



TABLE DES MATIERES

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	

Introduction Générale.....	(01)
----------------------------	------

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	(04)
I.2 Recherches réalisées sur les capteurs solaires à seul passe.....	(05)
I.3 Recherches réalisées sur les capteurs solaires à double passe.....	(18)
I.3 Conclusion.....	(34)

Chapitre II : Le gisement solaire

II.1 Introduction.....	(36)
II.2 Le Soleil.....	(36)
II.2.1 Les grandes dates.....	(37)
II.2.2 Structure du Soleil.....	(38)
II.2.2.1 Le cœur ou noyau.....	(39)
II.2.2.2 La zone de radiation.....	(39)
II.2.2.3 La zone de convection.....	(40)
II.2.2.4 La photosphère.....	(40)
II.2.2.5 La couronne solaire.....	(40)
II.2.2.6 La chromosphère.....	(41)
II.2.2.7 L'héliosphère.....	(41)
II.3 Caractéristiques de la terre.....	(42)
II.3.1 L'atmosphère terrestre.....	(42)
II.4 Mouvement de la terre.....	(42)
II.5 L'énergie solaire.....	(43)
II.5.1 Énergie solaire photovoltaïque.....	(43)
II.5.2 Énergie solaire thermique.....	(44)
II.5.3 Caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire.....	(44)
II.5.4 Paramètres de position.....	(45)
II.5.4.1 Les coordonnées géographiques terrestres.....	(45)
II.5.4.2 Les coordonnées horaires.....	(45)
II.5.4.3 Les coordonnées horizontales.....	(46)
II.5.5 Le temps solaire.....	(47)

II.5.5.1 Temps solaire vrai.....	(47)
II.5.5.2 Durée de jour.....	(48)
II.5.5.3 Equation de temps.....	(48)
II.5.5.4 Temps solaire moyen TSM.....	(48)
II.5.5.5 Temps universel (<i>TU</i>)	(48)
II.5.5.6 Temps légal TL.....	(49)
II.5.6 Le rayonnement solaire.....	(49)
II.5.7 Le spectre de la radiation solaire.....	(50)
II.5.8 Rayonnement solaire hors atmosphère.....	(51)
II.5.8.1 La constante solaire	(51)
II.5.9 Direction des rayons solaires par rapport à un plan.....	(52)
II.5.10 Atténuation du rayonnement solaire (rôle de l'atmosphère).....	(53)
II.5.11 L'irradiation ou rayonnement solaire au sol.....	(53)
II.5.11.1 Le rayonnement direct.....	(53)
II.5.11.2 Le rayonnement diffus.....	(53)
II.5.11.3 Le rayonnement global.....	(53)
II.5.12 L'albédo.....	(54)
II.5.13 Mesure et calcul des rayonnements solaires.....	(55)
II.5.13.1 Le rayonnement direct.....	(55)
II.5.13.2 Le rayonnement solaire diffus.....	(56)
II.5.13.3 Le rayonnement global.....	(57)
II.5.14 Taux d'ensoleillement.....	(57)
II.6 Le gisement solaire en Algérie.....	(57)
II.7 Conclusion.....	(59)

Chapitre III : Les capteurs solaires

III.1 Introduction.....	(61)
III.2 Définition et principe d'un capteur solaire plan.....	(61)
III.3 Constituants d'un capteur solaire plan.....	(62)
III.3.1 Une couverture transparente.....	(62)
III.3.2 Partie absorbante.....	(62)
III.3.3 Le fluide caloporteur.....	(64)
III.3.4 L'isolation thermique.....	(65)
III.3.5 Le coffre.....	(66)
III.4 Les types d'un capteur solaire thermique.....	(66)
III.4.1 Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif.....	(66)
III.4.2 Les capteurs plans vitrés.....	(67)
III.4.3 Les capteurs à tubes sous vide.....	(69)
III.4.4 Le capteur cylindro-parabolique.....	(70)
III.4.5 Le capteur CPC (Compound Parabolic Concentrator).....	(71)
III.4.6 Le capteur moquette.....	(71)
III.5 Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.....	(72)

III.5.1 Les paramètres internes.....	(72)
III.5.1.1 La vitre.....	(72)
III.5.1.2 L'absorbeur.....	(73)
III.5.1.3 Forme et diamètres des pipes.....	(73)
III.5.1.4 La circulation du fluide caloporteur.....	(73)
III.5.1.5 L'isolation.....	(73)
III.5.1.6 L'orientation et l'inclinaison du capteur.....	(74)
III.5.2 Paramètres externes.....	(74)
III.5.2.1 Obstacles.....	(74)
III.5.2.2 Rayonnement solaire.....	(74)
III.5.2.3 Température.....	(74)
III.5.2.4 Vitesse du vent.....	(74)
III.6 Pertes thermiques dans un capteur solaire.....	(75)
III.6.1 Pertes par convection.....	(75)
III.6.2 Pertes par conduction.....	(75)
III.6.3 Pertes par rayonnement.....	(75)
III.7 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire.....	(76)
III.7.1 La conduction.....	(76)
III.7.2 La convection.....	(78)
III.7.3 Le rayonnement.....	(79)
III.8 Système de Capteurs solaires.....	(79)
III.8.1 Installation des Capteurs solaires.....	(79)
III.8.2 Protection contre le gel.....	(80)
III.9 Conclusion.....	(80)

Chapitre IV : Modélisation mathématique du problème

IV.1 Introduction.....	(82)
IV.2 Géométrie du problème.....	(82)
IV.3 Les paramètres de fonctionnement d'entrée.....	(83)
IV.4 Propriétés thermophysiques des différents composants du capteur.....	(84)
IV.4.1 Propriétés thermophysiques de l'air.....	(84)
IV.4.2 Propriétés de La vitre.....	(84)
IV.4.3 Propriétés de L'absorbeur.....	(85)
IV.4.4 Propriétés de L'isolation.....	(85)
IV.4.5 Propriétés du milieu poreux.....	(85)
IV.5 Hypothèses simplificatrices.....	(86)
IV.6 Modèle mathématique.....	(86)
IV.6.1 Dans l'air.....	(86)
IV.6.2 Dans le milieu solide.....	(87)
IV.6.3 Dans le milieu poreux.....	(87)
IV.7 Conditions initiales et aux limites.....	(88)
IV.7.1 Conditions initiales.....	(88)

IV.7.2 Conditions aux limites.....	(88)
IV.7.2.1 Aux frontières des parois.....	(88)
IV.7.2.2 A la sortie du capteur.....	(89)
IV.7.2.3 A l'entrée du capteur.....	(89)
IV.8 L'équation de la variation de l'intensité solaire en fonction de temps.....	(89)
IV.9 L'équation de la variation de température ambiante en fonction du temps.....	(90)
IV.10 Efficacité thermique du capteur solaire.....	(91)
IV.11 Conclusion.....	(91)

Chapitre V : Résolution numérique

V.1 Introduction.....	(93)
V.2 Le calcul numérique (modélisation et simulation).....	(93)
V.2.1 Principe du calcul numérique.....	(93)
V.2.2 Rappel sur la méthode des volumes finis (MVF).....	(94)
V.2.2.1 Subdivision du domaine d'étude (maillage).....	(95)
V.2.2.2 L'équation de transport.....	(96)
V.3 Les différentes étapes de l'approche numérique.....	(97)
V.3.1 Présentation du logiciel Gambit.....	(97)
V.3.1.1 Description du panel général.....	(98)
V.3.1.2 Maillage de la géométrie.....	(99)
V.3.1.2.1 Choix de type de maillage.....	(99)
V.3.1.2.2 Techniques générales de génération du maillage.....	(100)
V.3.1.2.3 Qualité du maillage.....	(100)
V.3.1.3 Conditions aux limites et définition de domaines.....	(101)
V.3.2 Présentation du code FLUENT.....	(101)
V.3.2.1 Interface du code Fluent.....	(102)
V.3.2.2 Résolution du problème avec le code FLUENT.....	(103)
V.4 Conclusion.....	(103)

Chapitre VI : Présentation et interprétation des résultats

VI.1 Introduction.....	(105)
VI.2 Validation du modèle numérique.....	(105)
VI.3 Cas stationnaire.....	(106)
VI.3.1 Etude dynamique.....	(106)
VI.3.1.1 Présentation du contour de la vitesse axiale.....	(106)
VI.3.1.2 Présentation du contour des lignes de courant.....	(106)
VI.3.1.3 Profils de la vitesse axiale.....	(107)
VI.3.1.4 Influence du débit sur la vitesse axiale.....	(108)
VI.3.1.5 Profils de coefficient de friction.....	(111)

VI.3.1.6 Influence du débit sur le profil du coefficient de friction.....	(112)
VI.3.2 Etude thermique.....	(113)
VI.3.2.1 Présentation du contour de température.....	(113)
VI.3.2.1.1 Sans milieu poreux.....	(113)
VI.3.2.1.2 Avec milieu poreux.....	(114)
VI.3.2.2 Effet du débit massique sur les températures des composants du capteur solaire.....	(115)
VI.3.2.2.1 Sans milieu poreux.....	(115)
VI.3.2.2.2 Comparaison avec milieu poreux.....	(119)
VI.3.2.3 Effet du rayonnement solaire sur les températures des composants du capteur solaire.....	(123)
VI.3.2.3.1 Sans milieu poreux.....	(124)
VI.3.2.3.2 Comparaison avec milieu poreux.....	(128)
VI.3.2.4 Influence de la porosité sur la température du fluide dans les deux passages, supérieur et inférieur du capteur solaire.....	(132)
VI.3.2.5 L'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique.....	(133)
VI 3.2.5.1 Sans milieu poreux.....	(133)
VI.3.2.5.2 Avec milieu poreux.....	(135)
VI.3.2.6 L'influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur les températures des composants du capteur.....	(136)
VI.3.2.6.1 Sans milieu poreux.....	(136)
VI.3.2.6.2 Avec milieu poreux.....	(137)
VI.3.2.7 L'influence de la longueur de l'absorbeur sur les températures des composants du capteur solaire.....	(138)
VI.3.2.7.1 Sans milieu poreux.....	(138)
VI.3.2.7.2 Avec milieu poreux.....	(139)
VI.3.2.8 L'influence de la hauteur de la conduite inférieure sur la température du fluide à la sortie du capteur solaire.....	(141)
VI.3.2.8.1 Sans milieu poreux.....	(141)
VI.3.2.8.2 Avec milieu poreux.....	(142)
VI.4 Cas instationnaire.....	(144)
VI.4.1 Sans milieu poreux.....	(144)
VI.4.2 Avec milieu poreux.....	(149)
VI.4.3 Comparaison entre les deux cas.....	(152)
VI.5 Conclusion.....	(154)
Conclusion générale.....	(156)
Référence bibliographiques	

RapportGratuit.com



*LISTE DES
FIGURES*

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1 : Capteur solaire à air.....(5)

Figure I.2 : Le schéma de l’installation expérimentale pour la mesure graphique.....(6)

Figure I.3 : Schéma d’un capteur solaire basé sur le préchauffage de l’air.....(6)

Figure I.4 : Coupe transversale du capteur à air.....(7)

Figure I.5 : Schéma du système.....(8)

Figure I.6 : le capteur solaire plan à air avec des chicanes (obstacles).....(8)

Figure I.7 : Installation expérimentale.....(9)

Figure I.8 : Le schéma du capteur solaire thermique menu d’un matériau de changement de phase..... (9)

Figure I.9 : Capteur solaire avec des obstacles..... (10)

Figure I.10 : Différentes formes des ailettes ajoutées à l’absorbeur pour améliorer l’efficacité de l’absorbeur..... (10)

Figure I.11 : Schéma du système de chauffage utilisé des capteurs solaires plans..... (11)

Figure I.12 : Serre agricole chauffé par les collecteurs sélectifs..... (11)

Figure I.13 : Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l’écoulement..... (12)

Figure I.14 : Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l’écoulement et soudées à la face inférieure de l’absorbeur..... (13)

Figure I.15 : Une coupe transversale qui représente un nouveau capteur solaire intégré au toit..... (14)

Figure I.16 : Conception des capteurs à aérogel de silice..... (15)

Figure I.17 : Vue schématique du capteur solaire à air..... (16)

Figure I.18 : Schéma électrique de l’isolateur (méthode globale)..... (16)

Figure I.19 : Schéma du modèle expérimental..... (17)

Figure I.20 : Schéma d’un élément du capteur..... (18)

Figure I.21 : Le schéma d’un capteur solaire thermique à double passe avec des milieux poreux dans le deuxième canal..... (19)

Figure I.22 : Schéma d’un capteur solaire à double passe avec milieu poreux..... (20)

Figure I.23 : Capteur solaire à multi passes incliner..... (21)

Figure I.24 : Le modèle schématique de capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe avec (CPC) et ailettes..... (21)

Figure I.25 : Schéma d’un capteur solaire avec (B) et sans milieu poreux (A)..... (22)

Figure I.26 : Le modèle schématique d’un capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe..... (23)

Figure I.27 : Diagramme schématique du capteur solaire TE..... (24)

Figure I.28 : Capteur solaire avec des ilettes interne et recyclage externe..... (25)

Figure I.29 : Capteur solaire à air à double passe avec des ailettes dans le second canal... (25)

Figure I.30 : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux..... (26)

Figure I.31 : Schéma du coefficient de transfert de chaleur dans le capteur solaire à double passe avec milieu poreux..... (26)

Figure I.32 : Schéma d’un capteur solaire à air à double passage à ailettes dans le second canal..... (27)

Figure I.33 : Arrangement double passe : (a) sans matière poreuse, (b) avec matière poreuse.....	(28)
Figure I.34 : Capteur solaire PV/T à double passe : (a) avec des ailettes, (b) sans ailettes.....	(29)
Figure I.35 : Diagramme schématique d'un capteur solaire.....	(30)
Figure I.36 : Schéma du capteur solaire à double passe avec longitudinal.....	(30)
Figure I.37 : Capteur solaire à air à double passe avec des ailettes à la plaque absorbant (DPFIPSAH).....	(31)
Figure I.38 : Capteur solaire à double passe à une plaque absorbant ondulé-v (DPVCPSAH).....	(31)
Figure I.39 : Diagramme schématique du capteur solaire à double passe représenter le débit massique différentiel.....	(32)
Figure I.40 : Un dessin schématique d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes plus confus.....	(33)
Figure I.41 : Les capsules au-dessus à la plaque absorbant.....	(34)
Figure I.42 : Les capsules au-dessous à la plaque absorbant.....	(34)
Figure I.43 : Les capsules au-dessus de l'isolant.....	(34)

