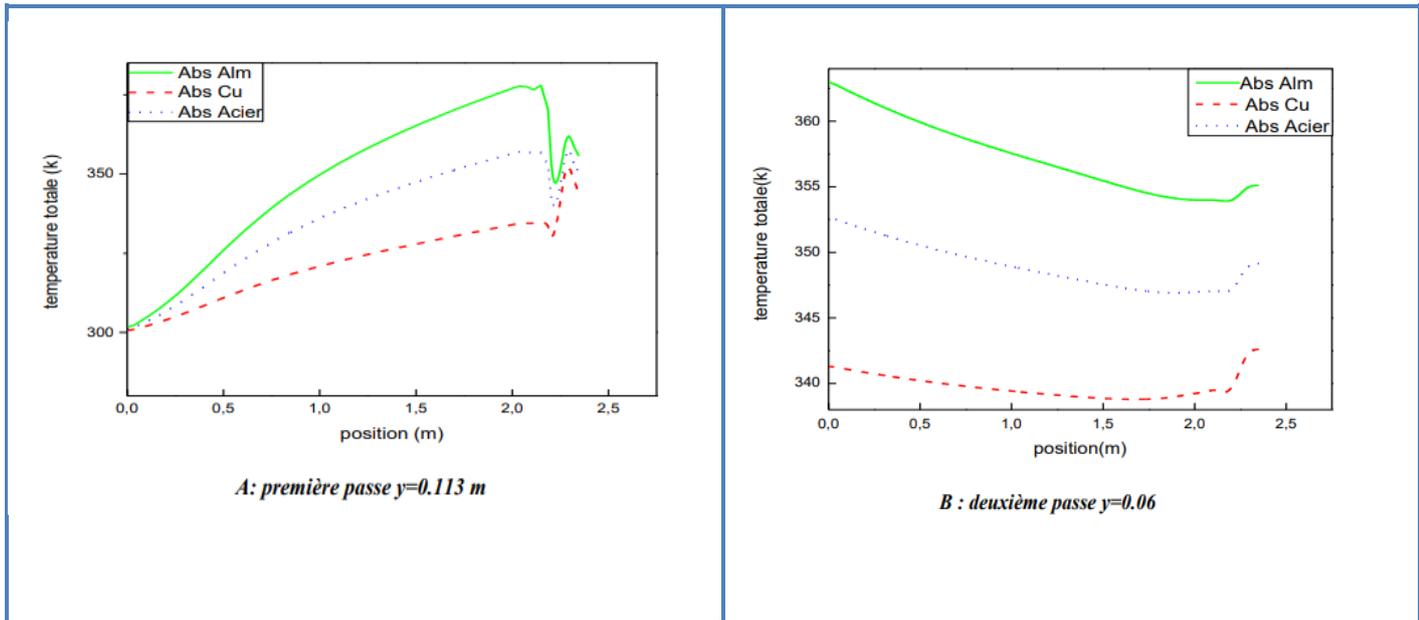


Figure II-42 : Profil de température totale pour différentes matières.

II.3 Conclusion :

A partir de cette étude bibliographique, on remarque que les précédents chercheurs ont fait beaucoup des recherches et des études concernant les capteurs solaires, et ils ont trouvés beaucoup des résultats qui permettent d'améliorer l'efficacité thermique et d'exploiter le maximum possible de la production énergétique en basant sur l'influence des différents paramètres influents sur leur efficacité thermique.

Chapitre III : Modélisation mathématique du problème et Résolution numérique

C.U.K.M. FLUENT

Maillage d'une face et d'un volume

The image shows two side-by-side panels from the ANSYS FLUENT software interface, illustrating the meshing process for a face and a volume. The left panel is titled 'Mosh Faces' and the right panel is titled 'Mosh Volumee'. Both panels have an 'Operation' toolbar at the top with icons for meshing, smoothing, and other operations. Below the toolbar are sections for 'Mosh' and 'Face' (left) or 'Volume' (right). The 'Mosh Faces' panel includes a 'Faces' list, a 'Scheme' dropdown (set to 'Apply Default'), an 'Elements' dropdown (set to 'Quad'), a 'Type' dropdown (set to 'Map'), a 'Spacing' section with 'Interval size' and 'Interval size' dropdowns, and an 'Options' section with checkboxes for 'Hexh', 'Remove old mesh', and 'Remove loose mesh'. The 'Mosh Volumee' panel includes a 'Volumes' list, a 'Scheme' dropdown (set to 'Apply Default'), an 'Elements' dropdown (set to 'Hex'), a 'Type' dropdown (set to 'Map'), a 'Spacing' section with 'Interval size' and 'Interval size' dropdowns, and an 'Options' section with checkboxes for 'Mosh', 'Remove old mesh', and 'Remove loose mesh'. French annotations with arrows point to specific features: 'Maillage de la zone souhaitée (face ou volume)' points to the meshing icons; 'Lissage des maillages déformés' points to the smoothing icons; 'Choix du type de maillage : quad et hex sont structurés (rectangles), tetra correspond au non structuré (triangles)' points to the 'Elements' dropdowns; and 'Si option cochée, création d'un maillage régulier selon les paramètres dessous : Sinon création d'un maillage à partir des nœuds définis sur les arêtes' points to the 'Spacing' section.

Maillage de la zone souhaitée (face ou volume)

Lissage des maillages déformés

Choix du type de maillage : quad et hex sont structurés (rectangles), tetra correspond au non structuré (triangles)

Si option cochée, création d'un maillage régulier selon les paramètres dessous : Sinon création d'un maillage à partir des nœuds définis sur les arêtes

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique adopté pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur de l'air par convection en régime turbulent et stationnaire dans le conduit d'un capteur solaire à air double passes, aussi, nous avons spécifié les conditions aux limites de ce problème. Afin Nous avons vu étapes utilisant pour résolue numériquement un problème d'écoulement d'un fluide dans un capteur solaire.

III.2 Méthodes principales de discrétisation :

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numérique. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis. La méthode utilisée par le code "FLUENT" est celle des volumes finis.

III.2.1 Différences finis :

Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie. (R.Zakia et al, 2016).

III.2.2 Éléments finis :

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est généralement appelée découpage ou discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul. (R.Zakia et al, 2016).

III.2.3 Méthode des volumes finis (MVF) :

La méthode a été découverte pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow). 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 à intégrer les 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). (M.SAFA et al ,2016).

III.2.3.1 Méthode des Volumes Finis dans le cas bidimensionnel :

❖ Formulation Bidimensionnelle de l'Equation de Poisson par la MVF :

La formulation monodimensionnelle ci-dessus de la méthode des volumes finis peut être étendue au cas bidimensionnel (H. K. Versteeg et al ,1995) . La formulation bidimensionnelle consiste à subdiviser le domaine d'étude (Ω) en un nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds. Un volume fini entoure chaque nœud (Figure III-1).

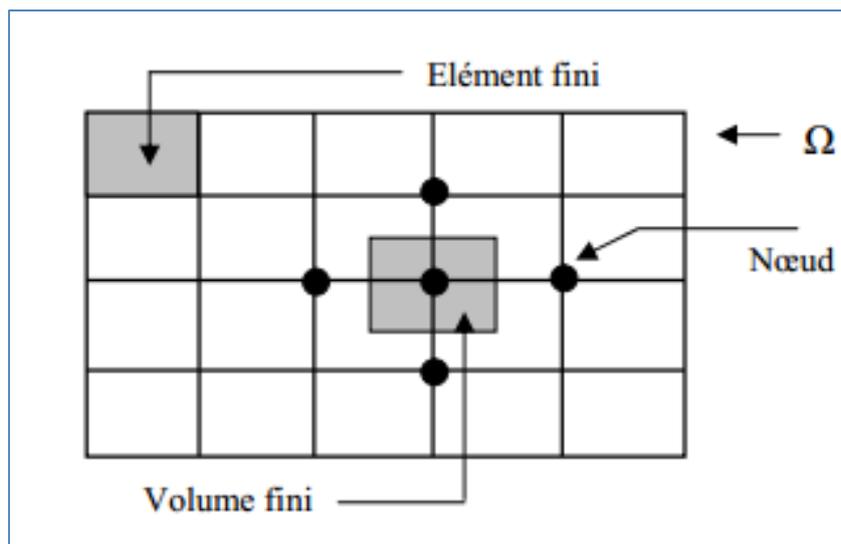


Figure III-1 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel

Le nœud principal "P" est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord "N", celui du Sud "S" (dans la direction y) et celui de l'Ouest "W", celui de l'Est "E" (dans la direction x). Les points (e : est, w : west, n : nord, s : sud). (H. K. Versteeg et al ,1995)

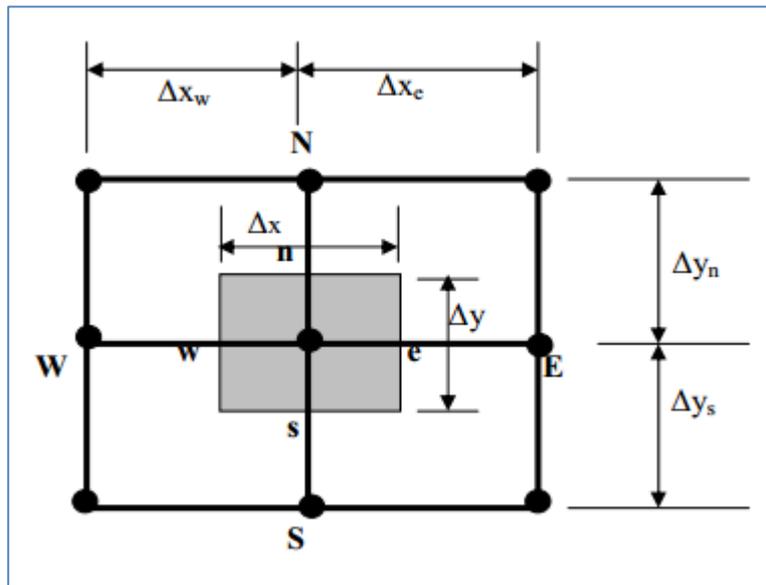


Figure III-2 : Description bidimensionnel d'un volume fini.

L'équation de Poisson dans le cas bidimensionnel est (H. K. Versteeg et al ,1995) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = -\rho \quad (\text{III.1})$$

Avec :

ϕ : La variation de potentiel.

Cette équation est projetée sur une fonction de projection égale à l'unité. Elle est ensuite intégrée sur le volume fini correspondant au nœud P.

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 élevés 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.4 Equations gouvernantes :

La résolution d'un problème de mécanique des fluides ou d'énergétique se fait selon les étapes suivantes : Pour chaque particule, il faut d'abord à partir des équations régissant le mouvement, par la suite, il faudra ajouter les conditions aux limites et les conditions initiales. Puis, il s'agira d'opter pour une méthode de résolution. La dernière étape consiste à déduire les caractéristiques de l'écoulement par l'intermédiaire d'un poste traitement pour avoir les caractéristiques physiques de l'écoulement (transfert de chaleur, débit, forces, séparation et rattachement). Pour une variable générale (ϕ) , la forme conservatrice pour toutes les équations de transport de l'écoulement peut s'écrire comme suit : (K. Bouaraour et al ,2016).

$$\frac{\partial(\rho\phi V)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi V) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S\phi \quad (\text{III.2})$$

Cette équation est utilisée comme base à toutes les méthodes de CFD en particulier, la méthode des volumes finis, où l'étape clé dans cette méthode consiste à intégrer l'équation (III.2) sur un volume de contrôle. Nous obtenons alors la forme suivante :

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{vc} \text{div}(\rho\phi V) dV = \int_{vc} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{vc} S\phi dV \quad (\text{III.3})$$

En utilisant le théorème de la divergence de Gauss, l'équation (III.2) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho\phi dV + \oint \rho\phi V dA = \int \Gamma \nabla \phi dA + \int S\phi dV \quad (\text{III.4})$$

L'équation ci-dessus est l'équation de transport générale et peut être facilement convertie en équation de flux où d'énergie par la variable générale (ϕ) avec :

$\phi = 1$, ce qui donnera l'équation de la continuité.

$\phi = u$, qui donnera l'équation de la quantité de mouvement suivant l'axe x.

$\phi = v$, qui donnera l'équation de la quantité de mouvement suivant l'axe y.

$\phi = T$, qui va donner l'équation de l'énergie

En effet, en prenant les valeurs de (ϕ) et en choisissant des valeurs adéquates pour le coefficient de diffusion (Γ) et le terme source, nous obtenons la formulation mathématique

régissant le mouvement d'un fluide (Sandali Messaoud ,2014). Le phénomène de la convection forcée repose sur les équations qui lient les différents paramètres, à savoir : la vitesse, la pression et la température. Ces équations sont obtenues à partir de :

❖ **Loi de conservation de masse (équation de continuité) :**

Cette équation est déduite du premier principe de la conservation de masse. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante : (Sandali,2014)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.5})$$

❖ **Loi de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes) :**

Cette équation est déduite de la deuxième loi de la dynamique, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale à la somme des forces extérieures sur cette particule. Elle s'écrit sous la forme : (R. Wassila et al , 2017) :

Suivant (Ox) :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.6})$$

Suivant (Oy) :

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.7})$$

❖ **Loi de conservation d'énergie (équation d'énergie) :**

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un fluide Newtonien incompressible, elle s'écrit comme suit : (K. Bouaraour et al ,2016).

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

III.5 Modèles de fermeture :

Sont des équations qui viennent compléter les équations bilans. Dans notre cas, il s'agit de fermer le modèle global en modélisant le terme de viscosité turbulente et le terme de tensions de Reynolds.