Chapitre II : Le gisement solaire

Figure II.1 : Structure du soleil en coupe.....	(38)
Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil.....	(43)
Figure II.3 : Les coordonnées géographiques terrestres.....	(45)
Figure II.4 : Les coordonnées horaires.....	(46)
Figure II.5 : Les coordonnées horizontales.....	(47)
Figure II.6 : Fuseaux horaires avec le décalage horaire.....	(49)
Figure II.7 : Spectre solaire.....	(50)
Figure II.8 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.....	(51)
Figure II.9 : Carte du monde de l'enseilllement moyen annuel.....	(57)
Figure II.10 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.....	(58)

Chapitre III : Les capteurs solaires

Figure III.1 : Capteur solaire thermique.....	(61)
Figure III.2 : Composants d'un capteur solaire.....	(62)
Figure III.3 : Capteurs solaires sans vitrage.....	(67)
Figure III.4 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif.....	(67)
Figure III.5 : Capteur solaire vitré.....	(68)
Figure III.6 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....	(68)
Figure III.7 : capteurs à tube sous vide.....	(69)
Figure III.8 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.....	(70)
Figure III.9 : Système à réflecteur cylindro-parabolique.....	(70)
Figure III.10 : Coupe schématique du capteur CPC.....	(71)



Figure III.11 : Capteur solaire moquette..... (72)
Figure III.12 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan..... (76)

Chapitre IV : Modélisation mathématique du problème

Figure IV.1 : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux..... (82)
Figure IV.2 : La variation de l'intensité solaire en fonction du temp.....(90)
Figure IV.3 : La variation de la température ambiante en fonction du temps.....(91)

Chapitre V : Résolution numérique

Figure V.1: Le principe du calcul numérique.....(93)
Figure V.2 : Schéma du maillage.....(96)
Figure V.3 : Panels généraux du logiciel Gambit.....(98)
Figure V.4 : Exemple de maillage.....(100)
Figure V.5 : Type de résolution.....(102)
Figure V.6 : Vue globale de Fluent.....(102)

Chapitre VI : Présentation et interprétation des résultats

Figure VI.1 : comparaison entre les résultats numérique et les résultats expérimentaux et théoriques de **Sopian et al.**.....(105)
Figure VI.2 : Contour de la vitesse axiale.....(106)
Figure VI.3 : Contour des lignes de courant.....(106)
Figure VI.4 : Les différentes sections choisies..... (107)
Figure VI.5 : Profil de la vitesse axiale pour les différentes sections..... (107)
Figure VI.6 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x=0.5m$... (108)
Figure VI.7 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 1m$...(109)
Figure VI.8 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 2m$...(109)
Figure VI.9 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x =2.17m$ (110)
Figure VI.10 : Variation du coefficient de friction le long de les parois inférieur du vitrage et de l'absorbeur pour $G_f=0.008Kg/s$ (111)
Figure VI.11 : Effet de variation du débit sur le profil du coefficient de friction dans la paroi inférieure du vitrage..... (112)
Figure VI.12 : Effet de variation du débit sur le profil du coefficient de friction dans la paroi inférieure de l'absorbeur..... (112)
Figure VI.13 : Distribution de champ de température dans le capteur solaire à double passe sans milieu poreux.....(113)
Figure VI.14 : Distribution de champ de température dans le capteur solaire à double passe avec milieu poreux.....(114)
Figure VI.15 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.005 kg/s$ (115)
Figure VI.16 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$ (116)
Figure VI.17 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.01 kg/s$ (117)

Figure VI.18 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.04 kg/s$	(117)
Figure VI.19 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.08 kg/s$	(118)
Figure VI.20 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et différents débits massique.....	(118)
Figure VI.21 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.005 kg/s$	(119)
Figure VI.22 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(120)
Figure VI.23 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.01 kg/s$	(120)
Figure VI.24 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.04 kg/s$	(121)
Figure VI.25 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.08 kg/s$	(121)
Figure VI.26 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et différents débits massique.	(122)
Figure VI.27 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=300W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(124)
Figure VI.28 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=400W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(124)
Figure VI.29 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(125)
Figure VI.30 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=600W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(125)
Figure VI.31 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=700W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(126)
Figure VI.32 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans milieu poreux pour $G_f=0.008kg/s$ et différents valeurs des rayonnements solaire.	(126)
Figure VI.33 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=300W/m^2$ et $Q=0.008Kg/s$	(128)
Figure VI.34 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=400W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(128)
Figure VI.35 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(129)
Figure VI.36 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=600W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(129)
Figure VI.37 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=700W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(130)
Figure VI.38 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans et avec milieu poreux pour $G_f = 0.008 kg/s$ et différents valeurs des rayonnements solaire.	(130)
Figure VI.39 : L'influence de la porosité sur Tf1 et Tf2 du capteur solaire avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$	(132)

- Figure VI.40** : L'influence du rayonnement solaire et du débit sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans milieu poreux. (133)
- Figure VI.41** : L'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans et avec milieu poreux..... (135)
- Figure VI.42** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas de l'épaisseur de l'absorbeur ($H_a=2$ et $H_a=4$ mm), pour $I=500W/m^2$ et $Gf=0.008$ kg/s.(136)
- Figure VI.43** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas de l'épaisseur de l'absorbeur ($H_a=2$ et $H_a=4$ mm), pour $I=500W/m^2$ et $Gf=0.008$ kg/s.(137)
- Figure VI.44** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas de la longueur de l'absorbeur ($L_2=2$ et $L_2 =2.13m$), pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008$ kg/s.(138)
- Figure VI.45** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas de la longueur de l'absorbeur ($L_2 =2$ et $L_2 =2.13m$), pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008$ kg/s.(139)
- Figure VI.46** : Comparaison entre Tf_1 et Tf_2 du capteur solaire sans et avec milieu poreux dans le cas de la longueur de l'absorbeur égale à 2m pour $I=500W/m^2$ et $Gf=0.008kg/s$(140)
- Figure VI.47** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m) pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008$ kg/s.(141)
- Figure VI.48** : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m) pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008$ kg/s.....(142)
- Figure VI.49** : Comparaison entre Tf_1 et Tf_2 du capteur solaire sans et avec milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m), pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008$ kg/s.(143)
- Figure VI.50** : Evolution de la température (K) en fonction du temps pour le capteur solaire à double passe sans milieu poreux : (a) 09:00; (b) 11:00; (c) 13:00; (d) 15:00; (e) 17:00; (f) 19:00; (g) 21:00.....(146)
- Figure : VI.51** : Evolution du Tf_1 et Tf_2 du capteur solaire à double passe sans milieu poreux.(147)
- Figure VI.52**: Evolution de la température du fluide à la sortie du capteur solaire sans milieu poreux.(148)
- Figure VI.53** : Evolution de la température (K) en fonction du temps pour le capteur solaire à double passe avec milieu poreux : (a) 09:00; (b) 11:00; (c) 13:00; (d) 15:00; (e) 17:00; (f) 19:00; (g) 21:00.(151)
- Figure : VI.54** : Evolution du Tf_1 et Tf_2 du capteur solaire avec milieu poreux.(151)
- Figure VI.55** : Evolution instationnaire de la température du fluide au centre de la sortie du capteur solaire avec et sans milieu poreux.(152)
- Figure VI.56**: Comparaison entre la température du fluide à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.(153)



*LISTE DES
TABLEAUX*

Liste des tableaux

Chapitre II : Le gisement solaire

Tableau II.1 : Caractéristiques principales de la terre.....	(42)
Tableau II.2 : Répartition spectrale du rayonnement thermique.....	(50)
Tableau II.3 : Albédo pour différentes surfaces.....	(54)
Tableau II.4 : Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique.....	(55)
Tableau II.5 : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.....	(55)
Tableau II.6 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	(58)

Chapitre III : Les capteurs solaires

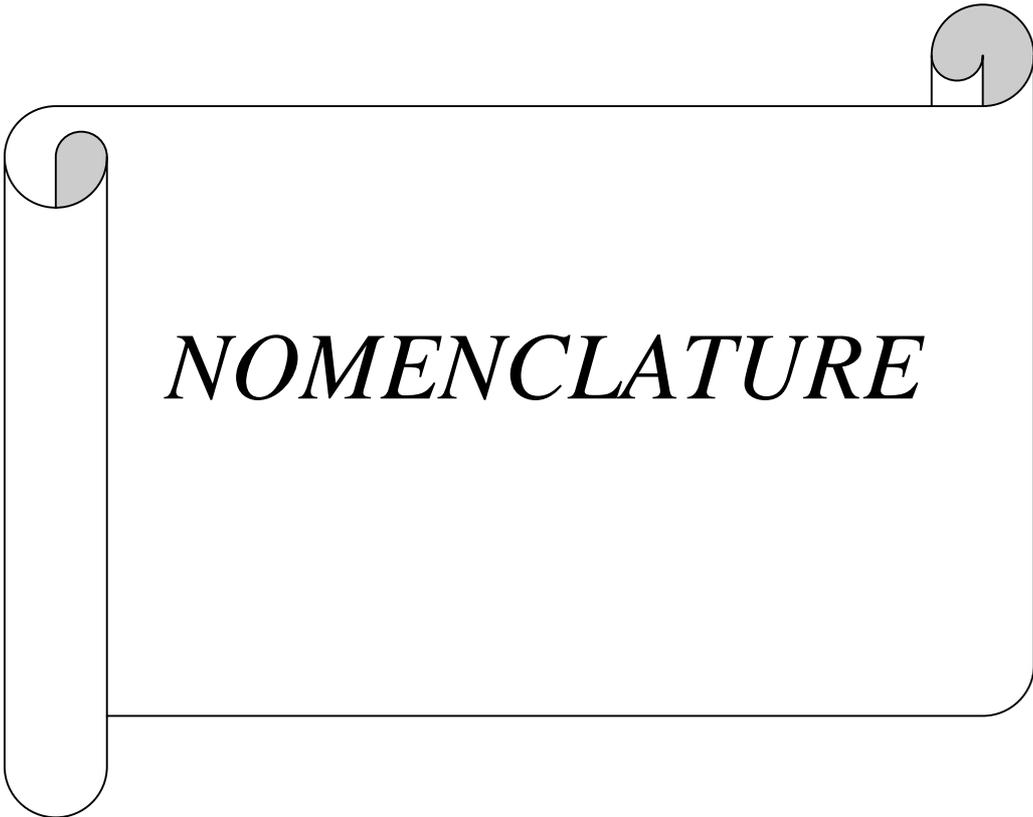
Tableau III.1 : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge.....	(63)
Tableau III.2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques.....	(64)
Tableau III.3 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.....	(66)

Chapitre IV : Modélisation mathématique du problème

Tableau IV.1 : Dimensions géométriques du capteur solaire.....	(83)
Tableau IV.2 : Paramètres physiques du capteur solaire, utilisés dans la simulation numérique.....	(83)
Tableau IV.3 : Propriétés thermophysiques de l'air.....	(84)
Tableau IV.4 : Propriétés thermophysiques de la vitre.....	(84)
Tableau IV.5 : Propriétés thermophysiques de l'absorbeur.....	(85)
Tableau IV.6 : Propriétés thermophysiques de l'isolation.....	(85)
Tableau IV.7 : Propriétés thermophysiques du matériau poreux.....	(85)

Chapitre VI : Présentation et interprétation des résultats

Tableau VI.1 : L'influence du débit sur la température du fluide dans les deux passages du capteur solaire sans milieu poreux.....	(119)
Tableau VI.2 : L'influence du débit sur la température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.....	(123)
Tableau VI.3 : L'influence du rayonnement solaire sur les températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux.....	(127)
Tableau VI.4 : L'influence du rayonnement solaire sur la température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.....	(131)
Tableau VI.5 : L'influence du débit sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans milieu poreux.....	(134)



NOMENCLATURE

Nomenclature

➤ Lettres latines

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
A	Surface d'échange	m ²
H	Hauteur	m
L	Longueur du capteur	m
G _f	Débit massique	Kg .s ⁻¹
I	Rayonnement solaire	W.m ⁻²
T	Température	K
P	Pression	Pa
h _a	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	W.m ⁻² .K ⁻¹
T _a	La température ambiante	K
G	La gravité	m.s ⁻²
V _{vent}	Vitesse du vent	m.s ⁻¹
S _∅	Terme source	/
K	Perméabilité	m ²
C	Coefficient d'inertie	/
t	Temps	s

➤ Lettres grecques

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
η	Efficacité thermique	%
∅	Porosité	/
Γ	Coefficient de diffusion	/
ε	Emissivité	/
α	Coefficients d'absorption	/
τ	Coefficients de transmission	/
δ	Epaisseur	/
μ	Viscosité	Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
λ	Conductivité thermique	J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹
C _p	Chaleur spécifique	J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹
ρ	Masse volumique	Kg.m ⁻³

➤ *Indices*

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
a	Absorbeur
v	Vitrage
i	isolante
pm	Milieu poreux
in	Entré
s	ciel
f	Fluide
s	Solide
1	Premier conduite
2	Deuxième conduite
m	moyenne



*INTRODUCTION
GENERALE*

Introduction générale

Fondamentalement, toutes les formes des énergies du monde sont d'origine solaire, le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le bois ont été à l'origine produites par des processus photosynthétiques. Le soleil peut être classé comme une source d'énergie très importante [49].

L'énergie solaire permet de réduire la « dépendance énergétique » d'un pays et d'éviter les atteintes à l'environnement occasionnées par les sources d'énergie conventionnelles. Les techniques pour en tirer profit de l'énergie solaire ont été grandement améliorées, aujourd'hui il y a plusieurs millions de m² de capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes [47].

Ainsi l'énergie solaire peut être transformée en chaleur à basse température, par des capteurs plans usant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre créée par un vitrage et servant habituellement à la production d'eau ou d'air chaud. Pour les applications nécessitent de hautes températures des capteurs à concentration sont utilisés [47].

Aussi l'énergie solaire peut être transformée en électricité par conversion photovoltaïque, de même à la distillation d'eau de mer et au séchage de différents produits, elle peut également être utilisée pour la climatisation en générant des températures froides à partir de la chaleur du soleil par cycle à absorption.

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 [49].

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 chaude.

Dans ce sens, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des capteurs solaires plans et ayant surtout pour but l'amélioration de son rendement thermique qui est la performance la plus significative. Le rendement thermique du capteur varie avec la géométrie du capteur, l'ensoleillement et les conditions extérieures, etc...

Le travail que nous présentons porte essentiellement sur une étude numérique pour évaluer le champ dynamique et thermique d'un écoulement d'air passant dans un capteur solaire à double passe avec milieu poreux.

Le présent mémoire comporte six chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les différents travaux réalisés sur les capteurs solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre, ainsi que quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.