"FLUENT" fournit les choix suivants des modèles de la turbulence :

- ✓ Spalart-Allmaras model.
- ✓ $k - \varepsilon$ models.
- ✓ Standard $k - \varepsilon$ model.
- ✓ Renormalization-groupe (RNG) $k - \varepsilon$ model.
- ✓ Realizable $k - \varepsilon$ model.
- ✓ $k - \omega$ models.
- ✓ Standard $k - \varepsilon$ model.
- ✓ Shear-stress transport (SST) $k - \varepsilon$ model.
- ✓ $v^2 - f$ model.
- ✓ Reynolds stress model (RSM).
- ✓ Detachedddy simulation (DES) model.

Large eddy simulation (*LES*) model (B.Abdelillah et al ,2016).

Parmi ces modèles, pour faire la simulation, nous allons choisir le modèle $k - \varepsilon$ stand.

III.5.1 Modèle ($k - \varepsilon$) :

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence.

En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds).

L'idée du modèle $k - \varepsilon$ c'est qu'on peut le construire à partir de « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante :

$$V_t = C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (\text{III.9})$$

Avec $\mu_t = \nu_t \rho$ viscosité dynamique turbulente. L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

C_μ : Coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement.

k : Energie cinétique de turbulence défini par :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_t'^2} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right) \quad (\text{III.10})$$

ε : Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence donné par :

$$\varepsilon = \nu \left[\frac{\partial u'}{\partial x_j} \right]^2 \quad (\text{III.11})$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulente reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence l'est déduite de : (M.Sandali et al ,2014).

$$\varepsilon = k^{3/2} / l \quad (\text{III.12})$$

III.6 Géométrie du problème :

La géométrie du problème considéré est schématisée par la figure III-1, il s'agit d'un capteur solaire à air double passes. Le premier passage de l'air est formé entre le vitrage et l'absorbeur et le deuxième passage est à la direction inverse est formé entre l'absorbeur et l'isolation inférieure. Les dimensions géométriques du problème étudié sont basées sur les données expérimentales publiées par SOPIAN et AL.

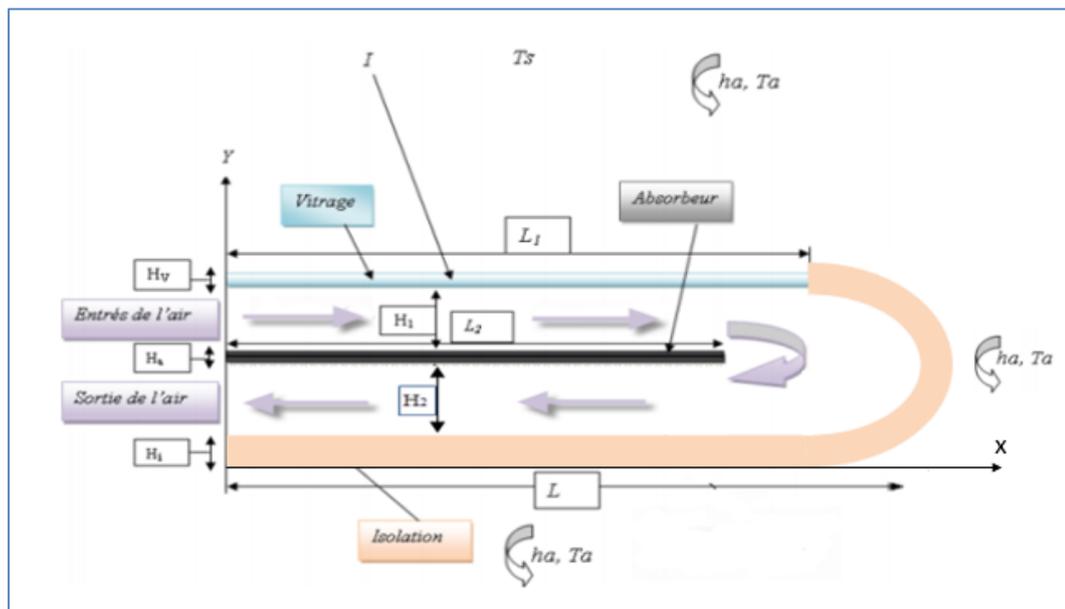


Figure III-3 : Schéma du capteur solaire à double passe.

Les paramètres géométriques des problèmes étudiés sont représentés dans le tableau (II-1).

Tableau III-1 : Dimensions du capteur étudié.

<i>Dimensions</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
<i>Longueur du capteur</i>	<i>L</i>	2.4	[m]
<i>Hauteur de l'entrée et de la sortie de l'air</i>	<i>H₁,H₂</i>	0.06	[m]
<i>Epaisseur de l'absorbeur</i>	<i>H_a</i>	0.001	[m]
<i>Longueur de l'absorbeur</i>	<i>L₂</i>	2.2	[m]
<i>Epaisseur du vitrage</i>	<i>H_v</i>	0.003	[m]
<i>Langueur du vitrage</i>	<i>L₁</i>	2.2	[m]
<i>Epaisseur de l'isolation</i>	<i>H_i</i>	0.05	[m]

III.7 Hypothèses simplificatrices :

La résolution des problèmes posés dans ce travail passe par la construction d'un modèle mathématique. En effet, ce modèle, est basé sur des équations de la mécanique des fluides qui sont d'une complexité telle, qu'il est impossible à résoudre, sauf en faisant intervenir un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, afin de déterminer le comportement du système étudié en termes d'écoulement du fluide caloporteur et de transfert de chaleur dans le système.

- ✓ Le régime d'écoulement est considéré comme stationnaire ;
- ✓ L'écoulement est bidimensionnel (2D);
- ✓ L'air est supposé un fluide incompressible ;
- ✓ Les propriétés des milieux fluide et solide sont invariables :

III.8 Propriétés thermophysiques des Matériaux utilisés et du fluide (M.reggadi,2018) :

Tableau III-2 : Propriétés thermo-physiques des Matériaux utilisés dans le capteur étudié.

<i>Solide</i>	<i>Matériaux</i>	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/(kg.k)]	λ [J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹]
<i>Vitrage</i>	<i>Verre</i>	1375	840	0.0263
<i>Absorbeur</i>	<i>Aluminium</i>	2719	500	237
<i>Isolant</i>	<i>Bois</i>	700	2310	0.116

Tableau III-3 : Propriétés du fluide caloporteur (l'air) à $T_{abm}=27^\circ\text{C}$.

Fluide	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/(kg.k)]	λ [$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$]	μ [(kg/m.s)]
Air	1.22	1012	0.0242	$1.7894.10^5$

III.9 Conditions aux limites :

- ❖ Au niveau du vitrage

$$T_v = 50 \text{ °c} \quad (III.13)$$

- ❖ A l'entrée du capteur

$$u = u_{in} , v_{in} = 0 \quad (III.14)$$

$$u_{in} = \frac{Re \mu}{\rho D_h} \quad (III.15)$$

$$T_{in} = 300K \quad (III.16)$$

- ❖ à la frontière des parois

$$u = v = 0 \quad (III.17)$$

- ❖ Le nombre de Reynolds : (R. Wassila et al , 2017)

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (III.18)$$

- ❖ Le nombre de Nuselt : (R. Sihem Samya et al ,2017)

$$Nu = \frac{h.D_h}{K} \quad (III.19)$$

- ❖ Efficacité thermique du capteur solaire : (R. Wassila et al , 2017)

L'efficacité thermique du capteur solaire peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{q_m.Cp.(Ts - Te)}{I.A} \quad (III.20)$$

III.10 Présentation du logiciel Gambit :

Gambit est un logiciel qui permet de la construction des géométries et leurs maillages en 2D ou 3D. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent

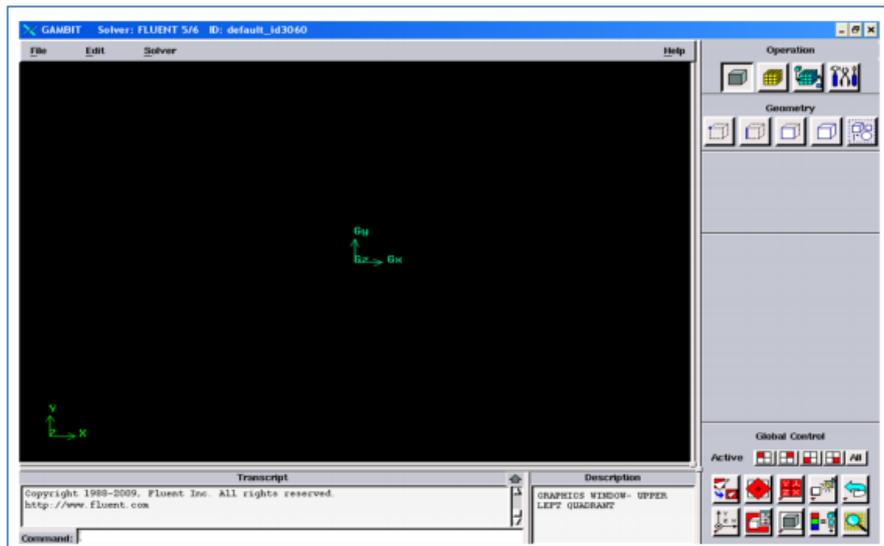
l'utilisation de ses maillages par des logiciels industriels comme par exemple Fluent. Lors de la création d'une session, Gambit va créer quatre fichiers : (H.Sarra et al ,2019)

- ✓ Un fichier d'extension « dbs » qui contient toutes les données de la session ;
- ✓ Un fichier « jou », qui retrace l'historique de la session ;
- ✓ Un fichier « trn », qui reprend toutes les commandes et leurs résultats lors des différentes sessions ;
- ✓ Un fichier « lok ». (H.Sarra et al ,2019).

Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie), le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Type de conditions aux limites) et définition des domaines de calculs. (H.Sarra et al ,2019).

III.11 Lancement du Gambit.

Lors de lancement de Gambit, la fenêtre suivante sera affichée



FigureIII-4 : Lancement du Gambit.

III.12 Création de la géométrie et maillage :

La réalisation d'un maillage se fait en deux étapes : la création de la géométrie (CAO) puis, son maillage surfacique 2D (notre cas) ou volumique 3D. Tout 'abord on doit créer la géométrie, il convient de bien réfléchir au découpage topologique du domaine physique. Le choix du maillage est une étape importante de la simulation numérique. Il est donc important de bien choisir un maillage qui s'adapte au mieux aux problèmes considérés.

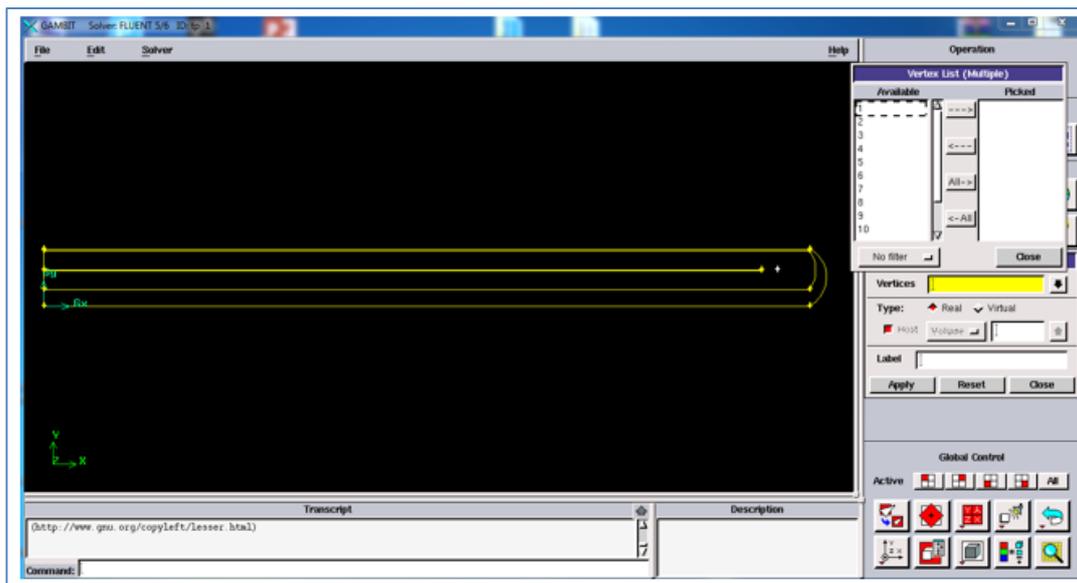


Figure III-5 : Création de la géométrie.

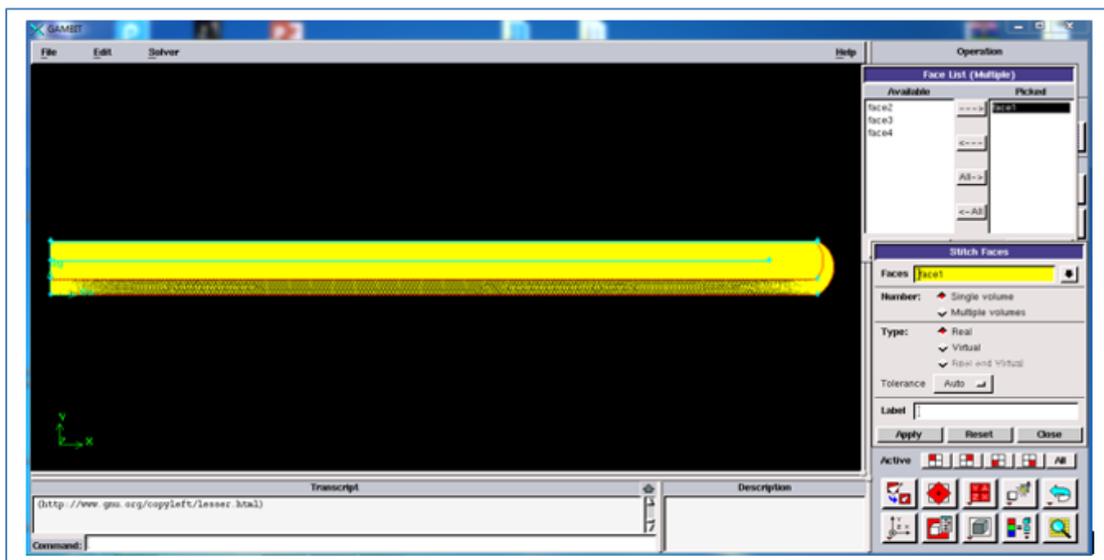


Figure III-6 : Maillage surfacique.