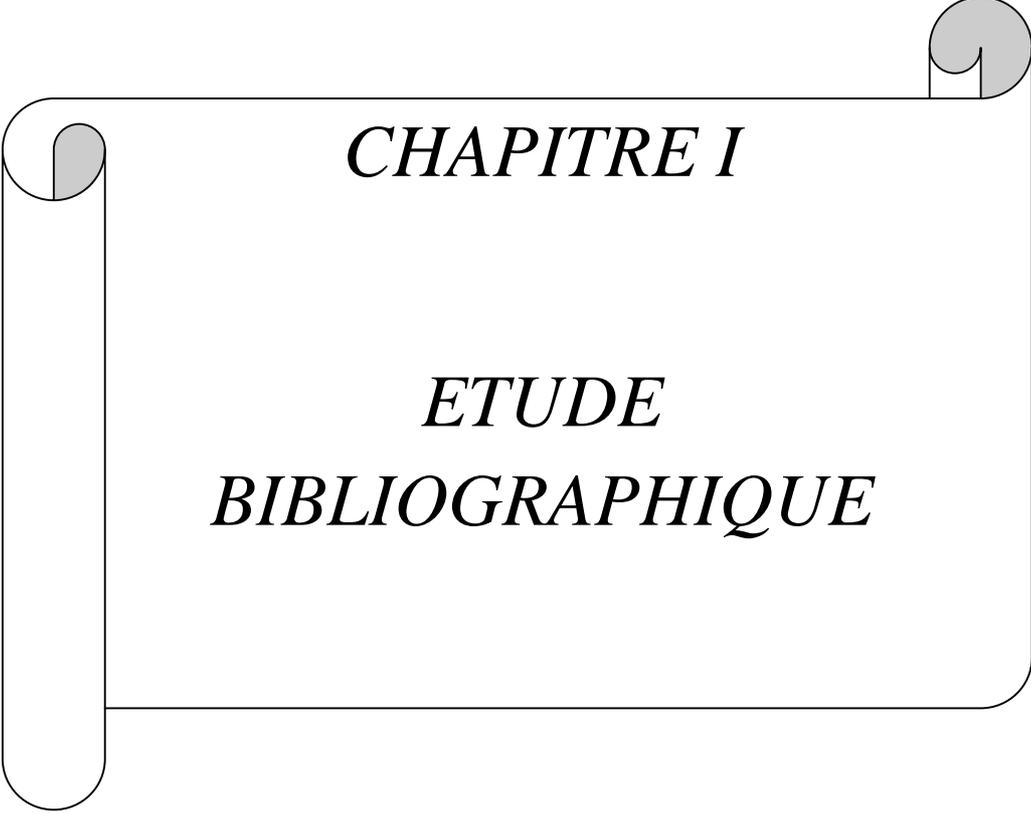
Une étude théorique du capteur solaire, ses différents composants, ses types, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur feront l'objet du troisième chapitre.

La présentation du domaine d'étude ainsi que les différentes équations qui modélisent mathématiquement le comportement thermique du capteur solaire à étudier sont présentées dans le quatrième chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons les équations gouvernant pour la résolution numérique ainsi que la méthode utilisée et le code du calcul fluent.

Les résultats obtenus par une simulation numérique par le logiciel fluent sont présentés dans le dernier chapitre.

En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus ainsi que les perspectives.



CHAPITRE I

*ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE*

I.1 Introduction

Depuis la préhistoire, le soleil a séché la nourriture de l'homme, il a également évaporé l'eau de la mer pour rapporter du sel. Depuis que l'homme a commencé à raisonner, il a identifié le soleil comme puissance motrice derrière chaque phénomène naturel, c'est pour quoi plusieurs des tribus préhistoriques ont considéré le soleil comme dieu [49].

L'idée d'utiliser les collecteurs à énergie solaire est enregistrée depuis des temps préhistoriques où aux 212 avant JUSUS CHRIST, Archimède a conçu une méthode pour brûler la flotte romaine à l'aide des miroirs métalliques.

Pendant le 18ème siècle, des fours solaires capables de fondre le fer, le cuivre et d'autres métaux étaient construits. Un four conçu par le scientifique français Antoine Lavoisier, atteint la température remarquable de 1750 °C. Pendant le 19ème siècle des tentatives ont été faites afin de convertir l'énergie solaire en d'autres formes basées sur la génération de la vapeur à basse pression pour actionner des machines à vapeur [49].

En 1875, Mouchot a fait une avance notable dans la conception de capteur solaire en faisant un réflecteur sous forme de cône court. En 1901, A.G. Eneas a installé un collecteur de focalisation de diamètre 10 m qui a permis d'actionner un appareillage de pompage de l'eau d'une ferme de Californie. Pendant les 50 dernières années, beaucoup de constructions ont été conçues en utilisant les collecteurs solaires afin de chauffer le fluide de fonctionnement qui actionne l'équipement mécanique [49].

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 [49].

I.2 Recherche réalisées sur les capteurs solaires à seul passe

Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin (1995), [01] ont étudié théoriquement et expérimentalement l'influence du rayonnement solaire capturé sur l'efficacité de capteur solaire. 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.

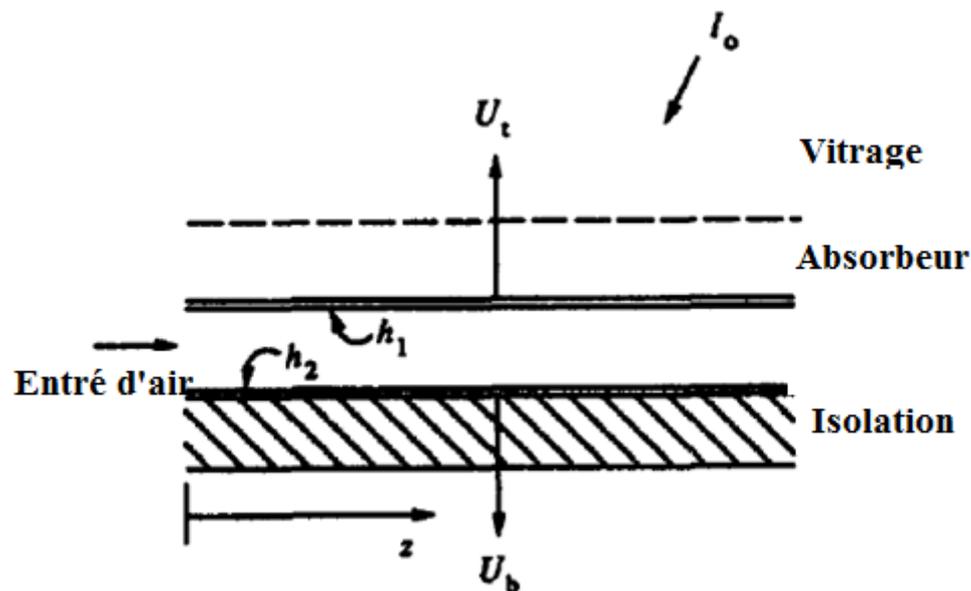


Figure (I.1) : capteur solaire à air [1].

N. Nijegorodov et al (1996), [02] ont présenté dans une étude expérimentale une méthode graphique pour mesurer les efficacités moyennes et instationnaires d'un capteur plan. Egalement, ils ont obtenu le coefficient global des pertes de chaleur et les facteurs de pertes optiques pour les deux systèmes. Cette méthode peut être utilisée pour une comparaison entre la performance des différents capteurs et concentrateurs.

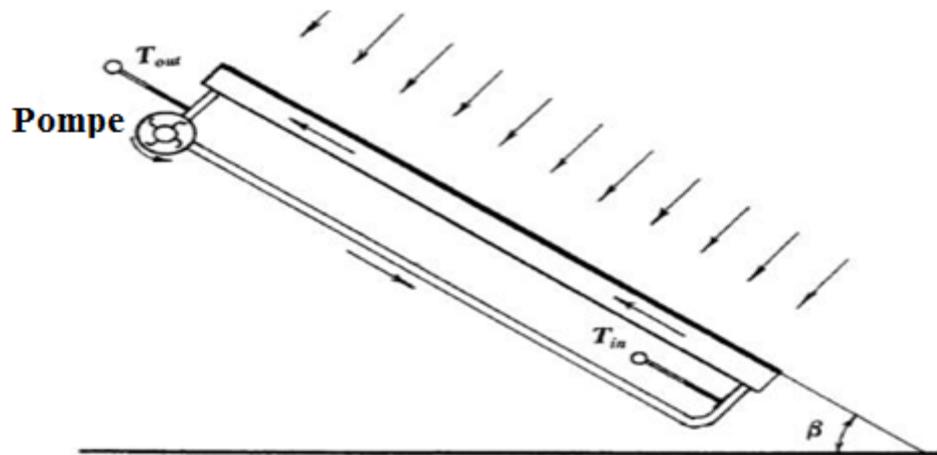


Figure (I.2) : Le schéma de l'installation expérimentale pour la mesure graphique [2].

A. Mohamad (1997), [03] 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.

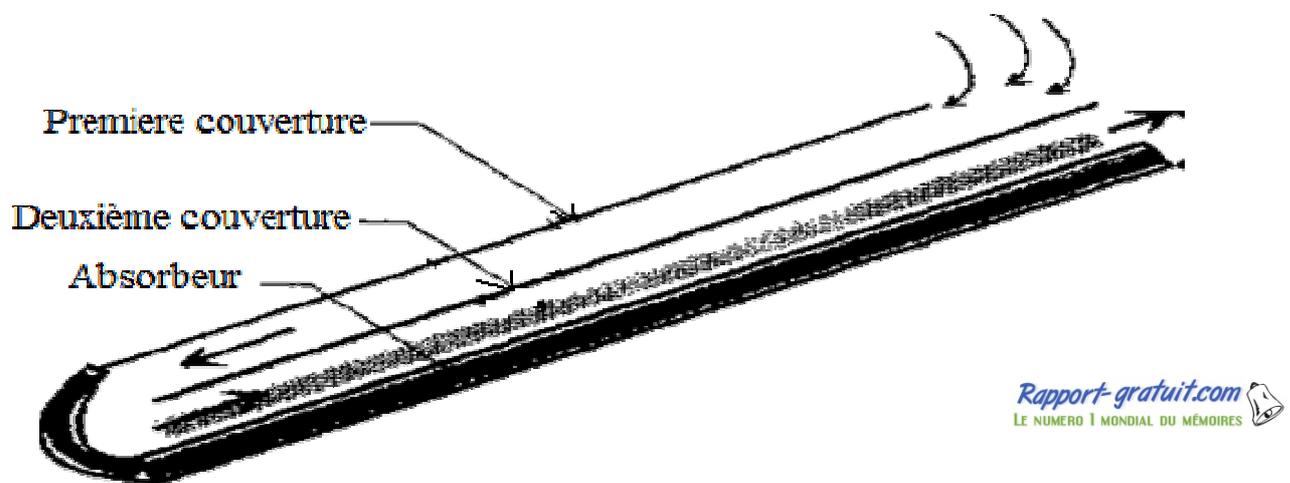


Figure (I.3) : Schéma d'un capteur solaire basé sur le préchauffage de l'air [3].

Mohamad a fait une comparaison avec un capteur solaire conventionnel avec des couvertures simple et double couvertures. Cette étude a montré que l'efficacité du capteur conseillé est élevée comparée aux capteurs conventionnels et qu'elle peut excéder 75%.

A. Benkhelifa (1998) [04] a présenté un modèle mathématique pour étudier l'influence de quelques paramètres sur le coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur. Le modèle permet de calculer ces pertes thermiques. Il a trouvé que l'augmentation du coefficient de pertes thermiques dépend de l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur ainsi que sa température et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, mais, l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre diminue les pertes thermiques.

F. Moukhtari et D. Semmar (1999), [05] 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 ils permettent d'appuyer l'analyse théorique, ils valoriser son capteur solaire à air, et pour une éventuelle utilisation de son capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires.

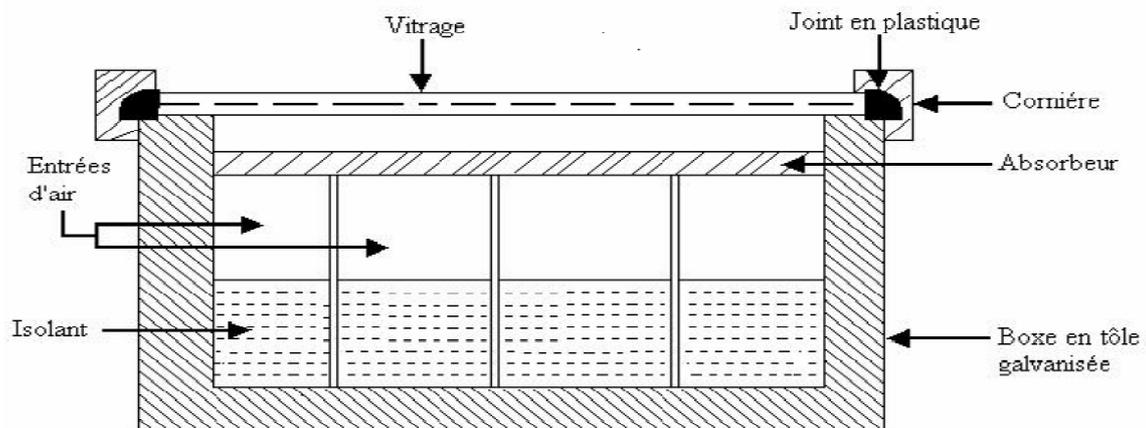


Figure (I.4) : Coupe transversale du capteur à air [5].

A partir des résultats trouvés, ils ont conclu que:

- La température de sortie du fluide varie en fonction du flux solaire.
- La 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 aideront à une éventuelle analyse théorique du système expérimental.

N.T. Ahmad (2001) [06] a étudié expérimentalement la minimisation des pertes de chaleur convective vers l'environnement d'un capteur utilisé dans le chauffage des serres.

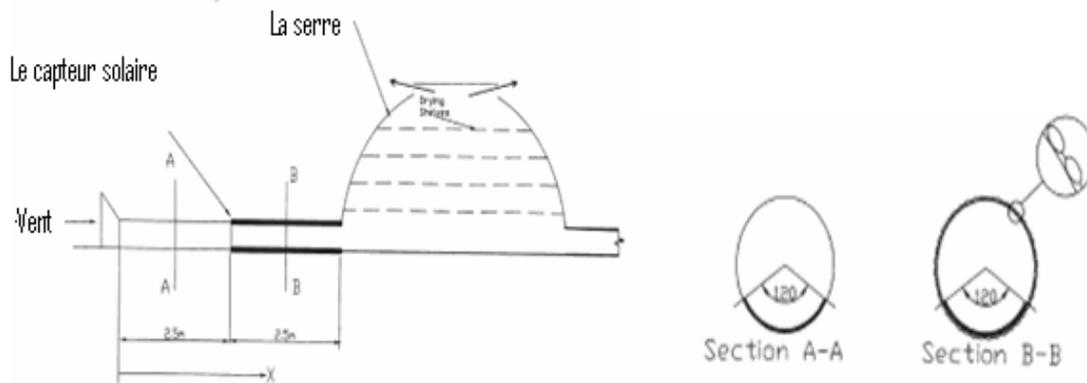


Figure (I.5) : Schéma du système [6].

Il a trouvé un gain considérable dans la température de l'air avec une différence de température qui tend vers 10 °C. Ce travail montre que l'isolation transparente (ici film de bulles d'air) améliore les performances de capteurs, alors c'est mieux d'utiliser cette isolation pour couvrir tout le capteur ou au moins sa partie inférieure, comme il a été fait dans ce travail.

A. Ahmed-Zaïd et al (2001), [07] 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 chicane (obstacles) pour améliorer le couple rendement-écart de température du capteur.

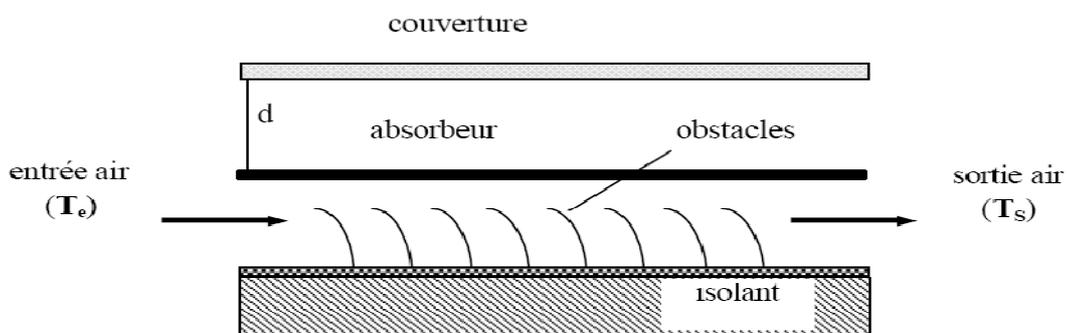


Figure (I.6) : Le capteur solaire plan à air avec des chicanes (obstacles) [7].

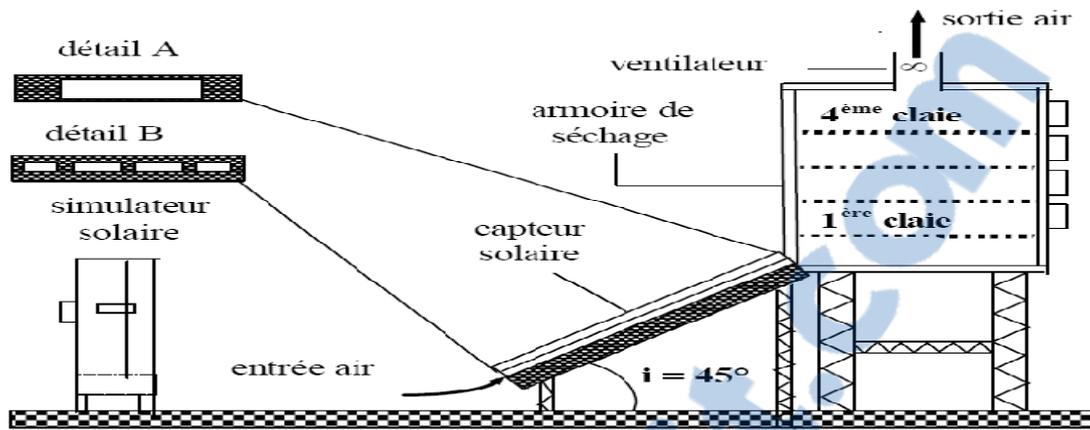


Figure (I.7) : Installation expérimentale [7].

Ce travail a montré que l'utilisation des chicanes dans la veine dynamique d'un capteur solaire plan demeure un moyen efficace pour l'amélioration de ses performances. Les résultats présentés montrent l'amélioration tenue par l'utilisation des obstacles TL et DCL. Néanmoins, 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.

Ahmet Kürklü et al (2002), [08] ont étudié un nouveau type de capteur solaire. Ce capteur se compose de deux sections voisines, l'une remplie d'un matériau à changement de phase, et l'autre par de l'eau.

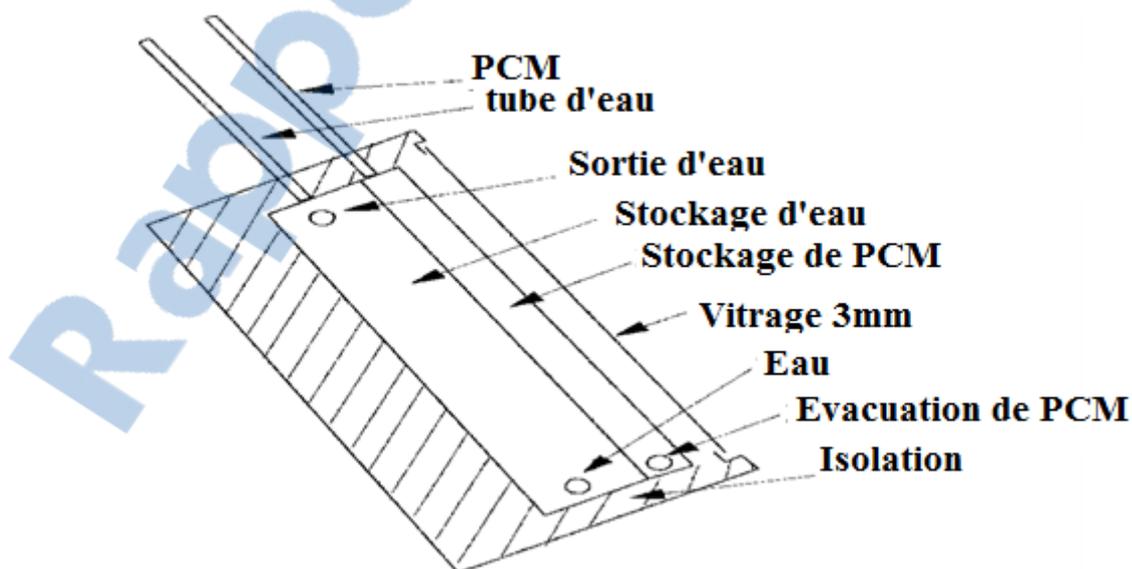


Figure (I.8) : Le schéma du capteur solaire thermique menu d'un matériau de changement de phase [8].

Le matériau à changement de phase fonctionne comme matériau de stockage d'énergie et comme isolant. Ils ont noté l'amélioration du rendement thermique du capteur, puisque les résultats de l'étude ont montré que la température de l'eau a excédé 55°C pendant un jour typique de rayonnement solaire élevé. L'eau a été gardée plus de 30°C pendant toute la nuit.

A. Abene et al (2004), [09] ont étudié un capteur solaire avec utilisation des différents obstacles et application pour le séchage du raisin. Ils ont trouvé que l'introduction des obstacles dans le canal d'air est un facteur très important pour l'amélioration des performances du capteur. Ils ont montré aussi que les dimensions, la forme et l'orientation de ces obstacles influent considérablement sur l'efficacité du capteur solaire.

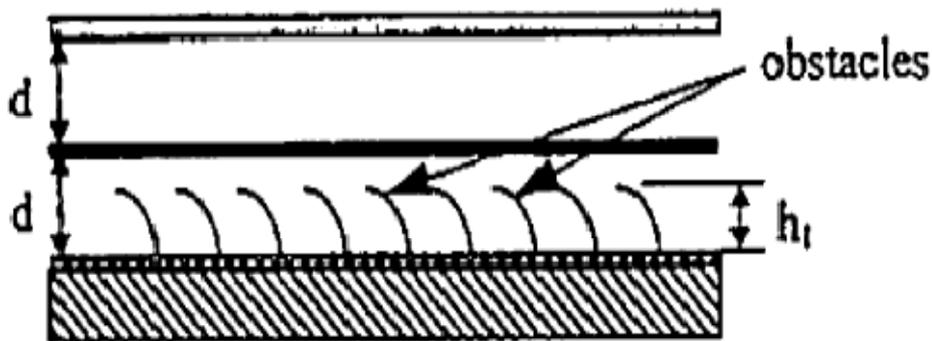


Figure (I.9) : capteur solaire avec des obstacles [9].

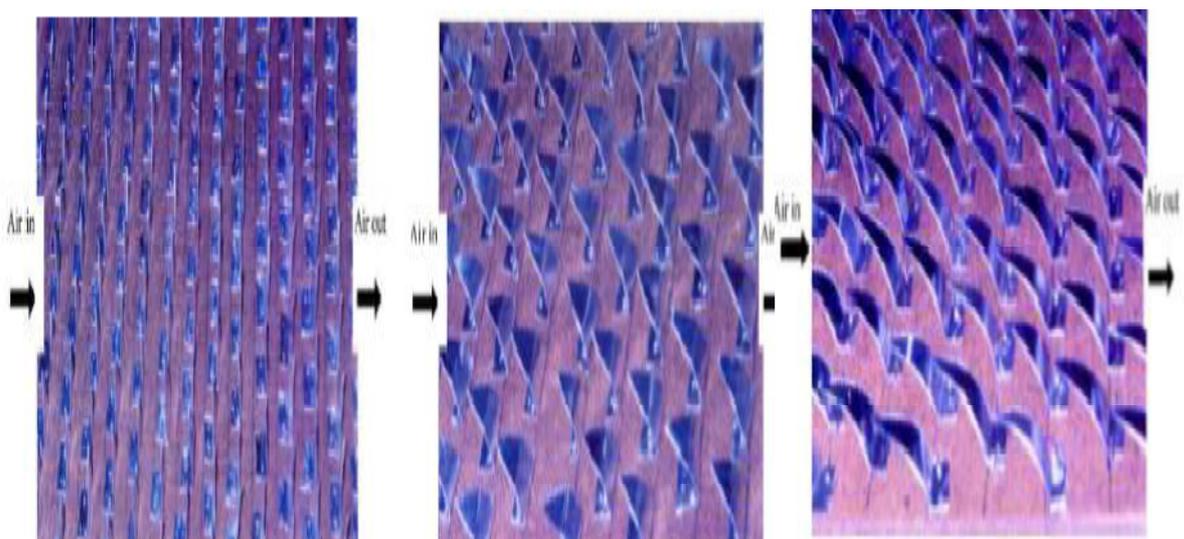


Figure (I.10) : Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur [9].

M.N. Bargach et al (2004), [10] ont fait une étude expérimentale comparative entre deux systèmes solaires, utilisés pour le chauffage des serres agricole.

- Le premier système est basé sur le stockage de l'énergie solaire, par la circulation de l'eau dans des collecteurs solaires plans, placés près de la serre chaude couverte en polyéthylène.

- Le second système est basé sur l'absorption sélective de l'énergie solaire par un fluide caloporteur (ici bleu de méthylène), circulant dans un capteur alvéolaire plan fait de polyéthylène transparent et placé dans la serre chaude couverte en verre.

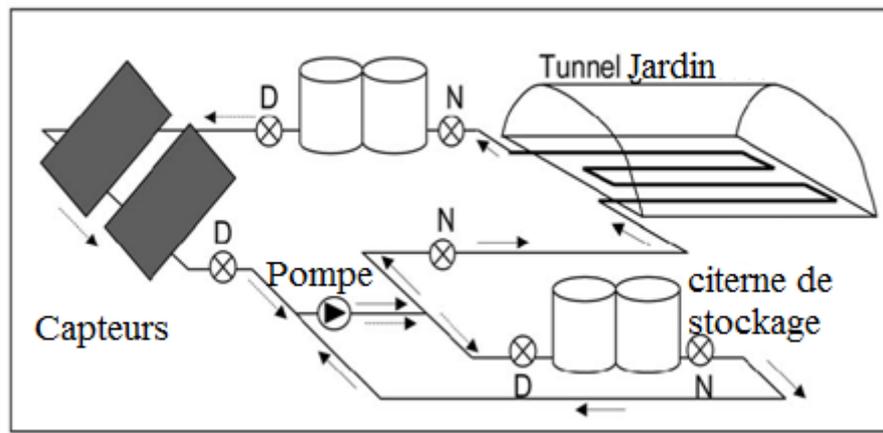


Figure (I.11) : Schéma du système de chauffage utilisé des capteurs solaires plans [10].

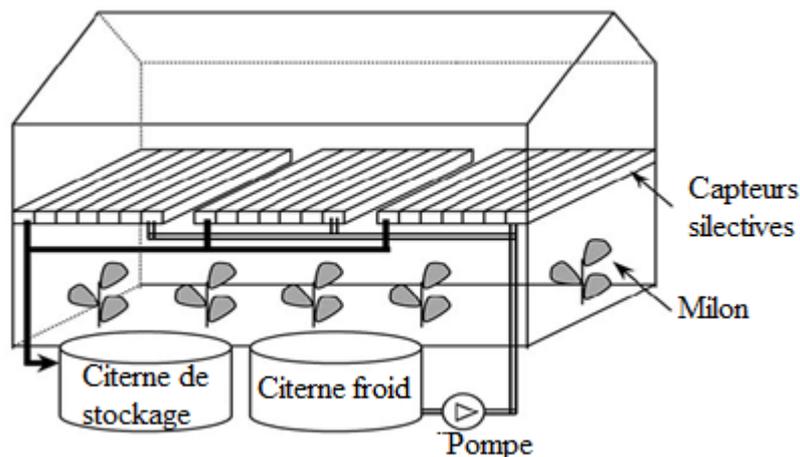


Figure (I.12) : Serre agricole chauffée par les collecteurs sélectifs [10].

La comparaison de la performance des deux systèmes montre que:

L'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance de ces capteurs. Le premier système améliore le rendement de 49 %, son installation est facile et son utilisation pour chauffer une serre de vraies grandeurs a été déjà examinée avec le succès et le deuxième système améliore le rendement de 40 %, ils ont enregistré que pour les régions du climat modéré, il est intéressant d'utiliser le premier système, mais où le climat est plus rugueux, c'est mieux d'utilisé le second système.

L'utilisation de l'eau comme un fluide de transfert de chaleur dans le premier système présente l'inconvénient d'être très corrosif. L'utilisation de la solution de bleu de méthylène comme un fluide de transfert de chaleur dans le capteur sélectif présent l'inconvénient de la perte de ses propriétés spectrales sous l'effet de la radiation solaire et devient moins sélective avec le temps.