❖ **Choix du type de maillage :**

Il existe plusieurs types de maillages, tels que le maillage structuré, le non-structuré et l'hybride (combinaison géométrique d'éléments de différentes natures). Un maillage structuré est généralement composé de cellules quadrilatérales en 2D (maillage surfacique). Tandis qu'un maillage non-structuré peut être composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D.

a) Maillage structuré (Quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie en outils bloqué, il présente **les avantages suivants** : Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent ; Réduit les risques d'erreur numérique car l'écoulement est aligné avec le maillage. **Ses inconvénients** : Difficiles à les générer dans le cas d'une géométrie complexe ; Difficile d'obtenir une bonne quantité de maillages pour certaines géométries complexes.

b) Maillage non structuré (Tri/Tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte à leur disposition. **Ses avantages** : Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments ; Les algorithmes de génération de ce type de maillage (Tri/Tétra) sont très automatisés. **Ses inconvénients** : Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré ; Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

c) Maillage hybride :

Maillage généré par mélange d'éléments de différents types triangulaire ou quadrilatéraux en deux dimensions, tétraédriques, prismatiques ou pyramidaux en trois dimensions. **Ses avantages** : Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du non structuré.

❖ Qualité du maillage :

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif. Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- ✓ Maintenir une bonne qualité des éléments.
- ✓ Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- ✓ Assurer un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- ✓ Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable). Enfin, la qualité de maillage à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout le temps de calcul.

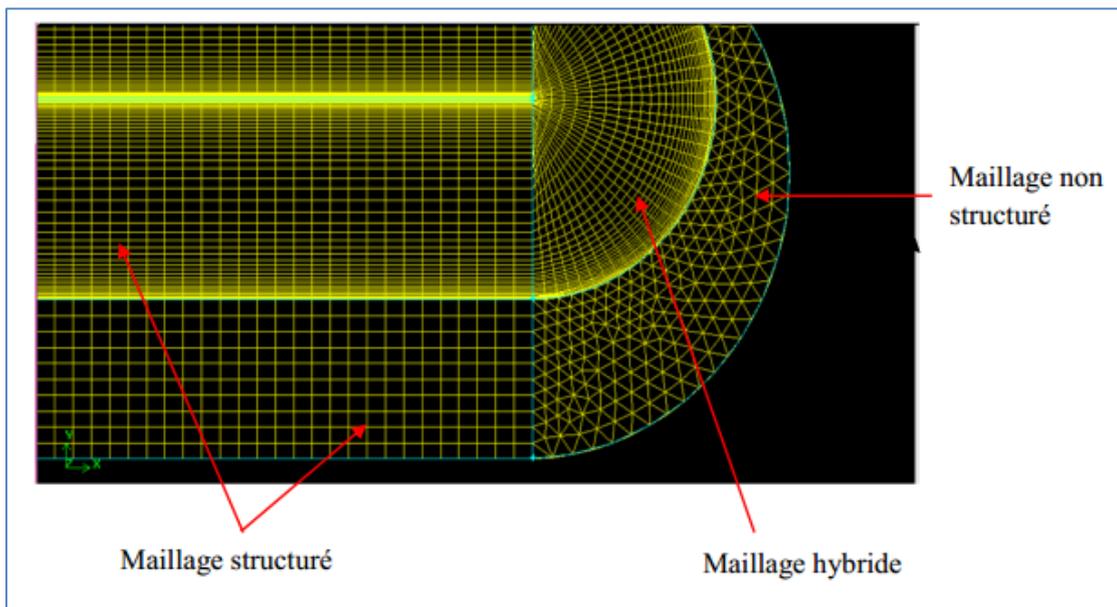


Figure III-7 : Schéma montrant les trois types de maillage

III.13 Conditions aux limites :

Lorsqu'on termine le maillage du domaine on doit ajouter les conditions aux limites :

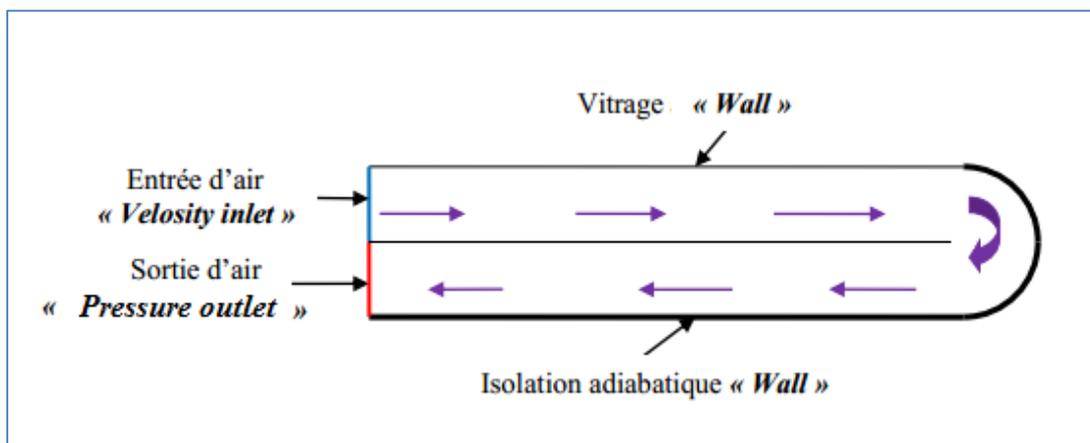


Figure III-8 : Schéma des conditions aux limites.

L'utilisateur doit adapter la géométrie aux conditions limites, un segment en 2D ne peut être lié à plus d'un type de limite. Toutes les limites du même type (exemple toutes les parois) peuvent être définies sous une limite unique. Attention, chaque limite doit être nommée (éviter le nom par défaut) dans Gambit, même les limites usuelles. Seules les interfaces entre les sous blocs ne doivent pas apparaître dans les limites. On prend par exemple les conditions aux limites de notre problème, nous avons imposé un débit massique à l'entrée du capteur solaire, nous avons utilisé la condition (*Velocity intel*), et une pression à la sortie (*Pressure*

outlet). L'intérieur du domaine est considéré comme « *Fluide* » incompressible et visqueux « *air* ».

III.14 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 parallèles, 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 tels que : (H.saraa ,2019).

- ✓ Ecoulements 2D ou 3D ;
- ✓ Ecoulement stationnaire ou instationnaire ;
- ✓ Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- ✓ Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- ✓ Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- ✓ Ecoulement avec changements de phases ;
- ✓ Ecoulements en milieu poreux. (H.saraa ,2019).

Résolution du problème avec le code FLUENT:

➤ 1^{ère} étape :

On lance le solveur FLUENT, on sélectionne (2ddp),

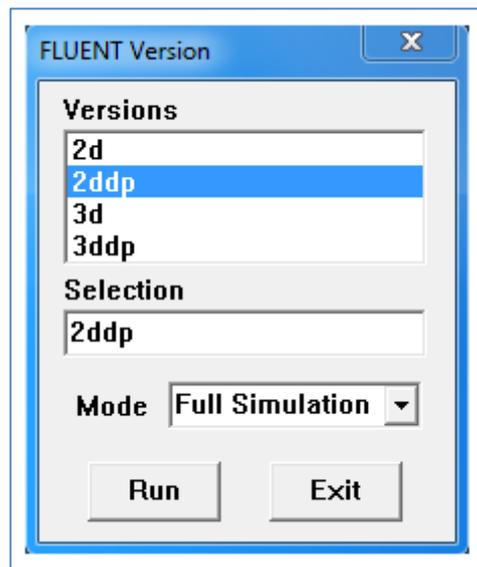


Figure III- 9 : Type de résolution

➤ 2^{ème} étape (Lecture du maillage) :

On doit sélectionner le menu File → Read → Case...

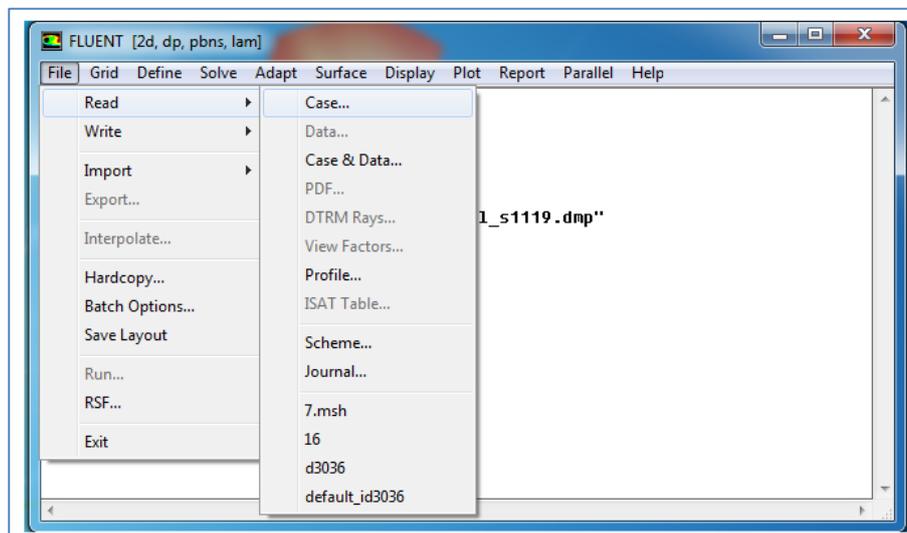


Figure III-10 : Lecture de la grille.

➤ 3^{ème} étape

Pour afficher le maillage, on sélectionne sur : Display → Grid.

➤ 4^{ème} étape

Pour choisir une des modèles de solution, nous employons le panneau de solveur :

Define → Models → Solver.

Dans notre problème l'écoulement est stationnaire et pour cela on choisit le cas (steady) ensuite on sélectionne le bouton OK.

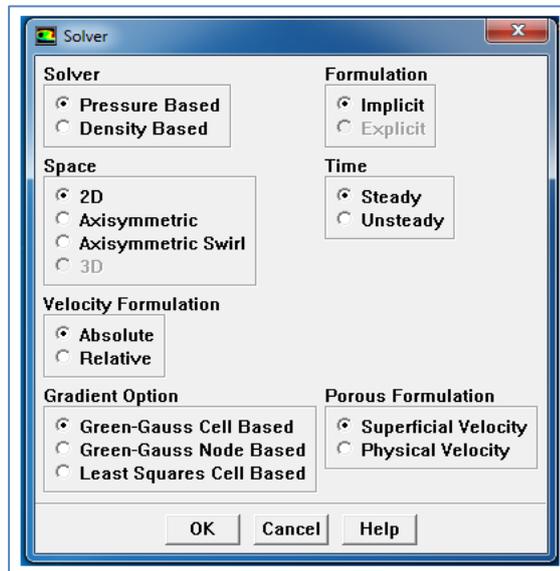


Figure III-11 : Fenêtre solveur.

➤ 5^{ème} étape

Si l'écoulement est turbulent. On sélectionne sur :

Define → Models → k-epsilon. (Figure III-11), puis on clique sur ok.

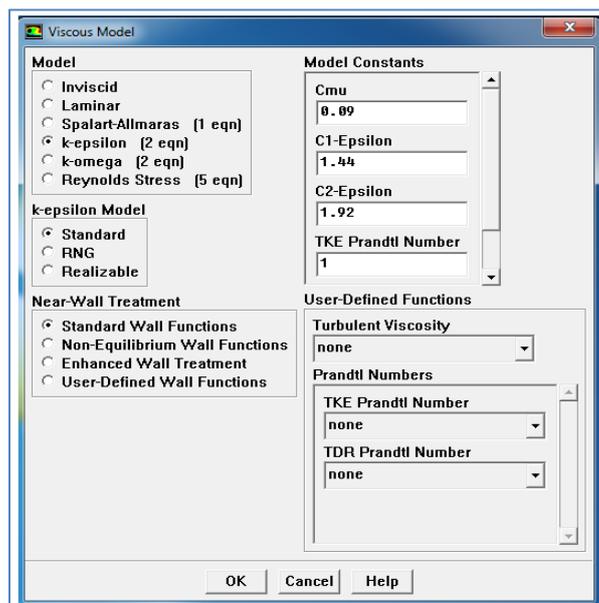


Figure III-12 : Fenêtre de modèle visqueux.

➤ 6^{ème} étape

Pour mettre les propriétés de fluide pour notre problème, (figure III-13) on sélectionne :

Define → Materials

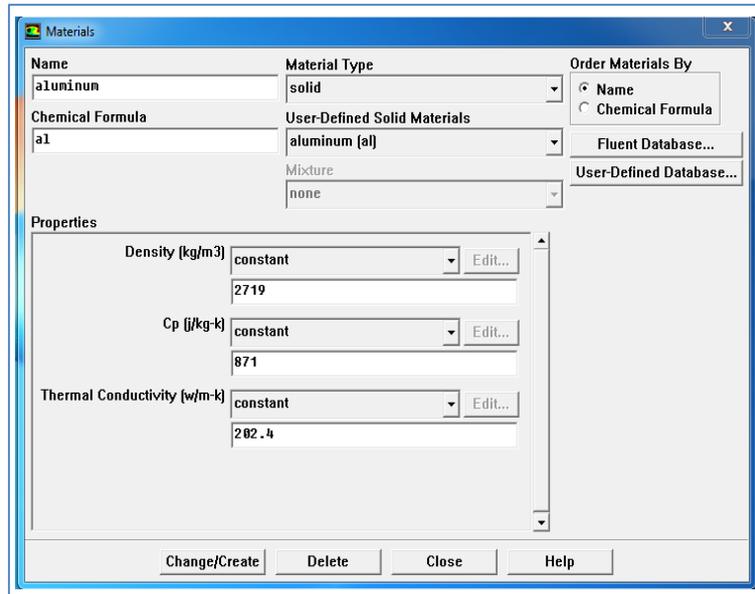


Figure III-13 : Fenêtre de Matériaux

Conditions aux limites.

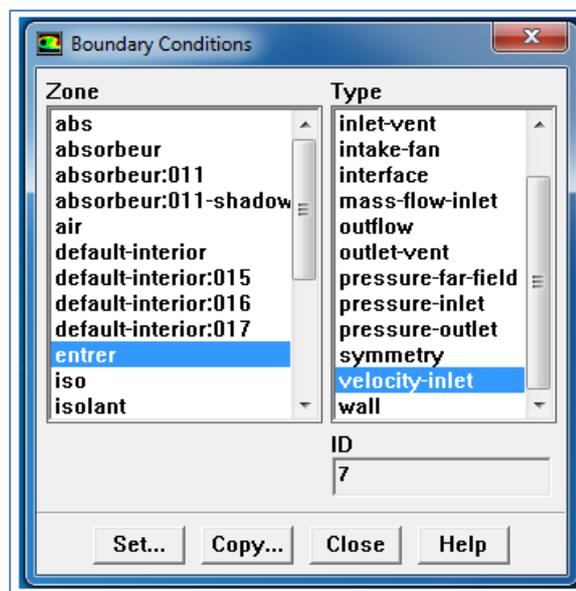


Figure III-14 : Valeurs des conditions aux limites.

➤ 7^{ème} étape :

L'installation du problème est presque complète. Maintenant on tourne vers la surveillance résiduelle graphique de sorte qu'on puisse facilement observer le progrès de la solution. Pour faire ceci, on choisit : Solve → Monitors → Residual, (figure III-15). Sous les options allumez l'option **plot** pour activer l'affichage graphique des résiduels pendant le calcul, et on sélectionne alors sur OK.

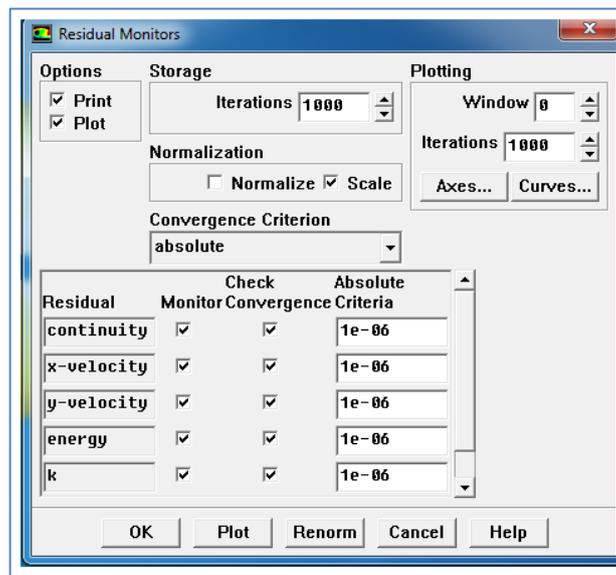


Figure III-15 : Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence.

➤ 8^{ème} étape :

Avant de réitérer, il faut initialiser le champ d'écoulement pour fournir un point de départ de la solution. On peut donc choisir le calcul de la solution initiale des arrangements d'une condition aux limites où le champ entrant l'écoulement évalue individuellement. On clique : Solve → Initialize , (figure III-16).

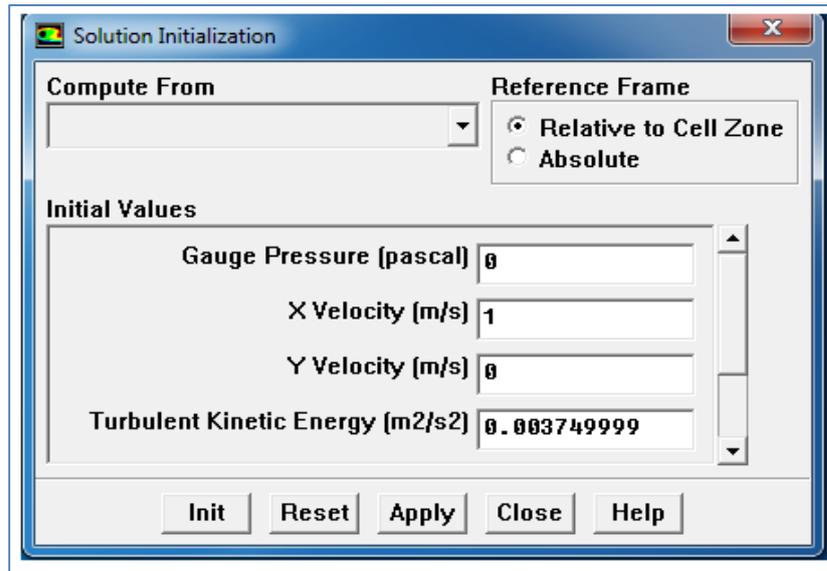


Figure III-16 : Fenêtre de solution initialisation.

➤ 9^{ème} étape :

Maintenant on peut commencer les itérations. On clique sur : Solve → Itérate, ceci va ouvrir le panneau de l'itération (figure III-16).

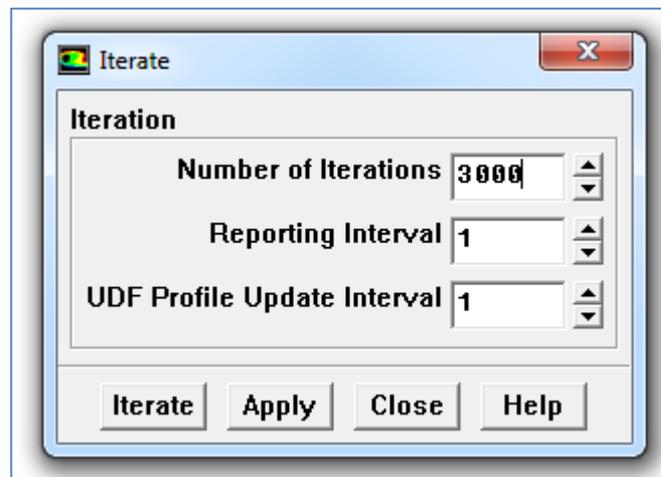


Figure III-17 : Choix du nombre des itérations.

❖ Courbe résiduel :

Le code FLUENT, annonce un résiduel pour chaque équation régissant étant résolue. Le résiduel est une mesure comment bien la solution actuelle satisfait la forme discrète de chaque équation régissant. Nous réitérerons jusqu'au résiduel pour chaque chutes (automnes) d'équation au-dessous de $.10^{-6}$.

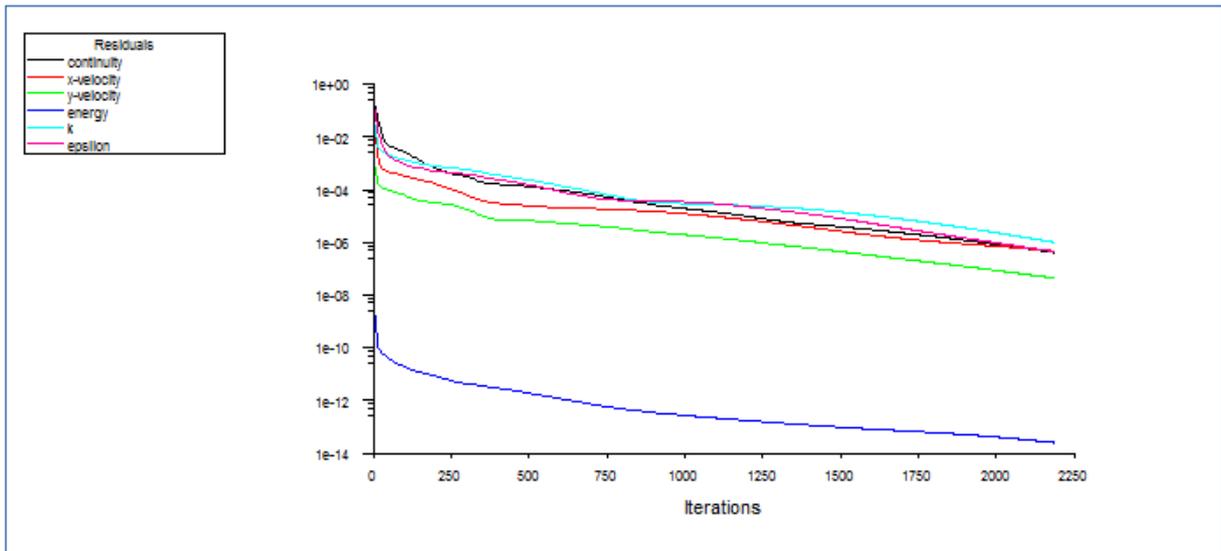
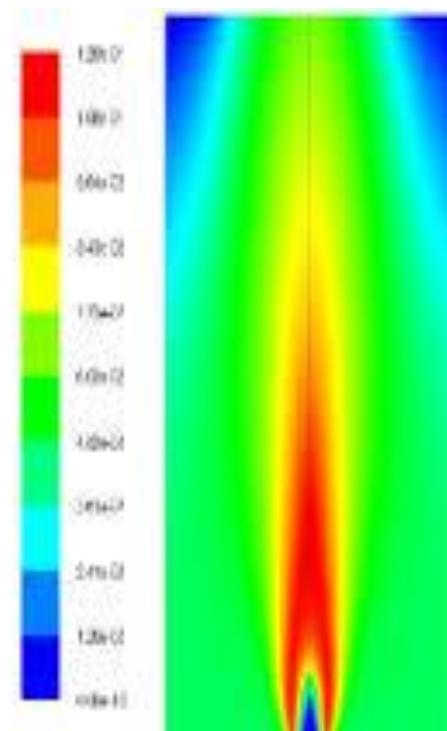
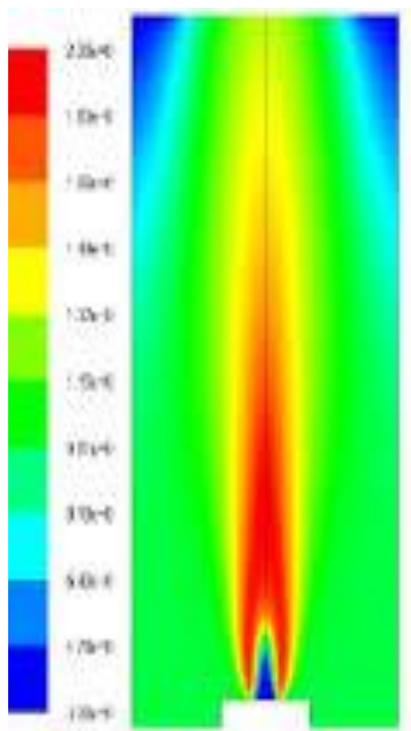


Figure III.18 : Allures de l'évolution des résidus de Capteur.

III.15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à décrire le problème physique à traiter et le système d'équations découlant de sa modélisation mathématique. Ce dernier est constitué d'un système d'équations, complétées par des conditions aux limites. Il s'agit d'un système complexe formé par des équations qui sont issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Les équations de bilan sont donc bien connues mais leurs résolutions analytique n'est pratiquement jamais possible. L'origine de cette difficulté réside dans les non-linéarités visibles dans les différents termes de ces équations. L'utilisation des méthodes numériques s'avère être le meilleur moyen pour la résolution de ces équations. Dans notre étude, on utilisera le logiciel FLUENT (version 6.3.26) qui est basé sur la méthode des volumes finis.

Chapitre IV : Résultats et Discussions



IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus par simulation numérique en 2D pour un capteur plan à air à double passes. La simulation numérique a été faite à l'aide d'un code de calcul industriel, CFD (Computation Fluid Dynamic) « FLUENT 6.3.26 » qui est basé sur la méthode des volumes finis. Le maillage est réalisé au moyen de logiciel « GAMBIT 2.4 » qui est un mailleur associé à Fluent.

Pour présenter ces résultats, de simulation, nous avons utilisé des logiciels de graphisme paint et Origin version 2018 qui permettent de tracer les profils de différentes courbes telles que la vitesse, température et la pression dynamique.

IV.2 Choix du maillage :

La précision des résultats numériques obtenus dépend des valeurs des paramètres de contrôle pour le choix du maillage optimal. Le Tableau IV-1 résume l'influence du nombre de nœuds sur la température et les vitesses maximales.

Tableau IV-1 : Influence de la taille du maillage sur la température et les vitesses maximales.