N. Moumni et al (2004), [11] 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 de transfert.

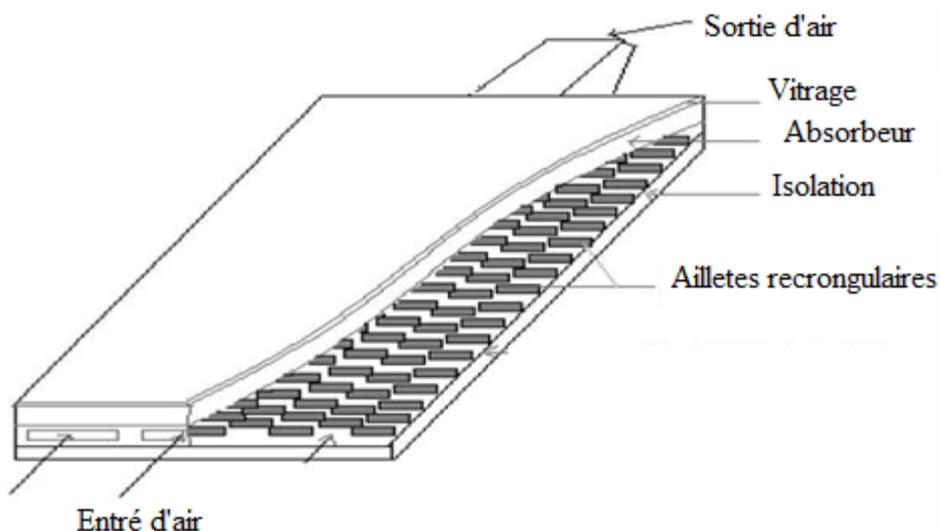


Figure (I.13) : Schéma représentatif des obstacles rectangulaires perpendiculaires à l'écoulement [11].

Avec la comparaison de ce type de capteur avec un autre sans plaques, utilisant deux types d'absorbteurs, sélectif et non sélectif, ils ont trouvé que la sélectivité de l'absorbteur ne présente pas une remarquable amélioration en présence des plaques rectangulaires, comme ils ont proposer une approche approximative du coefficient du transfert convectif dans le canal d'air.

S. Youcef-Ali (2005) [12], 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'absorbteur. L'étude compare aussi expérimentalement le cas d'un capteur à doubles couvertures à celui d'un capteur à triples couvertures.

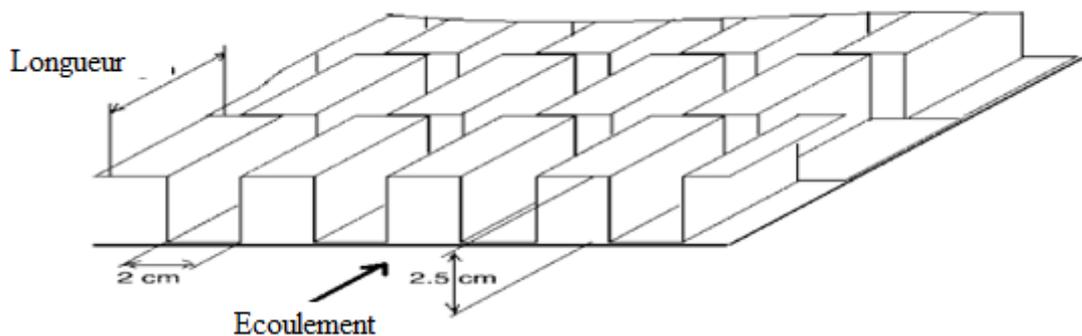


Figure (I.14) : Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbteur [12].

Il a trouvé que la couverture triple réduire davantage les pertes de chaleur vers l'avant et donne des performances thermiques plus importantes que celles à doubles couverture. Il a montré aussi que les obstacles ajoutées peuvent réduire les pertes en diminuant la température de l'absorbteur et aussi augmentent le transfert thermique entre l'absorbteur et l'air ce qui réduit ses pertes vers l'extérieur, et par conséquent un rendement supérieur à celui d'un capteur avec un absorbteur plat et simple grâce à l'obtention des quantités de chaleur plus élevées.

Turhan Koyuncu (2006), [13] a étudié expérimentalement six différents types de capteurs solaires plans, pour voir l'influence de passage de l'air, le nombre des vitres, et la forme de l'absorbteur sur leur efficacité. Les modèles des capteurs étudiés sont:

- Modèle 1: La vitre est en plastique, l'absorbteur est noir et plat, d'avant passe.
- Modèle 2: La vitre est en plastique, et l'absorbteur noir est une plaque de zigzag, d'avant passe.
- Modèle 3: La vitre est simple et en plastique, l'absorbteur est noir et plat, et l'air passe entre l'absorbteur et la couverture, d'avant passe.

- Modèle 4: La vitre est simple et en plastique, l'absorbeur est une plaque plane, d'arrière passe.
- Modèle 5: une simple vitre en plastique, l'absorbeur noir est une plaque de zigzag, d'arrière passe.
- Modèle 6 : Double couverture en plastique, l'absorbeur est une plaque plane noire, d'arrière passe.

Turhan a trouvé les rendements de ces capteurs respectivement 45.88%, 44.23%, 42.11%, 23.39%, 39.05% et 36.94%. Les résultats de cette étude ont montré que le capteur du modèle 1 (vitre en plastique, l'absorbeur noir et plat, d'avant passe) est le plus efficace, et celui du modèle 6 est le moins efficace. Alors il a conclu que le nombre de vitres et la méthode de passage de l'air influent considérablement sur l'efficacité du capteur, par contre l'influence de la forme de la surface absorbante est moins.

Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007), [14] ont étudié l'influence de l'angle d'inclinaison et de l'orientation avec l'horizontal d'un capteur solaire sur le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur, ils ont trouvé que la meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud.

Marwa M. Hassan et Yvan Beliveau (2007), [15] ont développé un nouveau capteur solaire intégré au toit pour l'atteindre à l'efficacité d'énergie, l'intégration utilitaire, la fiabilité, et la flexibilité.

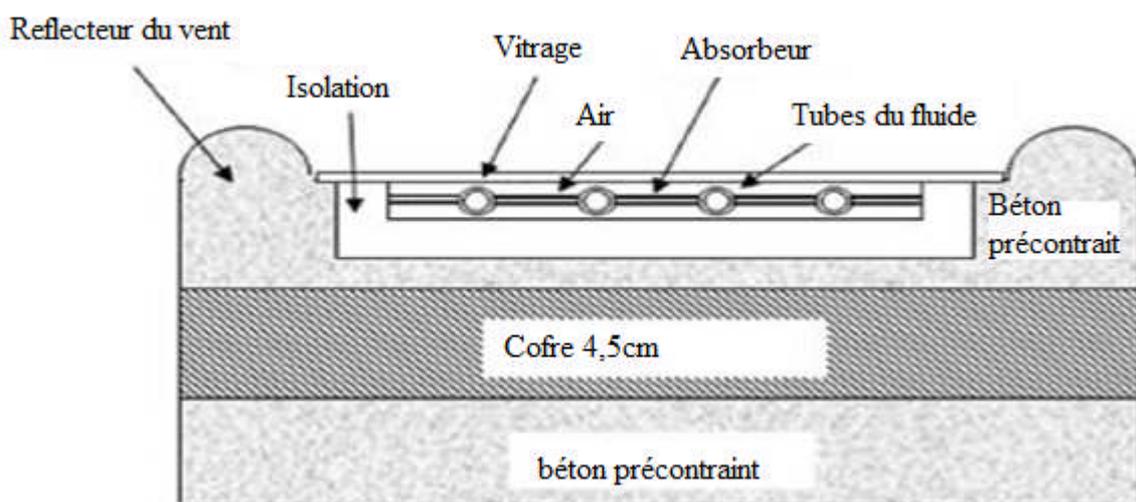


Figure (I.15) : Une coupe transversale qui représente un nouveau capteur solaire intégré au toit [15].

Ils ont développé des modèles des éléments finis tridimensionnels dans les quels les modes de transfert thermiques couplés pour évaluer les performances thermiques de ce capteur.

Les résultats obtenues montre que :

- Les variations saisonnés exposent le capteur solaire à des gains extrêmes pendant l'été, et des pertes considérables en hiver, et que les pertes ont lieu au dessous d'une intensité solaire de 150 W/m².
- La température maximale de ce panneau pendant l'été était 111 °C et en hiver 59 °C.
- La température du liquide augment avec la décroissance du débit massique, mais ce dernier décroît les gains globaux de la chaleur. Au dessus d'un débit de 0.06 m³/h. les résultats du model montre aussi que le débit massique optimal était 0.0005-0.005 m³/h pendant l'hiver et 0.1 m³/h pendant l'été.

Fayza Ben Yelles et al (2007), [16] et pour réduire les pertes thermiques par l'avant du capteur, ont proposé une nouvelle conception qui utilise l'aérogel de silice (matériaux poreux de faible conductivité thermique) comme un isolant placé au dessus de l'absorbeur.



Figure (I.16) : Conception des capteurs à aérogel de silice [16].

Avec la comparaison de ce nouveau capteur avec les autres capteurs plans, avec ou sans absorbeur sélectif. Le coefficient de pertes par conduction et par rayonnement à travers l'isolant et le coefficient de pertes globales du nouveau dispositif ont été estimés. A partir de la comparaison faite, ils ont trouvé que l'aérogel est un super isolant de la face avant du capteur solaire plan.

S. Oudjedi et al, (2008). [17] ont fait une étude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné pour le séchage. Ont montré que, en régime presque stationnaire, les équations de bilan thermique des composants du capteur écoulent dans une équation différentielle ordinaire de premier ordre. La solution de cette équation différentielle est écrite sous la forme d'une expression explicite de la température locale du fluide caloporteur en fonction du flux solaire variable dans le temps. Ils ont étudié aussi l'influence de divers paramètres comme, la température d'entrée du fluide, la vitesse du fluide et la hauteur du canal d'écoulement d'air sur les efficacités thermiques du capteur solaire à air.

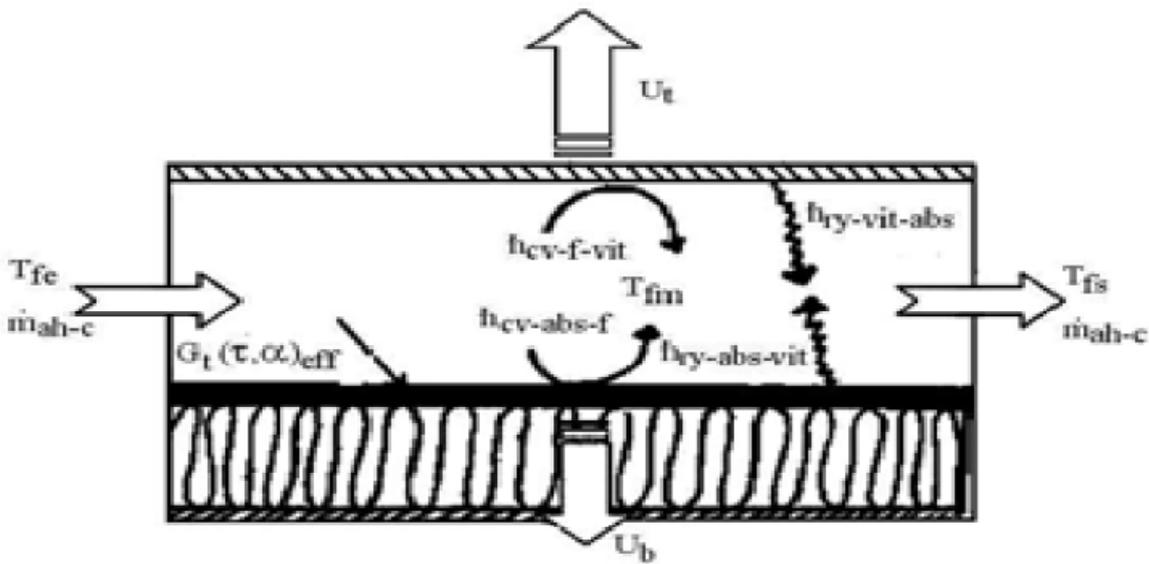


Figure (I.17) : Vue schématique du capteur solaire à air [17].

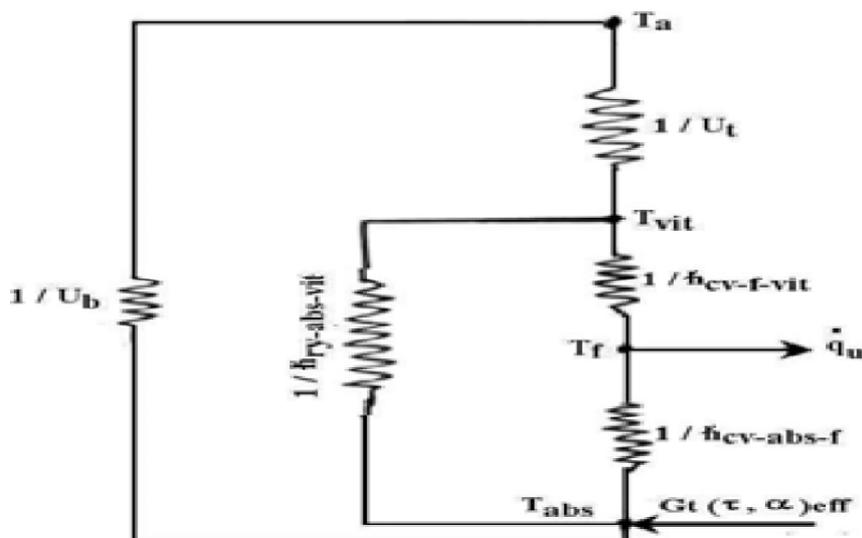


Figure (I.18) : Schéma électrique de l'isolateur (méthode globale) [17].

Ils ont montré que :

- la température de sortie du fluide caloporteur n'augmente pas de manière significative avec l'augmentation de sa température d'entrée.
- le rendement thermique journalier de l'isolateur décroît linéairement avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide.
- le rendement thermique journalier du capteur solaire à air croît rapidement avec l'augmentant de la vitesse de l'air.

O. Turgut, N. Onur (2009), [18] ont étudié expérimentalement et numériquement la détermination des coefficients thermiques moyens pour une convection forcée au dessus de la surface d'un capteur solaire. Les simulations numériques ont été obtenues par le code Fluent, et l'étude expérimentale a été effectuée par l'utilisation du transfert de chaleur. Les coefficients de transfert de masse ont été convertis en coefficients de transfert thermique par une analogie entre ces deux processus. Les résultats expérimentaux sont comparés avec les résultats numériques. Ils ont observé que les deux résultats sont harmonieux entre eux, dans cette étude, des nouvelles corrélations ont été présentées pour le nombre de Nusselt avec une erreur de 12 %.

A.Labed et al (2009), [19] ont faite une étude théorique et expérimentale sur les performances d'un capteur solaire plan à air menu d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, ils ont proposé un modèle de rugosités artificielles placées dans la veine d'air mobile pour créer un écoulement turbulent entre l'absorbeur et la plaque inférieure.