Nombre de nœuds	10000	50000	71097	85000	95000
U_{max}	0.99999993	0.99999993	0.99999994	0.99999994	0.99999994
T_{max}	366.00107	366.40063	366.72638	366.72659	366.72678

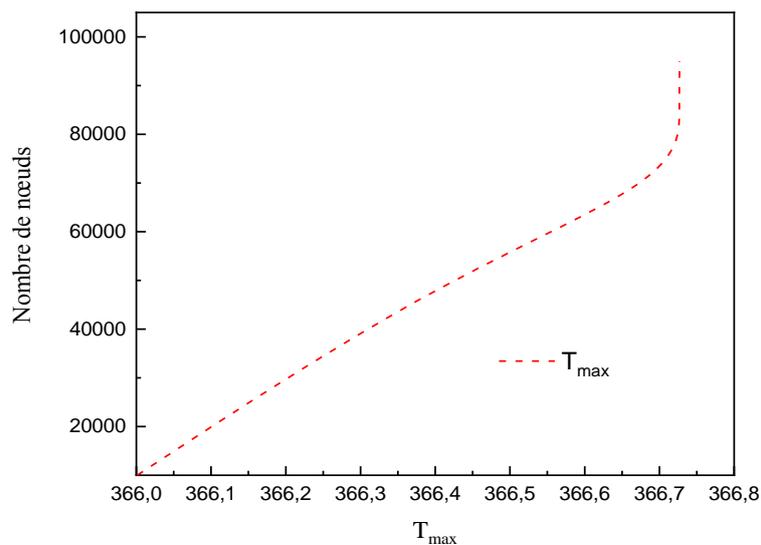


Figure IV-1 : Influence de la taille du maillage sur la température maximale.

Les résultats du tableau sont présentés sous forme d'une courbe qui est montrée sur la Figure IV-1, Ces résultats montrent que l'augmentation du nombre de nœuds conduit à une meilleure précision jusque ce 'on obtient un nombre de nœud bien précis pour lequel les grandeurs physiques restèrent constantes. C'est-à-dire que la température reste pratiquement inchangée pour un nombre de nœuds **71097** avec une erreur relative très faible. Ainsi pour des raisons de compromis précision/temps de calcul on adoptera le maillage comportant **71097** nœuds.

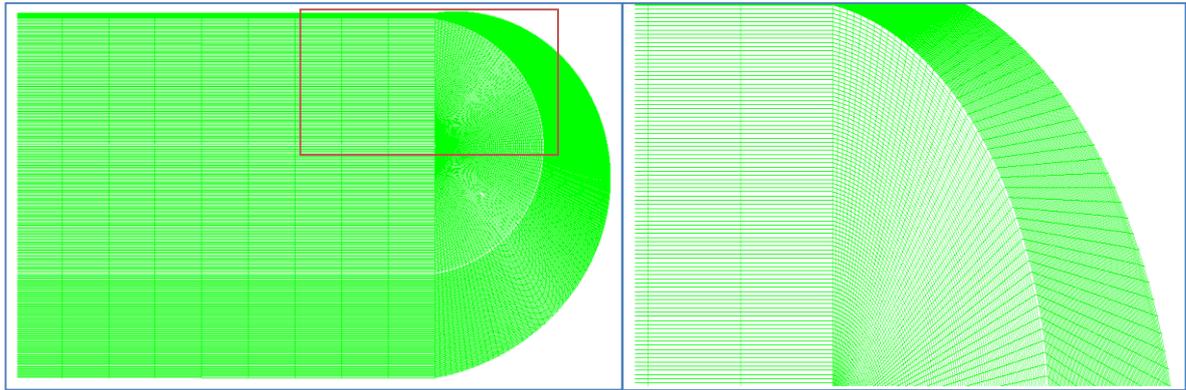


Figure IV-2 : Détails du maillage utilisé.

IV.3 Validation du modèle numérique :

Pour vérifier l'exactitude de l'étude actuelle, notre calcul numérique a été validé avec le travail de (SANDALI, 2014) qui nous donne les profils de température de l'air pour les deux passes au niveau du capteur étudié avec $I_t = 1000 \text{ W/m}^2$ et $Re = 5.97.10^4$ (Fig.3).

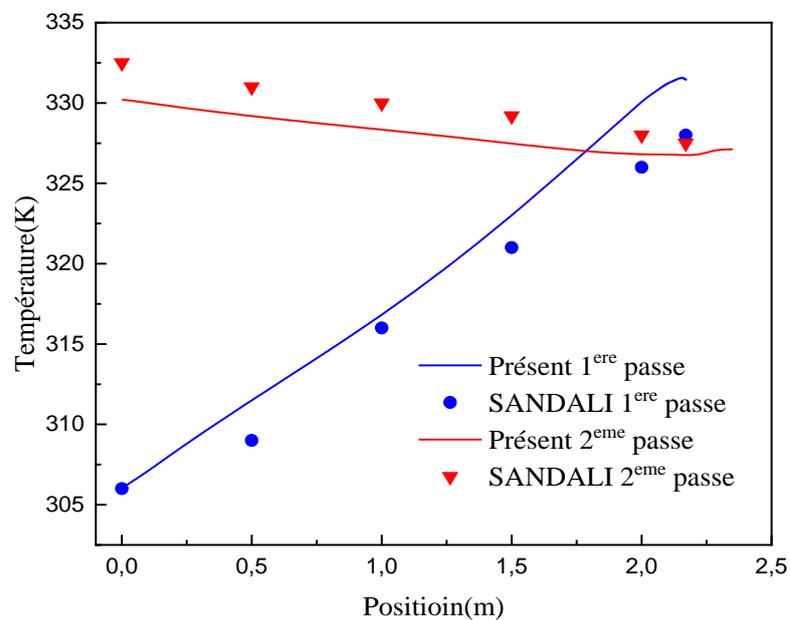


Figure IV- 3 : Validation de l'étude actuelle avec les résultats des (SANDALI ,2014) pour $I_t = 1000 \text{ W/m}^2$

D'après cette courbe, on voit que la température dans la première passe va augmenter suivant la position longitudinale tandis que dans la deuxième passe, cette température va diminuer suivant l'axe (xx'), ainsi qu'on peut voir que nos résultats sont assez proches avec ceux obtenus par (Sandali, 2014).

IV.4 Etude dynamique :

I.4.1 Présentation des contours :

La figure IV-4 représente le contour de la vitesse axiale dans le capteur solaire plan à air à double passage. D'après cette figure, on voit que la vitesse axiale évolue dans le premier passage d'une manière nettement élevée par rapport aux vitesses dans le deuxième passage d'une part.

D'autre part, des zones de recirculation sont observées surtout dans la section de parcours de fluide caloporteur (coude), Cette recirculation est caractérisée par des valeurs négatives.

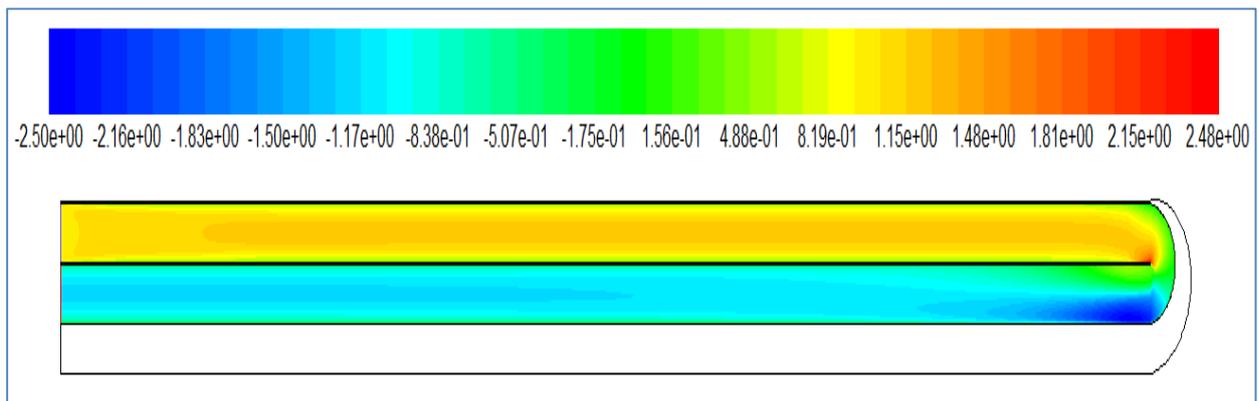


Figure IV-4 : Contour de la vitesse axiale.

La figure IV-5 illustre le contour de la vitesse résultante. A travers cette figure, on peut remarquer que la vitesse est nulle près de l'absorbeur, de la vitre et près de l'isolant, et ceci revient à la condition d'adhérence, ainsi qu'on peut noter qu'il y a une vitesse maximale à l'entrée de la deuxième passe environ 2.50 m/s, cette dernière va entraîner à une grande perte de charge, c'est tout à fait normale puis nous avons une singularité (coude) qui est responsable de la perte de charge singulière.

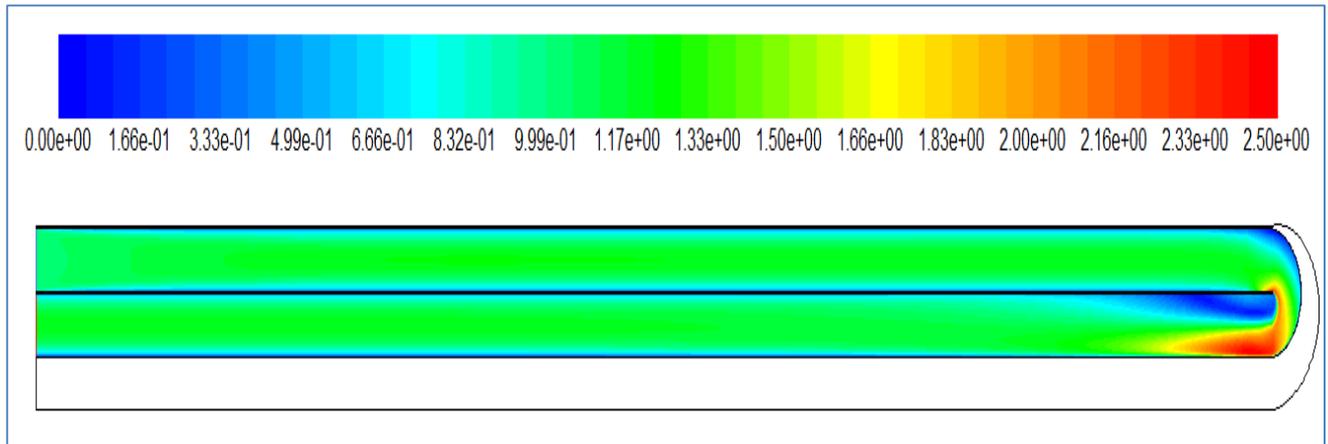


Figure IV-5 : *Contour de la vitesse résultante.*

La figure VI-6 montre les lignes de courant pour une vitesse d'entrée égale à 1m/s. On remarque la présence d'une zone de recirculation à l'extrémité droite de l'isolant, cette zone est caractérisée par les valeurs négatives de la vitesse. Ces zones sont générées par la présence d'une singularité dans l'écoulement du fluide.

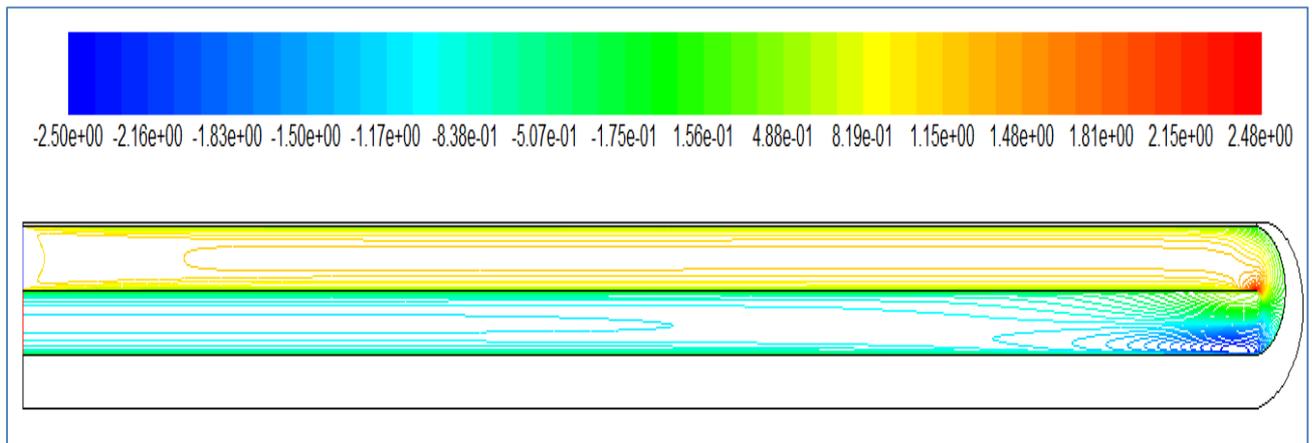


Figure IV-6 : *Contour des lignes de courant.*

La figure IV-7 illustre le contour de la pression dynamique. D'après cette figure on aperçoit que la pression dynamique augmente lorsqu'on s'approche à la fin de la première passe pour atteindre les valeurs de (2.10 Pa) ; au voisinage de l'extrémité de l'absorbeur et on peut trouver des valeurs maximales de (3.90 Pa) au débit de la deuxième passe qu'il sera diminuée lorsque on s'approche à la sortie du capteur.