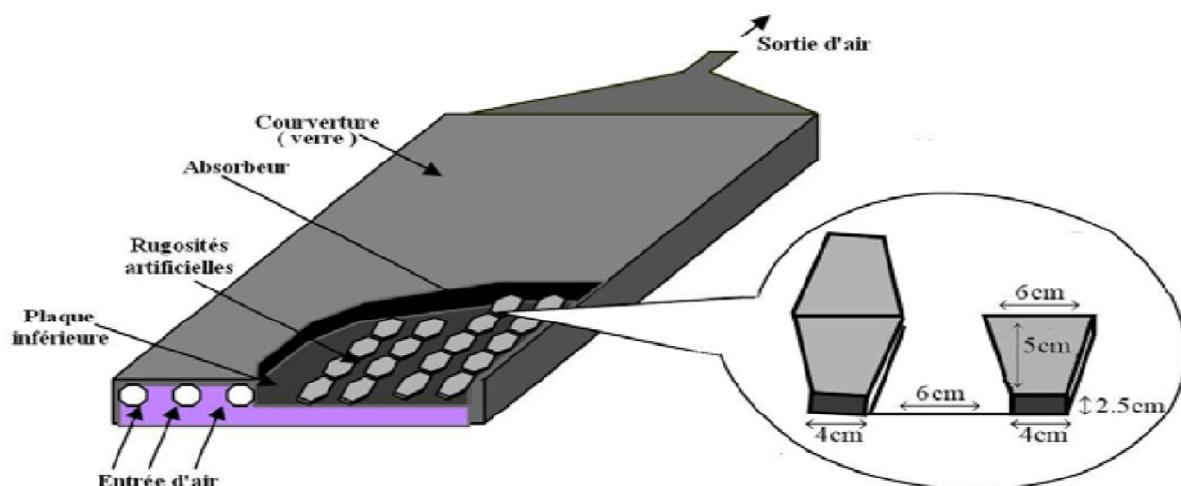


Figure (I.19) : Schéma du modèle expérimental [19].

Ils ont trouvé que la présence de ce type des chicanes augmente l'échange thermique. Toutefois il est certain que ces chicanes créent des pertes de charge par comparaison à un canal lisse.

I.3 Recherche réalisées sur les capteurs solaires à double passe

A. Zerrouki et al, [20] ont modélisé les pertes thermiques dans un capteur solaire à air à deux passes. Ils ont étudié le cas où le capteur est dans un état tel que les conditions de BLISS sont respectées. Un bilan thermique a été établi respectivement sur la couverture transparente, l'absorbeur puis l'isolation thermique arrière.

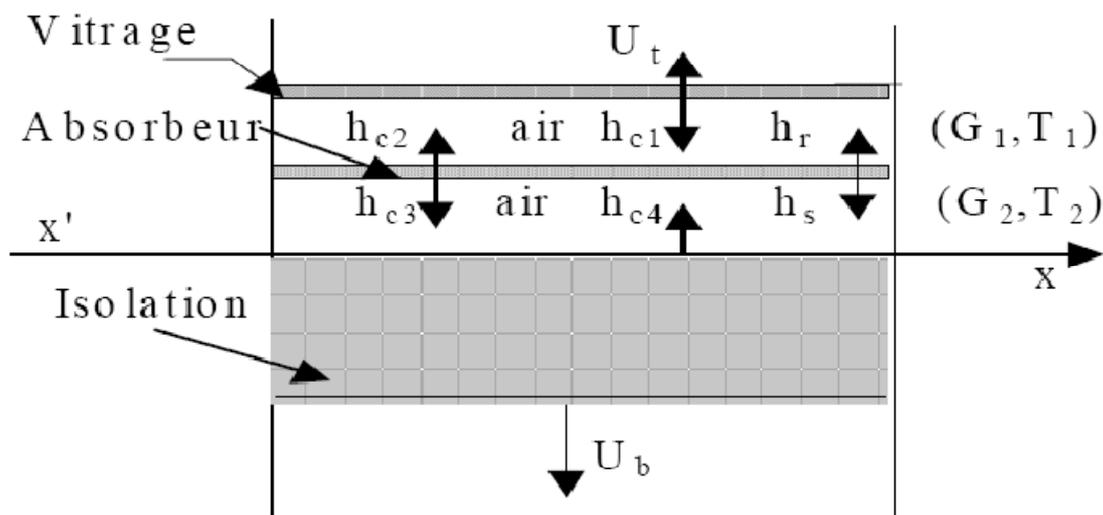


Figure (I.20) : Schéma d'un élément du capteur [20].

Dans cette étude, ils ont présenté une solution mathématique exacte de ce modèle, et fourni les expressions exactes du coefficient de conductance thermique et la conductance totale d'un capteur solaire à deux passes en régime permanent. La comparaison des résultats avec ceux obtenus avec l'analyse de Bliss - Whillier sont satisfaisants.

K. Sopian et al (1999) [21], ont présenté une étude expérimentale du rendement thermique d'un capteur solaire à doubles passes sans et avec milieu poreux placé dans le deuxième canal.

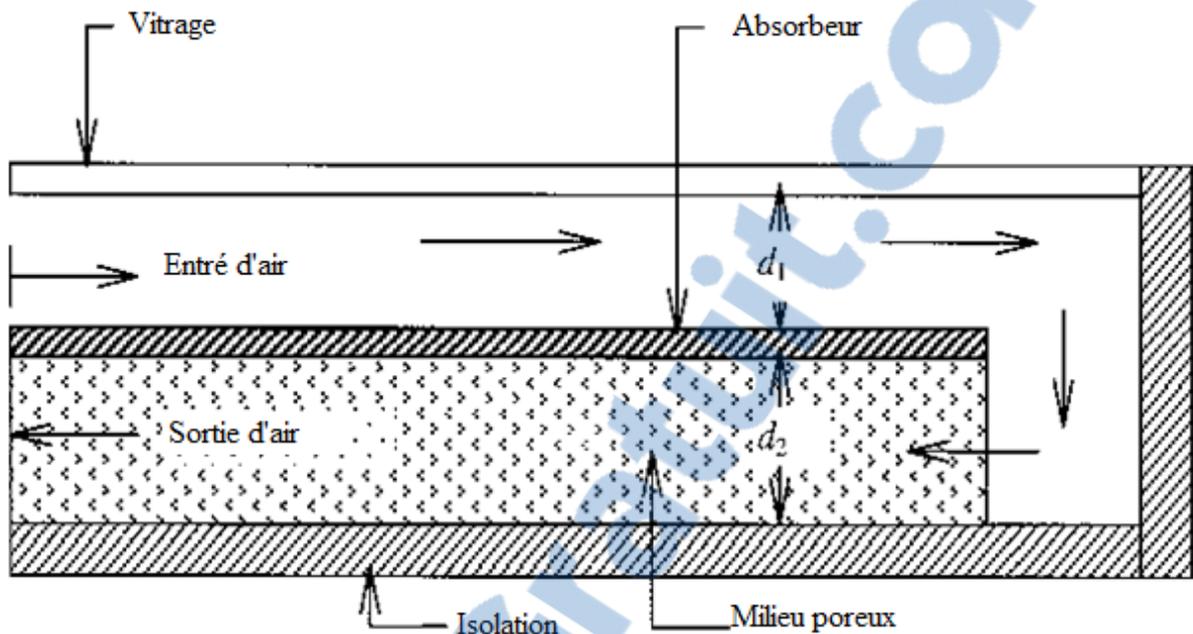


Figure (I.21) : Le schéma d'un capteur solaire thermique à double passe avec des milieux poreux dans le deuxième canal [21].

Ils ont étudié l'effet du changement de la profondeur du canal supérieure et inférieure avec et sans milieu poreux sur le rendement thermique, ainsi que les effets du débit d'air, et de rayonnement solaire. Ils ont trouvé que, la présence du milieu poreux augmente la surface de transfert thermique d'où l'augmentation de la température de sortie, et que le capteur solaire à double passes a des performances thermiques plus élevées que celles à seule passe. Le rendement thermique d'un capteur solaire à double passes avec un milieu poreux est de l'environ de 60-70 %, c'est-à-dire 20-70 % plus haut que le capteur sans milieu poreux.

Elradi A. Musa et al (2004), [22] ont étudié l'analyse du transfert de chaleur du capteur solaire à double passe avec milieu poreux. Pour augmenter le transfert de chaleur des différents milieux poreux ordonné avec différents porosités. Le capteur a été développé et testé à l'intérieur par la variation des caractéristiques et les conditions de fonctionnements par l'utilisation d'un simulateur allogène-lampe comme source de radiation.

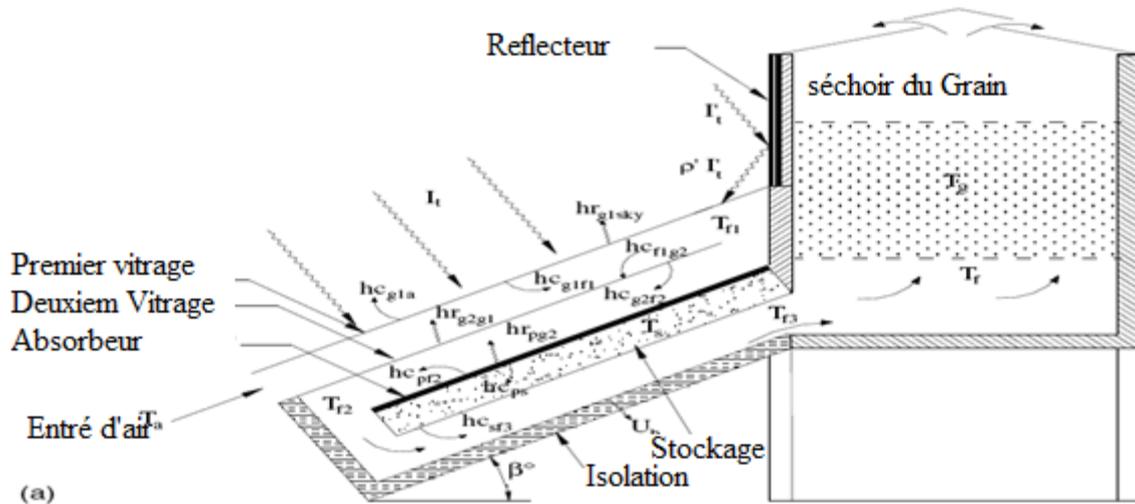


Figure (I.23) : Capteur solaire à multi passes incliner [23].

Mohd. Yusof Hj. Othman et al (2005) [24], ont analysé les performances d'un capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe avec concentrateur parabolique composé (CPC) et des ailettes. La combinaison du PV/T avec des réflecteurs concentrant a un potentiel pour augmenter la production du capteur dans la région de la cellule solaire. Le prototype capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe avec CPC et ailettes a été fabriqué, et son performance sur une gamme des conditions de fonctionnement a été étudié. L'absorbeur du capteur consiste en une collection des cellules solaires pour générer l'électricité, et les concentrateurs paraboliques composés (CPC) pour augmenter l'intensité de la radiation qui tombe sur les cellules solaires et sur les ailettes attaché au côté derrière de la plaque absorbant pour améliorer le transfert de chaleur avec l'air coulant. Les deux performances, thermique et électrique ont été présentées et discutés.

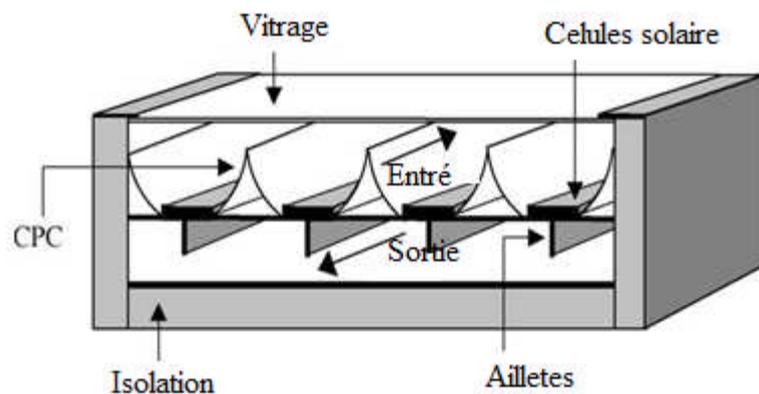


Figure (24) : Le modèle schématique de capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe avec (CPC) et ailettes [24].

Les résultats obtenus montrent que la production de l'électricité dans un module hybride PV/T diminue avec l'augmentation de la température de l'air coulé. Cela implique que la température de l'air devrait être gardée bas la plus possible. L'usage simultanée du PV/T hybride, CPC et ailettes a une potentielle d'augmenter la production du capteur et réduise le coût d'électricité photovoltaïque.

X.Q. Zhai et al (2004), [25] ont comparé deux types des capteurs solaires de toiture (RSCs), le simple passage RSC, et le double passe LRC. Le double passage de toit solaire peut être utilisé plus efficacement pour le chauffage en hiver, et pour la ventilation naturelle dans les autres saisons. Pour évaluer les effets des deux RSC à la fois pour chauffage et la ventilation naturelle, une seule maison chinois de style traditionnel, sur lequel les deux RSC ont été montés respectivement.

Par comparaison, ils ont remarqué que l'efficacité instantanée pour le capteur à double passage LRC est plus élevée que celle du capteur à seule passe par 10% en moyenne, et que le débit massique de l'air en ventilation naturel contribué pour le RSC à double passage peut être amélioré dans une large mesure pour la plupart des cas. Le double passage RSC est donc plus puissance pour l'amélioration de l'environnement thermique intérieur et les économies d'énergie des bâtiments.

Paisarn Naphon (2005), [26] a étudié numériquement l'effet d'un milieu poreux sur la performance d'un capteur solaire à air à double passe avec plaque chauffante. Les modèles mathématiques décrivent les caractéristiques de transfert de chaleur sont dérivées à partir des équations de conservation de l'énergie. L'effet de la conductivité thermique des milieux poreux sur les caractéristiques de transfert de chaleur et sur les performances est prend en considération.

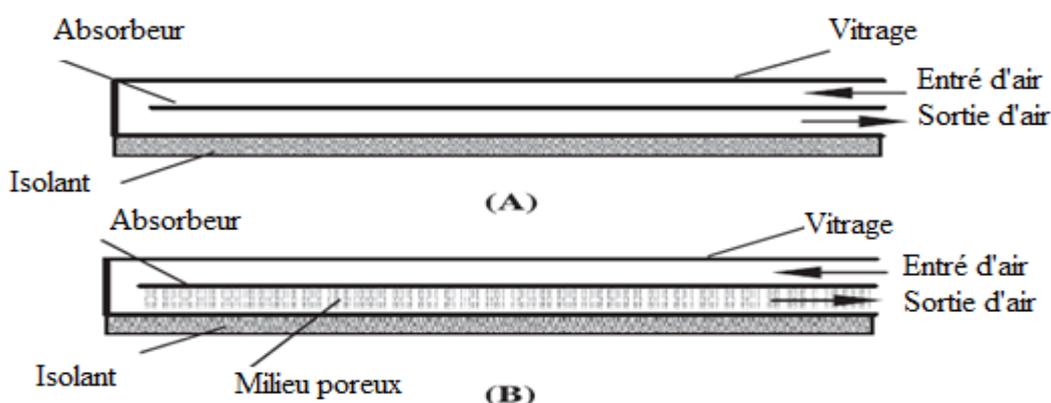


Figure (I.25) : Schéma d'un capteur solaire avec (B) et sans milieu poreux (A) [26].