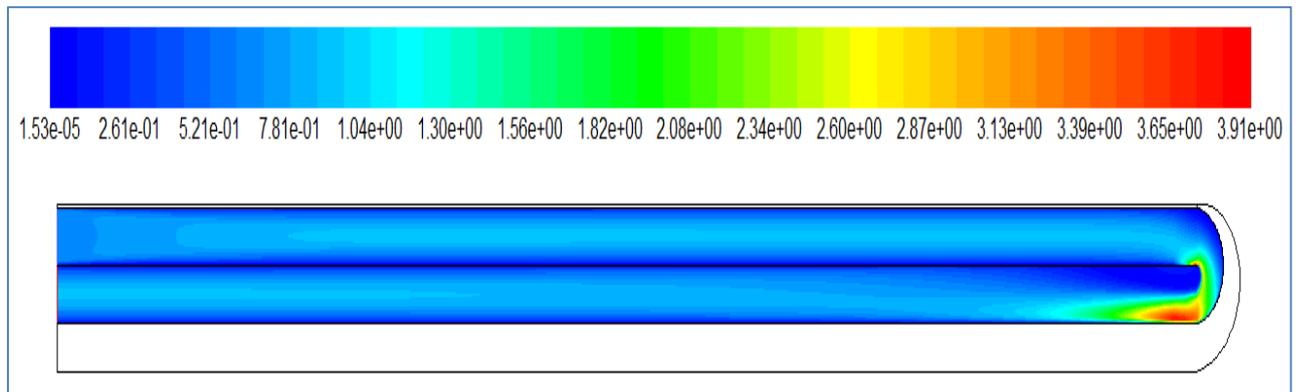


Figure IV-7 : *Contour de la pression dynamique.*

La figure IV-8 représente le contour d'énergie cinétique turbulente dans le capteur solaire à double passe. On observe que l'énergie cinétique ayant une structure uniforme dans la première et la deuxième passe à l'exception au près de l'entrée de la deuxième passe ou on voit une bande varie de $.0174$ à 0.429 [m^2/s^2] et ceci revient à l'équilibre entre le flux convectif et le taux de dissipation visqueuse dans l'équation de transport, puisqu'il n'y a ni mécanisme de production (pas de gradient de vitesse sauf à l'entrée de la 2^{ème} passe ni mécanisme de diffusion.

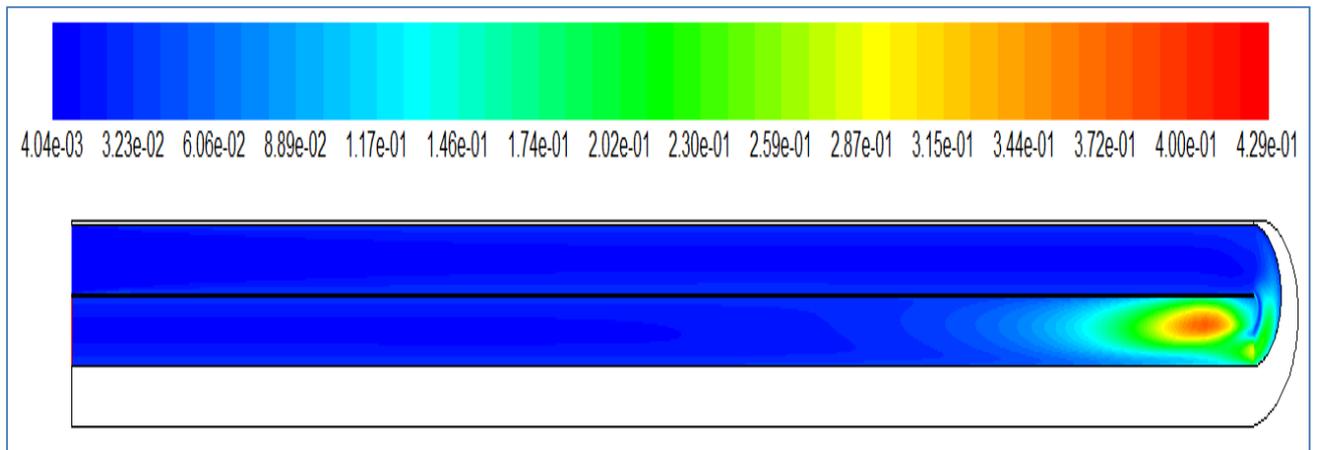


Figure IV-8 : Contour d'énergie cinétique turbulente [m^2/s^2].

I.4.2 Présentation des profils :

Pour faire l'étude paramétrique de nos résultats, nous allons créer des lignes verticales (suivant X) et horizontales (suivant Y) comme la montre la figure suivante :

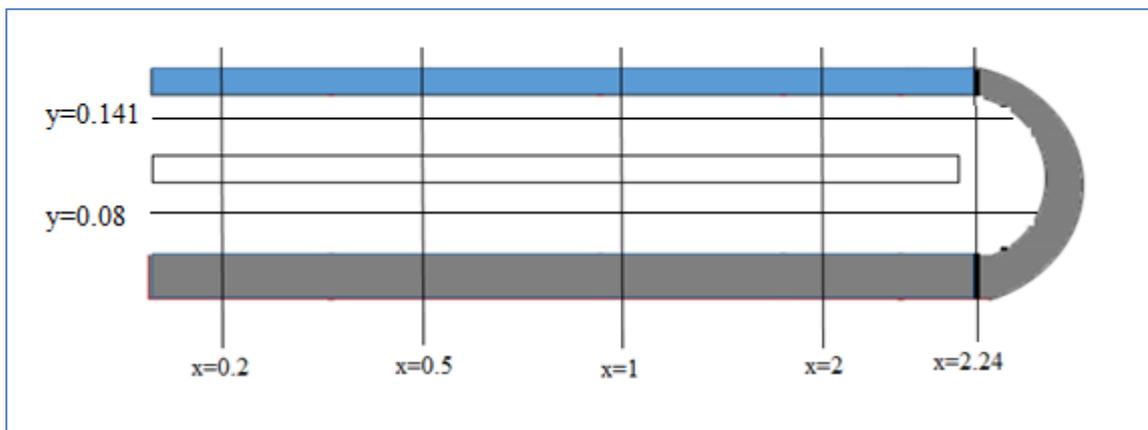


Figure IV-9 : Différentes sections choisies.

La figure (IV-10) nous avons tracé l'évolution de la vitesse axiale dans les sections choisies du capteur solaire étudié. On remarque que le profil de la vitesse axiale est parabolique que ainsi que ; on peut voir que pour chaque section les vitesses sauront augmenté lorsqu'on s'approche de la fin de chaque passe, en effet pour la première passe les vitesses sont augmenter pour atteindre les valeurs maximales de 1.1 ; 1.23 et 1.25 m/s ceci pour les sections ($x=0.2$; $x=0.5$; $x=1m$) ; tandis que ces valeurs seront (-1.1 ; -1.23 et -1.25 m/s) pour la deuxième passe et pour les même section.

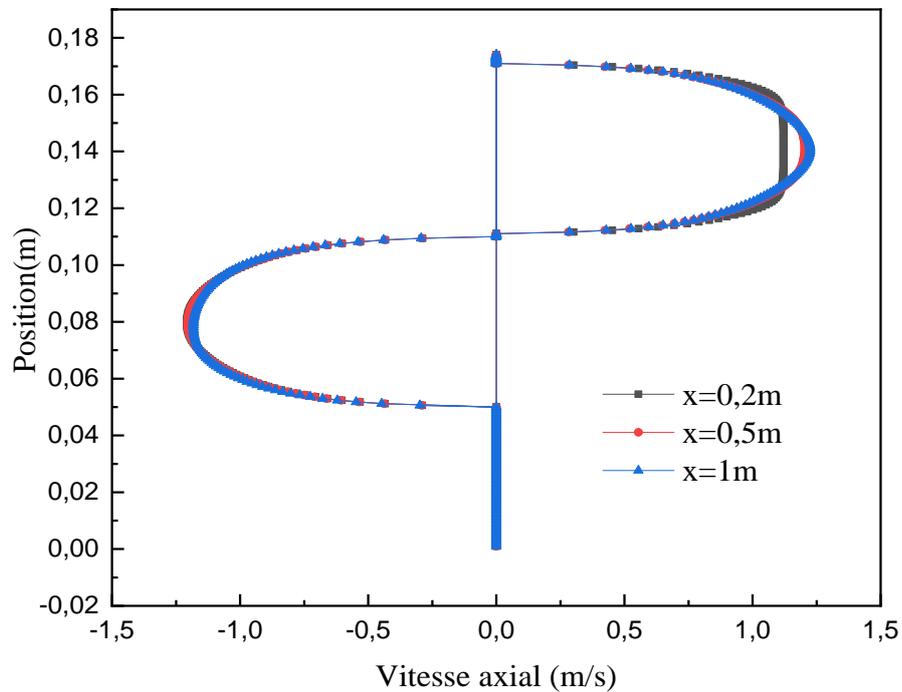


Figure IV-10 : Profil de la vitesse axiale pour les 3 différentes sections.

Sur la figure IV-11 nous avons présenté les profils des vitesses pour les sections $x=2$ m et $x=2.24$ m.

D'après cette figure, on remarque que la courbe de la vitesse va garder sa symétrie par rapport à l'axe centrale de la 1^{er} passe ; Alors que dans la deuxième passe elle va perdre sa symétrie par rapport à l'axe centrale de la 2^{eme} passe. Ainsi que nous pouvons noter qu'il y a des zones ayant des températures négatives qui représentent la zone de recirculation.

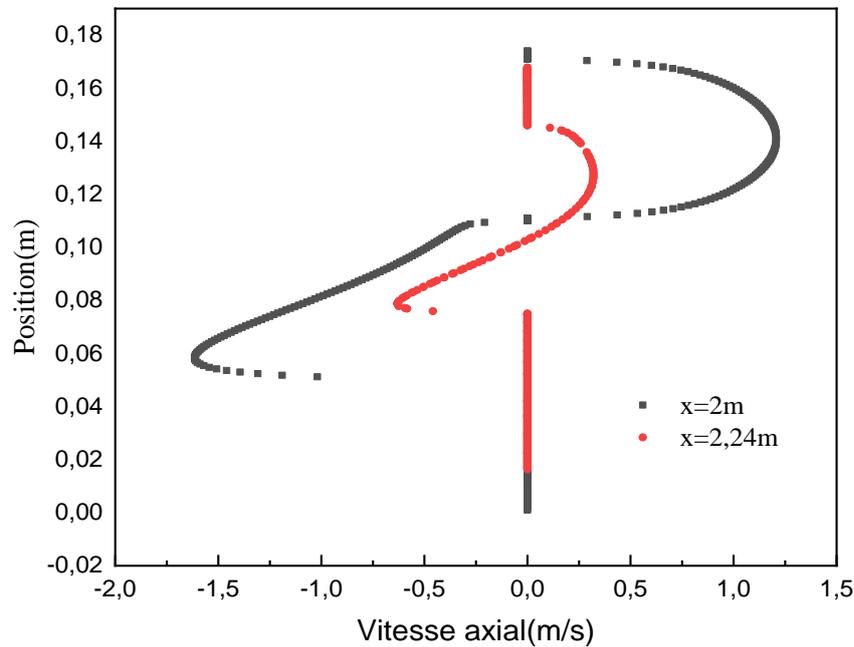


Figure IV-11 : Profil de la vitesse axiale pour les 2 différentes sections du coude.

D'après la figure IV-12 donnant la variation du profil de la pression dynamique en fonction de la position longitudinale pour les deux sections ($y=0,08\text{m}$ et $y=0,141\text{m}$) ; on aperçoit que la pression dynamique est variée d'une façon très lente de débit jusqu'à $x=2,1\text{m}$, où la pression dynamique va soumettre à une augmentation brusque pour la section de $0,141\text{m}$ pour atteindre la valeur maximale de 2 Pa ; Alors que pour la section $y=0,08\text{m}$, la courbe de la pression dynamique va soumettre à une diminution brusque pour atteindre une valeur nulle.

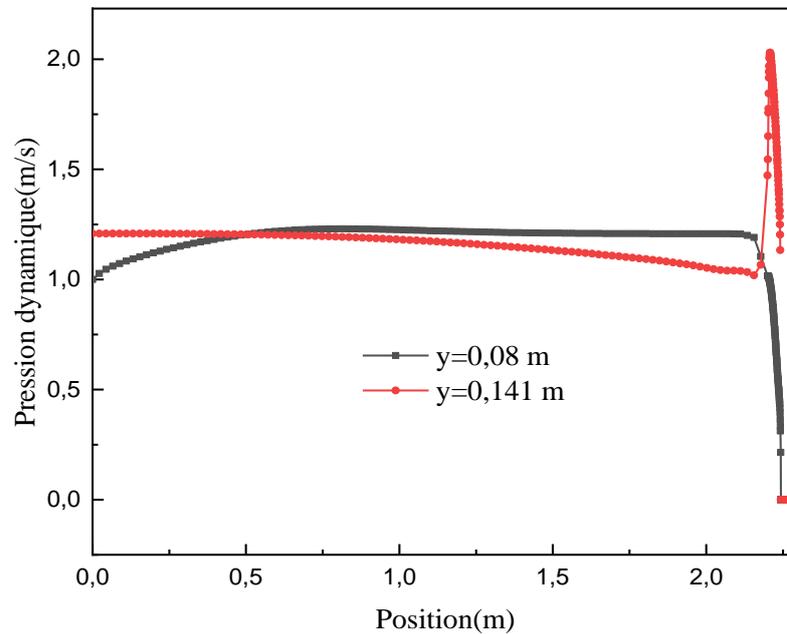


Figure IV-12 : Profil de la pression dynamique pour les sections verticales.

La variation du coefficient de pression en fonction de la position longitudinale de la capture a été illustrée sur la figure IV-13. selon cette figure nous remarquons le coefficient de pression diminue lorsque on s'éloigne de l'entrée de la première passe et de la deuxième passe et ceci revient à la relation qui existe entre le coefficient de pression et la vitesse totale ; en d'autre terme ;on peut expliquer ca par le gradient de vitesse qui est important dans la première passe et moins important dans la deuxième passe.

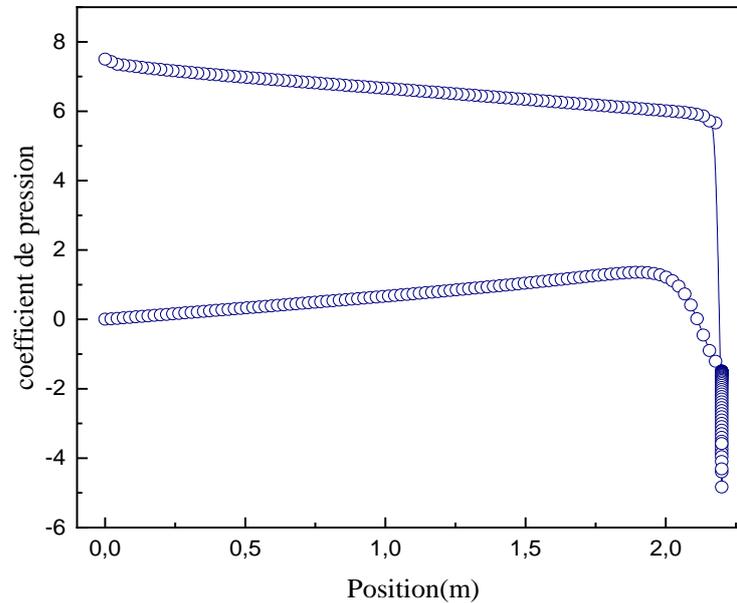


Figure IV-13 : Variation du coefficient de pression le long des parois de l'absorbeur.

IV.5 Etude thermique :

I.5.1 Présentation des contours :

La figure VI-14 présente le champ de température dans le capteur solaire à double passe pour une vitesse d'entrée de 1m/s et une température fixe sur le vitrage et l'absorbeur .On observe que la température de l'air augmente dans la conduite supérieure dans le même sens des x sous l'effet de la température du vitrage et de l'absorbeur et augmente dans le sens inverse des x dans la conduite inférieure sous l'effet de l'absorbeur uniquement. Les zones les plus chaudes sont localisées au côté de l'absorbeur.

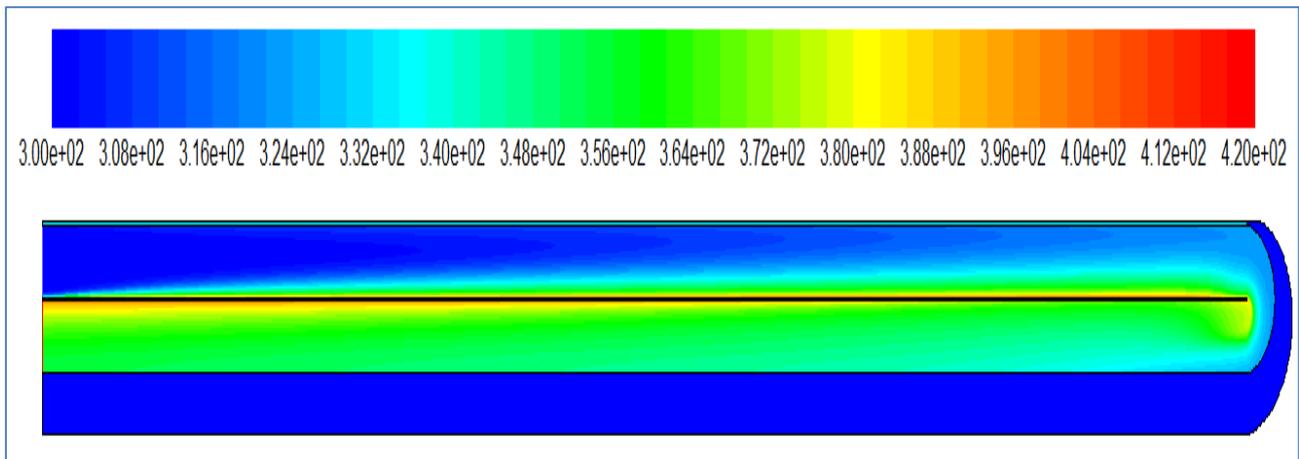


Figure VI-14 : Distribution de champ de température dans le capteur solaire à double passes.

I.5.2 Présentation des profils :

D'après l'analyse des résultats des profils de la température totale présenté dans la figure IV-15, nous observons qu'il y a une diminution, de l'entrée jusqu'à la sortie, de la température pour la passe supérieure ($y=0,141\text{m}$) et pour la passe inférieure ($y=0,08\text{m}$), à l'exception dans la zone ($x>2,1\text{m}$) où il y a une élévation brusque de la température et ceci revient à la présence de la singularité (zones de recirculation).

Alors, on aperçoit que les sections les plus proches de la partie arrondie du capteur sont mieux chauffées que les sections éloignées.

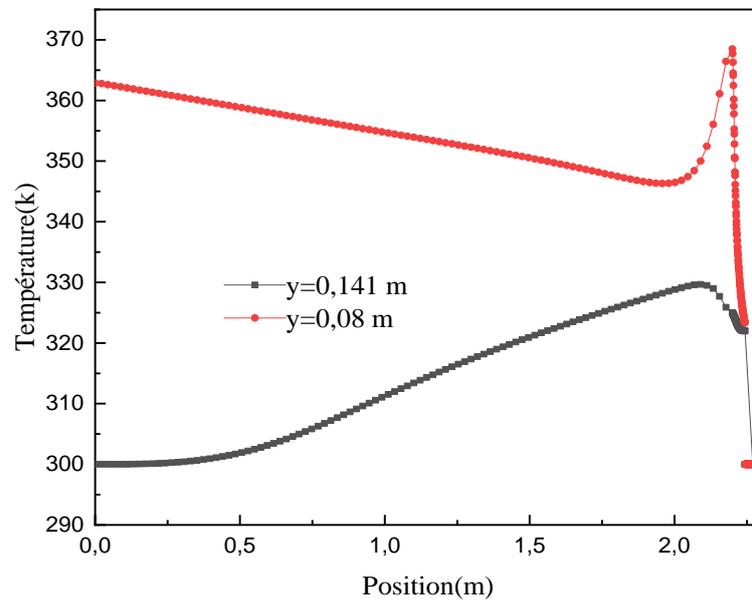


Figure IV-15 : Profil de température totale.

Le profil du nombre de Nusselt dans la paroi supérieure du capteur a été tracé dans la figure (IV-16). A travers cette figure, nous voyons qu'il y a un décroissement du nombre de Nusselt avec l'accroissement des valeurs de x , ce qui montre la présence de la perte thermique lorsqu'on s'approche de l'extrémité du capteur.

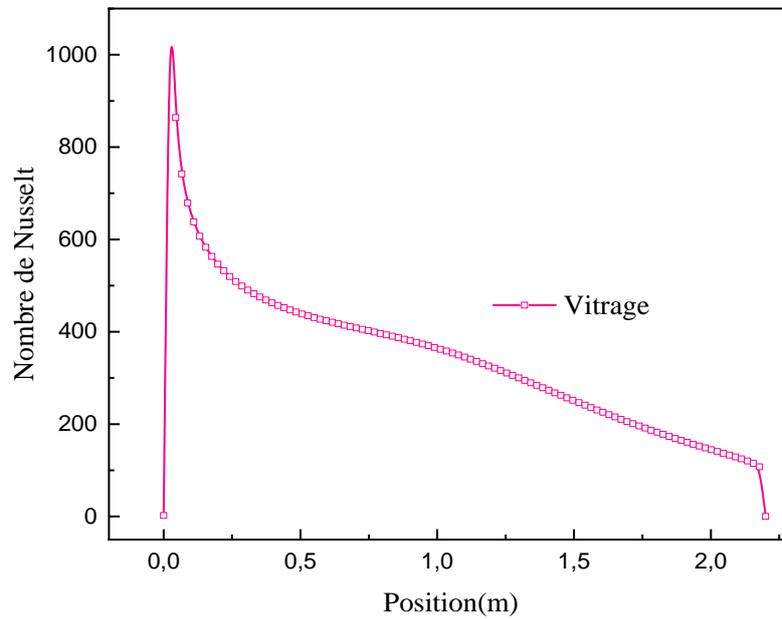


Figure IV-16 : Distribution du nombre de Nusselt dans la paroi supérieure du capteur.

La figure VI-17 montre la variation du rendement thermique du capteur solaire en fonction de débit massique. On observe que l'accroissement de débit massique conduit à l'élévation du rendement thermique du capteur, c'est logique parce que l'augmentation de débit va entraîner à l'augmentation de la chaleur calorifique qui à son tour fait à augmenter la chaleur utile et par conséquent le rendement du capteur.

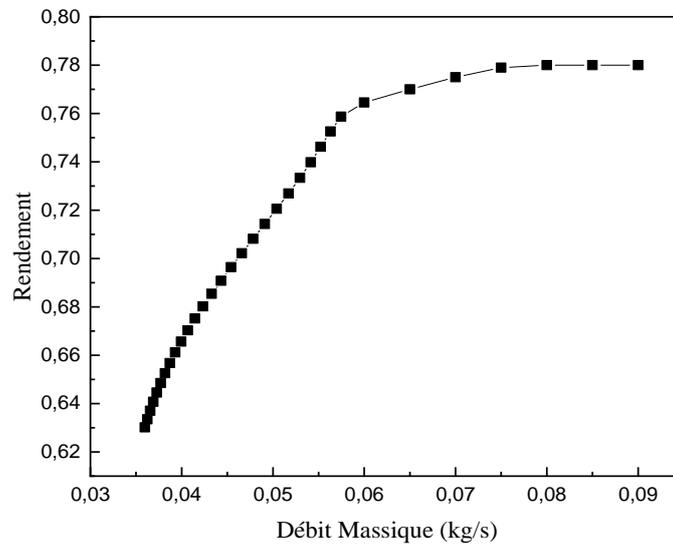


Figure IV-17 : L'influence du débit massique sur rendement thermique du capteur solaire.

IV.6 Influence de la position du canal d'entrée :

Afin d'étudier l'influence de la position d'entrée de l'air dans le capteur, on propose les deux configurations illustrées sur la Figure IV-18.

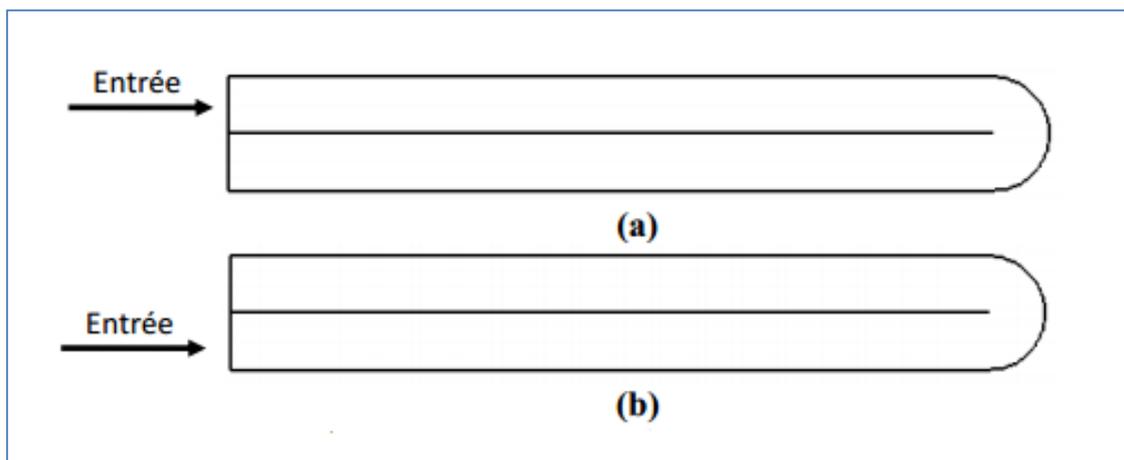


Figure IV-18 : Illustration du canal d'entrée (a) Entrée par le canal supérieur, (b) Entrée par le canal inférieur.