A partir de son étude, il a trouvé que le capteur solaire avec le milieu poreux est donné une efficacité thermique de 25.9% plus que sans milieu poreux. La conductivité thermique du milieu poreux a l'effet considérable sur la performance thermique du capteur solaire. Son modèle a été validé par la comparaison avec les données expérimentales du Sopian et al avec un moyen d'erreur de 18.4% et 4.3% pour capteur solaire avec et sans milieu poreux, respectivement.

Paisarn Naphon (2005). [27] a étudié numériquement la performance et la génération de l'entropie dans un capteur solaire à air double passe avec ailettes longitudinales. Les modèles mathématiques décrivent les caractéristiques du transfert de chaleur du double passage de l'air sont dérivée à partir des équations de conservation de l'énergie. Les prévisions sont faites pour un débit massique d'air compris entre 0,02 et 0,1 kg/s. Les effets de l'état d'entrée de fluide et la dimension de l'ailette sur les caractéristiques du transfert de chaleur ont été étudiés. La performance et la génération de l'entropie sont prises en compte.

Mohd. Yusof Othman et al (2007). [28] Ont étudié les performances d'un capteur solaire photovoltaïque-thermique (PV/T) à double passe lequel produit simultanément l'électricité et l'énergie thermique. Le système hybride photovoltaïque-thermique consiste des cellules monocristallines du silicium ont été collé à une plaque absorbant avec des ailettes attachées à l'autre coté de la surface de l'absorbant. L'air est donc coulé à travers le canal supérieur et après sous la plaque absorbant ou le canal inférieur du capteur. Seulement une petite partie de la radiation solaire absorbée est convertie en électricité, pendant que le reste augmente la température des cellules. Les améliorations à l'efficacité totale du système peuvent être accomplies par l'usage d'un système du collecteur à double passe.

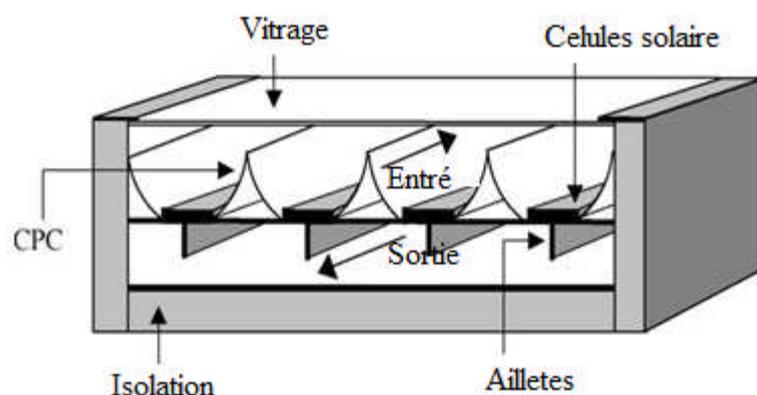


Figure (26) : Le modèle schématique d'un capteur solaire photovoltaïque-thermique à double passe [28].

Ils ont trouvé qu'il est très important d'utiliser des ailettes comme une partie intégrante de la surface de l'absorbeur pour accomplir des efficacités significatives pour la production simultanément, thermique et électrique du collecteur solaire (PV/T) hybride.

M.R.I. Ramadan et al (2007). [29] ont fait une étude expérimentale et théorique sur la performance thermique d'un capteur solaire à air à double passe et double vitrage avec un lit garni au-dessus de la plaque absorbante. Des calculs numériques ont été effectués pour des jours d'été typiques de l'année 2003 pour étudier l'effet des différents paramètres de fonctionnement et de configuration sur les performances thermiques. Ils ont étudié l'effet du débit massique d'air, la masse et la porosité du matériau sur l'efficacité du capteur. Ils ont déduit que pour augmenter la température de l'air à la sortie après le coucher du soleil, il est conseillé d'utiliser les matériaux à garnissage avec faible porosité.

C. Lertsatitthanakorn et al (2008) [30], 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.

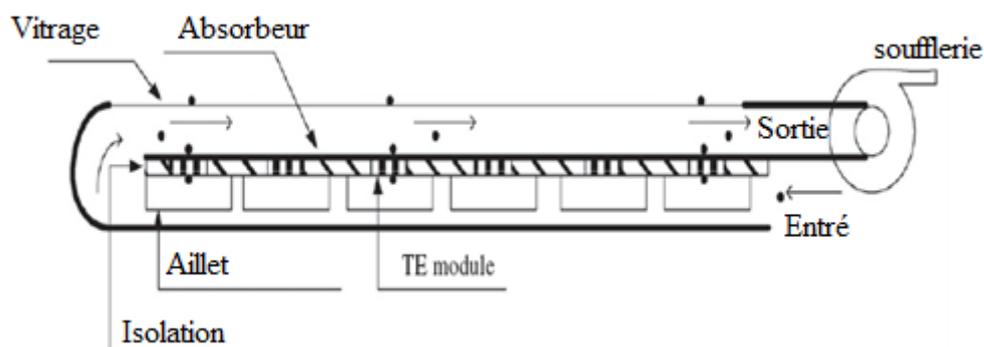


Figure (27) : Diagramme schématique du capteur solaire TE [30].

Les résultats montrent que l'efficacité thermique augmente avec l'augmentation du débit massique. Entre-temps le rendement de la puissance électrique et l'efficacité de la conversion dépend de la différence de la température entre le côté chaud et froid des modules TE. De plus le capteur solaire TE proposé est prévu pour contribuer aux plus larges applications des systèmes hybride TE dû à l'efficacité totale augmentée.

C.D. Ho et al, (2009). [31] ont présenté une étude expérimentale et théorique d'un dispositif dans lequel ont introduits une plaque absorbant pour diviser le canal en deux parties avec des ailettes attachées par des chicanes. Ils ont comparé les résultats expérimentaux et théoriques avec les données d'un capteur solaire à une seule passe d'air sans recyclage. Une amélioration considérable du transfert de chaleur est obtenue avec l'addition des chicanes et des ailettes. Les influences du taux de recyclage et de l'emplacement de l'absorbeur sur l'efficacité de transfert thermique sont également discutées.

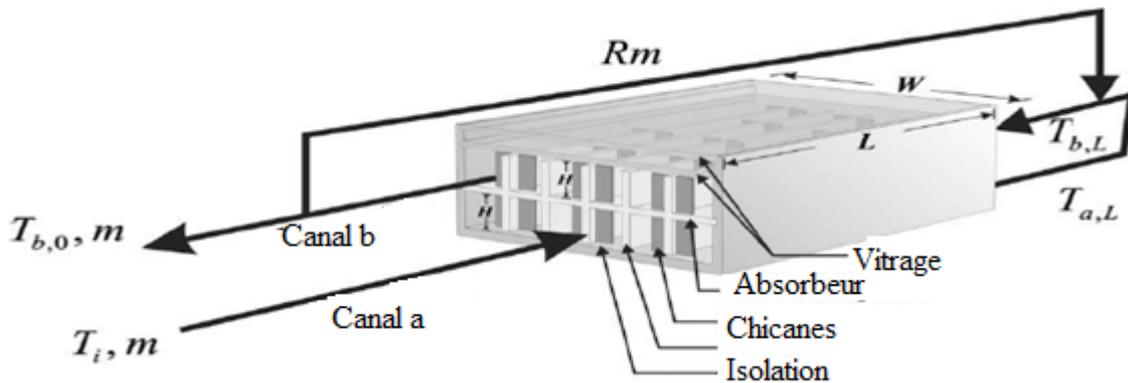


Figure (I.28) : Capteur solaire avec des ailettes interne et recyclage externe [31].

Ahmad Fudholi et al [32], ont fait une étude expérimentale sur l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes placées dans le second canal. L'expérience a été amenée par le changement des paramètres qu'ils ont une influence sur l'efficacité thermique du capteur solaire. L'efficacité thermique a été examinée par le changement du débit massique et de l'intensité de la radiation solaire.

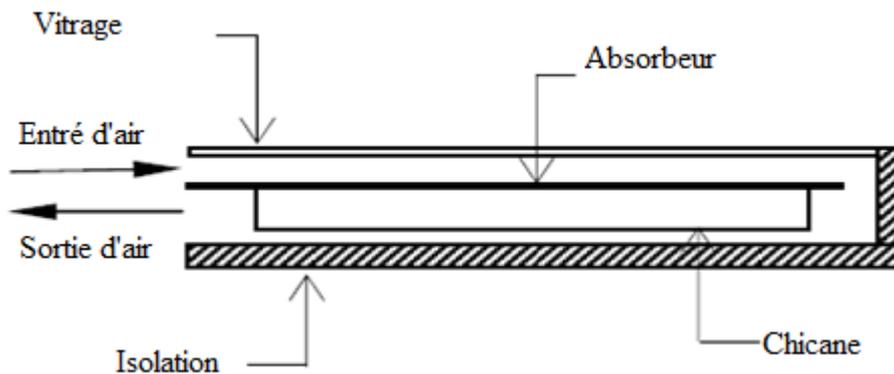


Figure (I.29) : Capteur solaire à air à double passe avec des ailettes placées dans le deuxième canal [32].

Les résultats de cette étude montrent premièrement que le capteur solaire à air à double passe avec des ailettes a une efficacité plus que 75% pour un débit massique de 0.072% et radiation solaire de 788w/m², et que l'absorbeur avec des ailettes est plus efficace que celui sans ailettes. Deuxièmement, l'efficacité du capteur solaire est dépend du débit massique et de la radiation solaire. Pour une radiation solaire varie entre 423W/m² est 788W/m², l'augmentation de l'efficacité est atteinte 20-30%. Pour un débit massique varie entre 0.04 est 0.083kg/s, l'augmentation de l'efficacité est atteinte 35-50%.

K. Sopian et al (2009), [33] 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 déférents porosité pour augmenté le transfert de chaleur. Ils ont étudiés les effets du débit massique et de la radiation solaire sur l'efficacité thermique du capteur solaire à double passe.

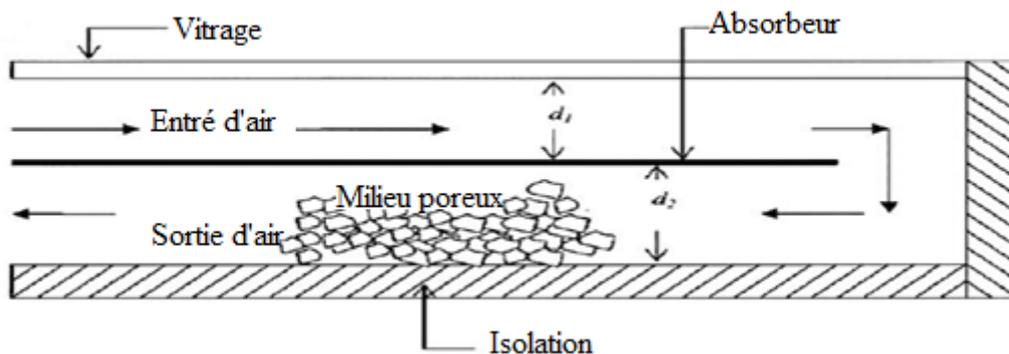


Figure (I.30) : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux [33].

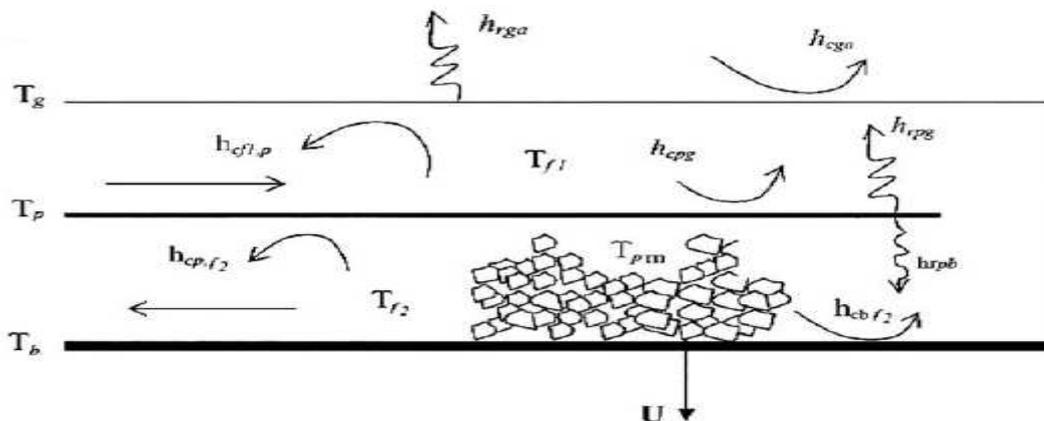


Figure (I.31) : Schéma des coefficients de transfert de chaleur dans le capteur solaire à double passe avec milieu poreux [33].

Ils ont trouvé que l'addition du milieu poreux dans le deuxième canal du capteur solaire à double passe augment la performance thermique du capteur et augmente la surface de transfert de chaleur. L'efficacité thermique du capteur solaire à double passe avec milieu poreux est atteinte 60-70%.

Ahmad Fudholi et al, [34] 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.

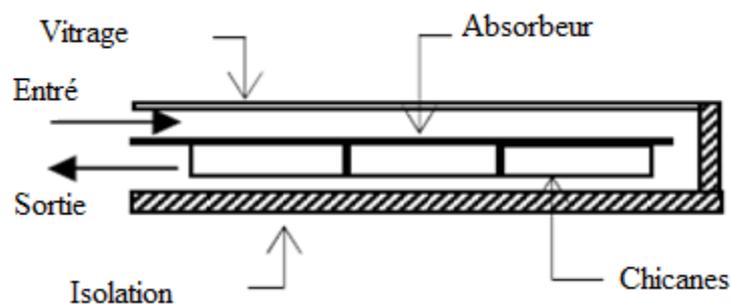


Figure (I.32) : Schéma d'un capteur solaire à air à double passage avec des ailettes placées dans le second canal [34].

Ils ont trouvé que l'efficacité thermique du capteur solaire est dépend du débit massique, et qu'elle augment avec l'augmentation de la radiation solaire. L'efficacité optimale se trouver entre les débits 0.07 et 0.08kg/s, avec une valeur de 70%.