La distribution de champ de température présenté sur les Figures IV-19, montre que celle-ci sont affectées par l'emplacement de l'entrée de l'air. Pour les deux configurations, une zone de recirculation apparaît au bout de l'absorbeur, coté supérieur pour une entrée

inférieure et coté inférieur pour une entrée supérieure. L'analyse des contours montre que la variation de la température est concentrée aux niveaux des deux faces de l'absorbeur et au niveau du vitrage. ainsi que

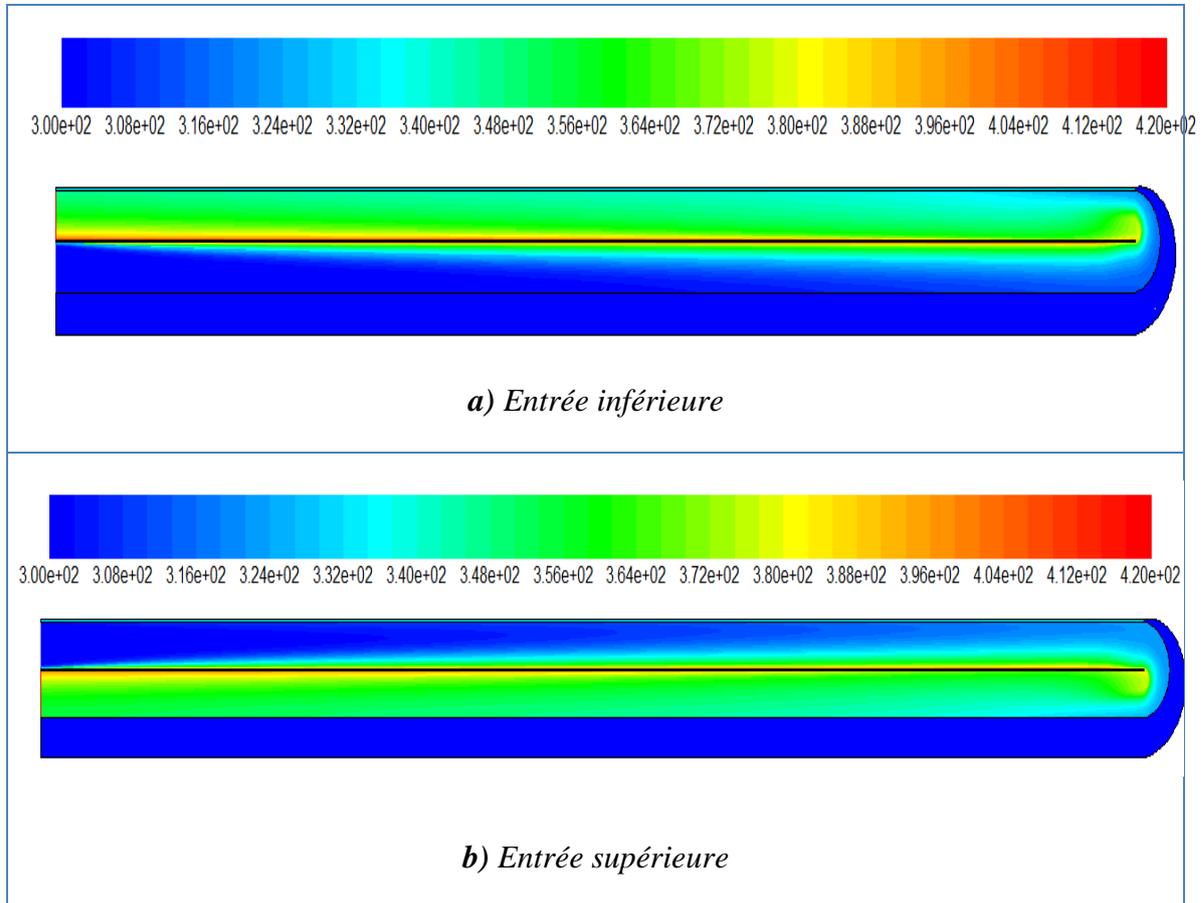


Figure IV-19 : Champ de température (a) Entrée par le canal supérieur, (b) Entrée par le canal inférieur.

La température à la sortie du canal pour les deux configurations du canal a été montrée sur la figure IV-20, selon cette figure nous voyons que l'évolution des températures à la sortie du capteur a la même allure pour les deux configurations et avec néanmoins un avantage pour la configuration présentant une entrée par le haut. On conclut alors, qu'une entrée par le canal supérieur du capteur a un grand intérêt pour les transferts thermiques car elle soumet aux flux thermique très importants de la part de vitre et de l'absorbeur tandis que pour la deuxième configuration va soumettre de la part de l'absorbeur uniquement.

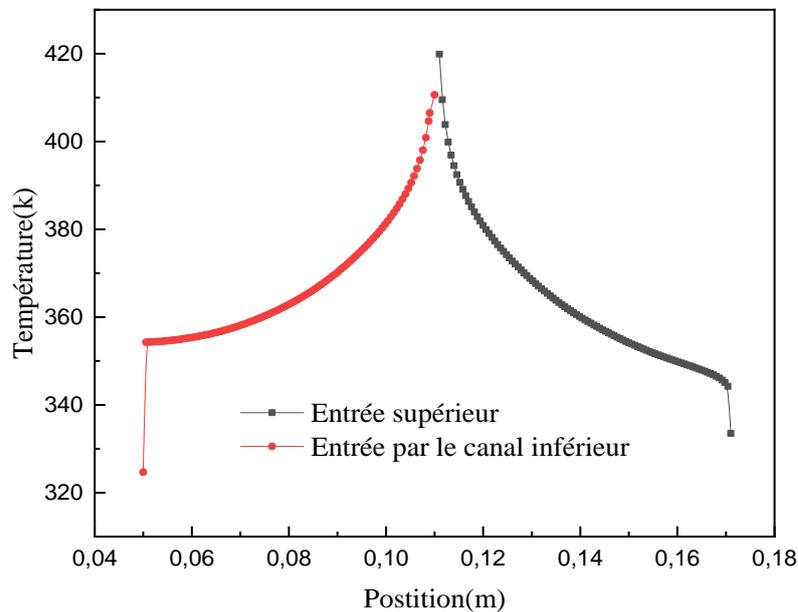


Figure IV-20 : Distribution de la température de sortie.

IV.7 Conclusion :

Une étude numérique d'un écoulement turbulent incompressible bidimensionnel d'air en convection forcée turbulente traversant un capteur solaire à air à double passes a été présentée. Le modèle de turbulence choisi dans cette étude est $k-\epsilon$.

Les profils et les champs de vitesse axiale, les profils et la distribution de la température totale ainsi que le coefficient de frottement et la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans le capteur ont été obtenus le long de la géométrie.

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que les capteurs solaires à double passes nous donnent un meilleur rendement par rapport aux capteurs solaires plans à air ayant une seule passe.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce memoire nous avons étudié thermiquement et dynamiquement un capteur solaire plan à double passes en convection forcé. Ce capteur est constitué d'un vitrage, d'un absorbeur plan et d'une paroi adiabatique pour limiter les déperditions vers l'extérieur.

Le fluide de fonctionnement est de l'air supposé transparent. Le code de calcul **Fluent 6.3.26**, qui est basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour la discrétisation des équations gouvernantes, qui sont les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et de conservation de l'énergie et pour modéliser turbulence nous avons utilisé le modèle k- ϵ .

Les résultats numériques obtenus sont validés et présentés pour analyser le comportement dynamique et thermique de l'écoulement.

Une augmentation de la vitesse dans la partie arrondie du capteur est observée et qui est générée tout d'abord par la présence des zones de recirculation qui ensuite résulte un changement brusque du sens de l'écoulement. Les zones les plus chaudes sont localisées au voisinage du premier vitrage et la partie arrondie du capteur. Ainsi qu'on peut conclure que le capteur solaire à double passes ayant un rendement supérieur à celui du capteur solaire à une seule passe.

Enfin, en perspective, cette étude peut être étalé à d'autres études qui s'intéressent à :

- ✓ Appliquer d'autres conditions aux limites comme par exemple un flux de chaleur variable dans le temps et dans l'espace.
- ✓ Etudier le problème en (3D). (L'intégralité du capteur).
- ✓ Etudier le capteur pour différentes conditions climatiques.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

A

A.Dalila, Université EL-HADJ LAKHDAR-BATNA, Physique Energétique, Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives, 2010.

Amraoui, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité », mémoire de magister (2012).

A.Mohamad, « High efficiency solar air heater », ArticlS universitaire, (1997).

A. Ahmed-Zaïd et al « Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air : Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng », Rev. Energ. Ren. Vol.4 (2001) 69-78, Ecole Supérieure du Pétrole et du Gaz de Boumerdes, Université de Valenciennes et du Hainaut –Cambrésis, B.P. 311 F-59304, article universitaire, (2001)

Ahmad Fudholi et al,2009 , Optimization of a stand-alone wind/PV hybrid system to provide electricity for a household in Malaysia. In *Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment* (pp. 435-438). World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).

B

Benahmed et al, « Simulation numérique des transferts thermiques dans un capteur solaire plan à air à double passe », mémoire de master, Université Ibn khaldoun Tiaret, (2016).

Bouaraour et al Etude numérique d'un capteur solaire plan à double passe muni des chicanes The 4th International Seminar on New and Renewable Energies Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016

C

C. ANNAB, Génie Thermique et Energie Renouvelables, DEPARTEMENT Génie de Mécanique TLEMCEN, Etude thermique d'un capteur Solaire à double passe avec Milieu poreux, 2013.

C. Lertsatitthanakorn et al, « Performance analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector », Solar Energy Materials and Solar Cells, 92(9), 1105-1109, article (author version), 2008-09.

Chii-Dong Ho et al 2011 , Collector efficiency of upward-type double-pass solar air heaters with fins attached. International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(1), 49-56.

E

El-Sebaili.A, et al, « Experimental testing of a shallow solar pond with continuous heat extraction », journals et books, energy and building, 2001.

Ekadewi et al. 2016, Numerical studies on the effect of delta-shaped obstacles' spacing on the heat transfer and pressure drop in v-corrugated channel of solar air heater. Solar Energy, 131, 47-60.

F

F. Mokhtari et D. Semmar, « Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air ». Rev.Energ. Ren. : Valorisation 243-246 (1999).

Faris .A, « Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire Placé dans un climat aride » thèse de doctorat. 2016

Fudholi et al.2013, Performance and cost benefits analysis of double-pass solar collector with and without fins. Energy conversion and management, 76, 8-19.

G

González et al, 2014, Helium bubble clustering in copper from first principles. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 22(3), 035019.

H

HAMICI Nadjib et al, « Free convection in a square enclosure with a finned plate » Matériaux et Energétique (L2ME) Bejaia, article, 2014

H.Sarra et al ,2019 Etude Numérique de la convection naturelle dans une cavité remplie d'un nanofluide mémoire de master, Université Ibn khaldoun Tiaret

Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin « The effect of collector aspect ratio on the collector efficiency of flat-plate solar air heaters, » Energy, Elsevier, vol. 20(10), pages 1041-1047,(1995).

Ho et al, 2009 , Accounting for calibration uncertainty in phylogenetic estimation of evolutionary divergence times. *Systematic biology*, 58(3), 367-380.

Hernández et Quiñonez ,2013 , Potencial de actividad antioxidante de extractos fenólicos de Theobroma cacao L.(cacao). *Revista cubana de plantas medicinales*, 18(2), 201-215.

H. Rakotondramiarana1 et al, 2005) , Modélisation hydrodynamique du processus de gazéification de la biomasse par une approche Euler-Lagrange.

K

K. Salima, Etude théorique et numérique des systèmes couples, distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur, Thèse de magister (2009) 03-15.

KHEBCHI Abderrahman et al, depol institutiennl de l'université abou bekr belkaid Tlemcen UABT, ptimisation de l'écoulement forcé dans la veine d'air d'un capteur solaire plan à air pour une performance dynamique et thermique. (Expérimentale) 1- Entre le vitrage et l'absorbeur. 2- Entre l'absorbeur et l'isolateur, 2017.

Référence bibliographique

K.J. Russell, « Development and Implementation of a Multidisciplinary Sepsis Protocol », Article universitaire, Crit Care Nurse (2006) 26 (3) : 43–54.

K. aoues et al, « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air : Etude expérimentale dans la région de Biskra » Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 237 – 248, (2009)

K.Heinloth, « Goethermal Energy », in Energy technologies, subvolume c : Renewable Energy, 2006.

Karim et Hawlader, « Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications », Applied Thermal Engineering 26 (1) : 121-130. Scholar Bank@NUS Repository.2006.

Kalaiarasi et al.2016 , Experimental energy and exergy analysis of a flat plate solar air heater with a new design of integrated sensible heat storage. *Energy*, 111, 609-619.

L

LAARABA, « Etude numérique du transfert thermique dans un capteur solaire thermique en présence des partitions attachées à son vitrage », mémoire de magister, université hadj Lakhdar Batna, (2014).

Labed et al,2015 , Iridium-Catalyzed Sustainable Access to Functionalized Julolidines through Hydrogen Autotransfer. *ChemCatChem*, 7(7), 1090-1096.

M

Mekelleche et al, « Classification and Comparison of Range-Based Localization Techniques in Wireless Sensor Networks », Journal of Communications Vol. 12, No. 4, University of Oran 1 Ahmed Ben Bella.Algeria, 2017.

Mamemordiarrandiaye, « Optimisation d'un capteur solaire double passe à air et estimation des échanges de chaleur paroi-fluide », THÈSE DE DOCTORAT. **2018**

N

Ndiaye et al, UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, THÈSE DE DOCTORAT, Spécialité THERMIQUE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENT, « Optimisation des performances d'un capteur solaire à air et estimation des coefficients d'échange paroi-fluide », 2018.

Naphon et Congtragool,2003 , Etude des performances d'un capteur solaire à air double passe muni d'une plaque comportant des trapèzes (Doctoral dissertation).

N. Moumimi et al, « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air : Etude expérimentale dans la région de Biskra », *Energies Renouvelables*, (2004)

P

Paisarn, 2005 , On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins. *Renewable Energy*, 30(9), 1345-1357.

R

Ramani et al,2010 , Integrated sustainable life cycle design: a review. *Journal of Mechanical Design*, 132(9).

Rakesh Kumar et Marc A. Rosen 2011 , A critical review of photovoltaic–thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy*, 88(11), 3603-3614.

R. Sihem Samya et REZZOUG Wassila ,2017, tude des performances d'un capteur solaire à air double passe muni d'une plaque comportant des trapèzes. MEMOIRE de MASTER Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

S

Soteris Kalogirou.A, Professor Cyprus University of Technology, solar energy renewabel energy system, 2004.

Référence bibliographique

Saadi Souad, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire Plan". Thèse de magister (2010) 05-19.

Sandali Messaoud, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid 2014.

Sopian et al, « DESIGN OF AN EXPERIMENTAL SOLAR ASSISTED DRYER

FOR PALM OIL FRONDS », Renewable Energy, Universiti Kebangsaan Malaysia, 1998.

S. Youcef-Ali,« Simulation of a new concept of an indirect solar dryer equipped with offset rectangular plate fin absorber-plate », international journal of energy research, (2005).

S. Oudjedi et al, « Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie : 2) », Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Département de Génie Climatique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie 2008.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics. Finite Volume Method, Essex, Longman Scientific & Technical.