A.P. Omojaro et al (2010), [35] ont étudié expérimentalement les performances thermiques des capteurs solaires à air à simple et à double passage avec des ailettes attachées. Ils ont étudié aussi l'effet de débit massique sur l'efficacité thermique et la température de sortie.

Les résultats obtenus montrent que l'efficacité thermique augmente avec l'augmentation du débit massique (entre 0,012 et 0,038 kg/s). Pour le même débit, ils ont trouvé que l'efficacité du capteur à double passe est plus élevée que celle du capteur à un seul passe. Pour un débit massique de 0,038 kg/s, l'efficacité maximale obtenue pour le capteur à seul passe est de 59.62%, et elle atteinte 63.74% pour le capteur à double passe. L'augmentation du débit massique va diminuer la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire.

B.M. Ramani et al (2010) [36] ont étudié la performance d'un capteur solaire à air à double passe avec et sans matière poreuse. Ils ont présenté une analyse expérimentale et théorique de ce capteur. L'influence des différents paramètres sur la performance thermique a été discutée. La comparaison entre les résultats montre que l'efficacité thermique du capteur solaire à air à double passe avec matière absorbante poreuse est plus élevée que celle du capteur solaire à air à double passe sans matière absorbante poreuse.

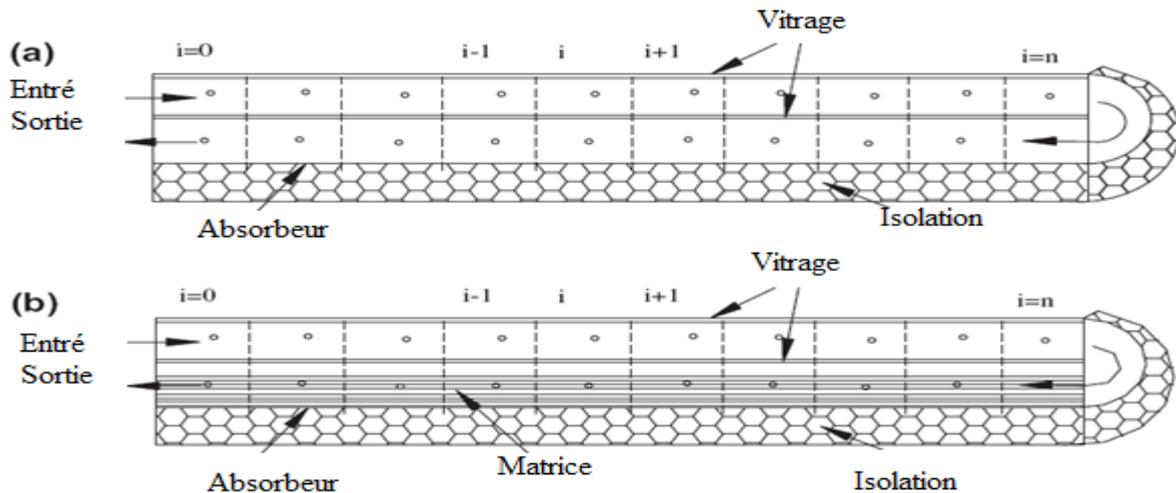


Figure (I.33) : Arrangement double passe : (a) sans matière poreuse, (b) avec matière poreuse [36].

Ils ont conclu que :

- L'addition d'une matière poreuse dans le second canal du capteur solaire à air à double passe est très importante pour améliorer la performance thermique.
- La performance thermique du capteur solaire à air à double passe avec matière poreuse est plus élevée que celle du capteur solaire à air à double passe sans matière poreuse.

Rakesh Kumar et Marc A. Rosen (2011) [37], 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'entrées de l'air sont évalués dans l'efficacité thermique et électrique.

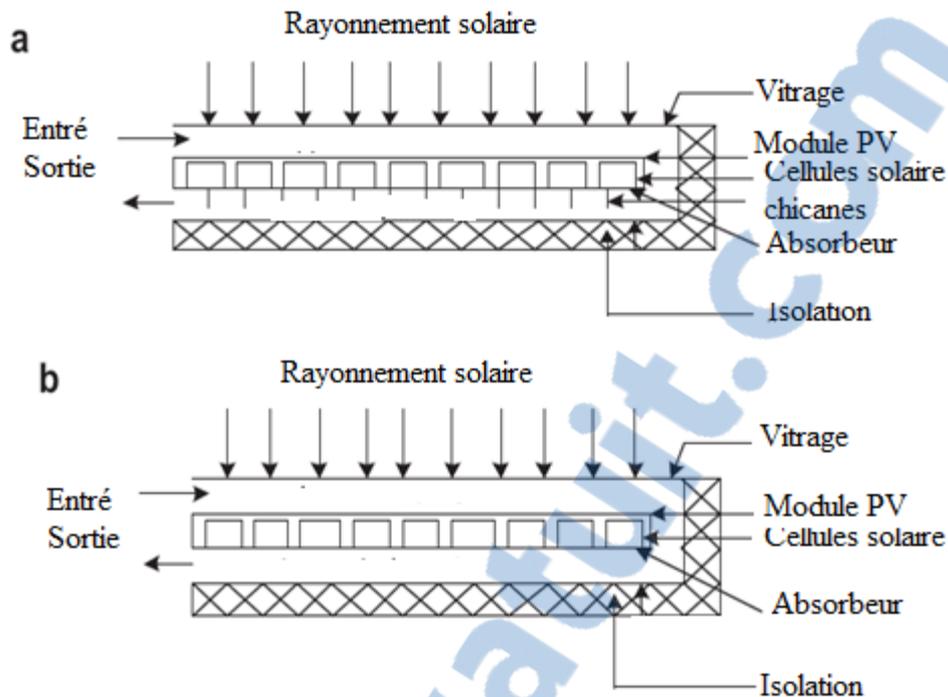


Figure (I.34) : Capteur solaire PV/T à double passe : (a) avec ailettes, (b) sans ailettes [37].

Ils ont conclu que la présence des ailettes dans le canal inférieur augmente la surface de transfert de chaleur et améliore l'efficacité thermique et électrique. L'efficacité thermique augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'irradiation solaire et la température de l'entrée de l'air. L'efficacité électrique est affectée par la température de cellule qui dépend de l'irradiation solaire, la température de l'entrée de l'air et le débit massique. La profondeur des deux canaux du capteur solaire joue un rôle très important dans le transfert de chaleur.

Chii-Dong Ho et al (2011), [38] 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 absorbante dans la conduite d'air pour la diviser 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 forcée.

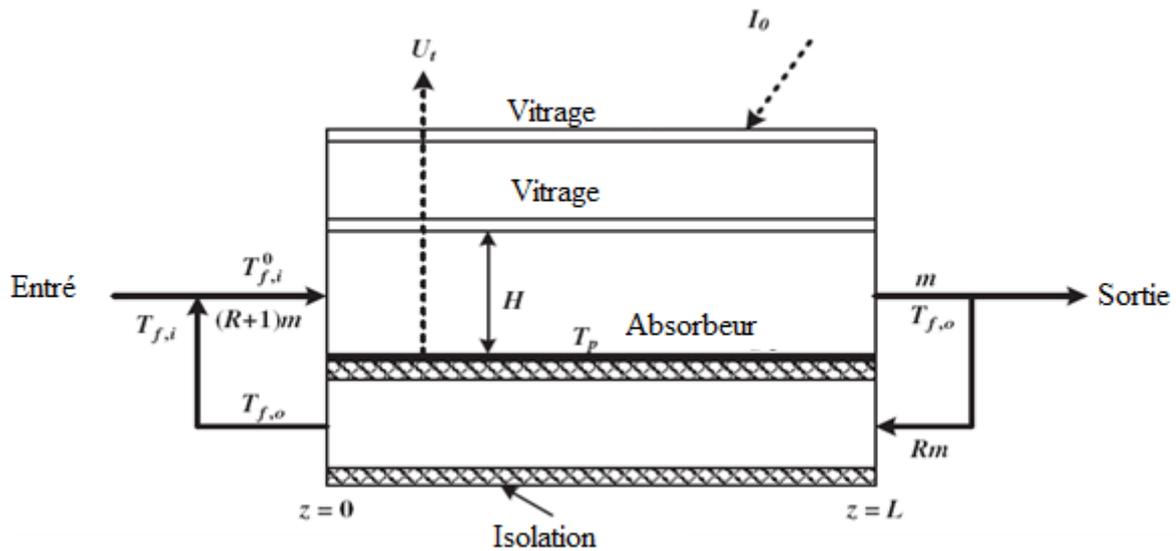


Figure (I.35) : Diagramme schématique d'un capteur solaire [38].

Ils ont remarqué que plus de 80% d'amélioration au niveau de l'efficacité du capteur est obtenue par l'utilisation de l'opération de recyclage.

Ahmad Fudholi et al (2011), [39] ont étudié l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec absorbeur à des ailettes longitudinales. L'étude implique une étude théorique pour vérifier l'effet du débit massique, le nombre et la hauteur des ailettes sur l'efficacité.

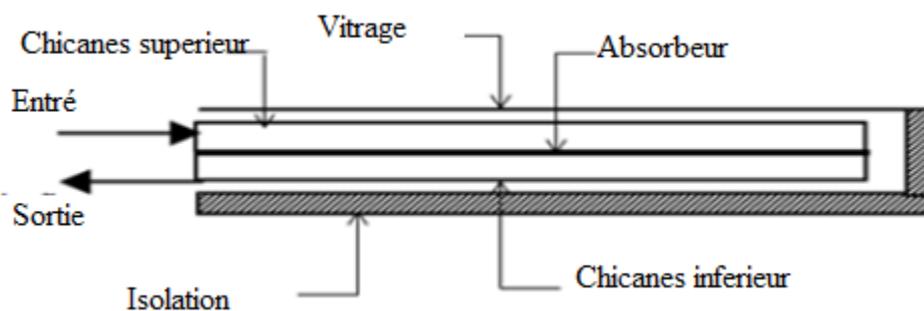


Figure (I.36) : Schéma du capteur solaire à double passe avec ailettes longitudinales longitudinal [39].

Ils ont trouvé que l'efficacité thermique du capteur solaire augmente avec l'augmentation du nombre et de la hauteur des ailettes, et qu'elle dépend fortement du débit massique.

A.A. El-Sebaï et al (2011) [40], ils ont investigué expérimentalement et théoriquement la performance thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes attachées à la plaque absorbante (DPFIPSAH), un model analytique a été présentée pour le capteur solaire. La comparaison entre la température de sortie de l'air a été mesurée et la température de la plaque absorbante a été présentée. Les résultats montrent que l'efficacité thermique du capteur solaire à double passe avec une plaque absorbante ondulé-v (DPVCPSAH) est plus élevée que celle du capteur solaire à double passe avec des ailettes attachées à la plaque absorbante.

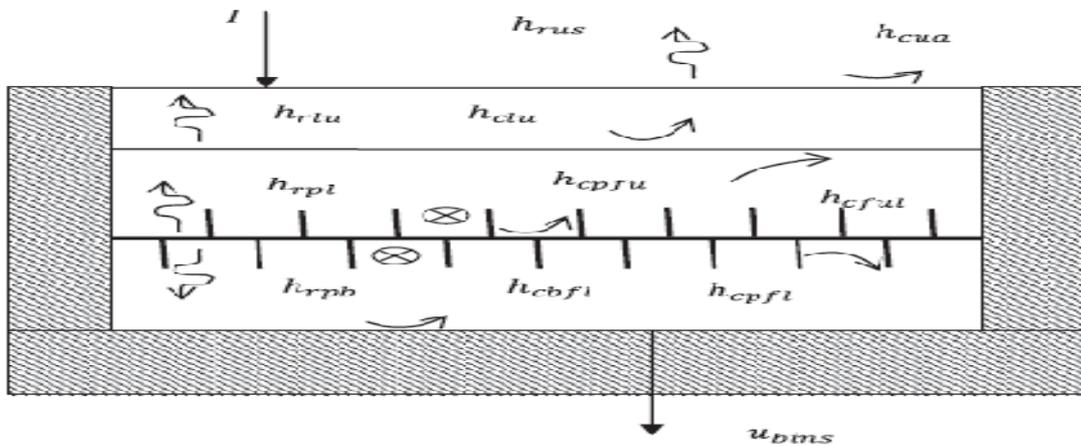


Figure (I.37) : Capteur solaire à air à double passe avec des ailettes attachées à la plaque absorbante (DPFIPSAH) [40].

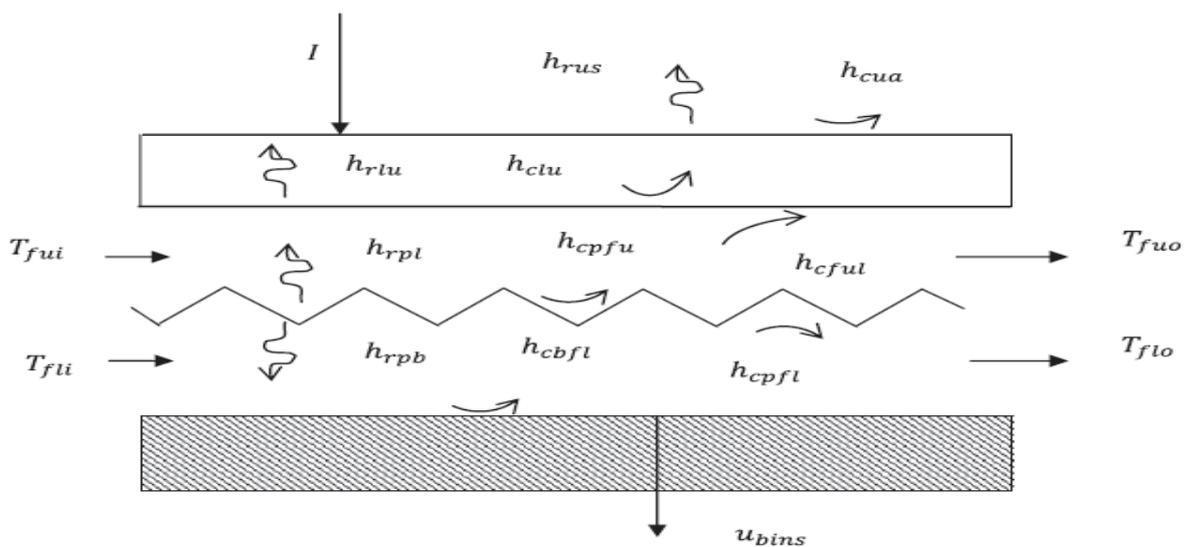


Figure (I.38) : Capteur solaire à double passe à une plaque absorbant ondulé-v (DPVCPSAH), [40].

A partir des résultats expérimentaux et théorétiques, ils ont trouvé que :

- La température du fluide à la sorti du DPVCPSAH est plus élevée que celle du DPFIPSAH.
- Le DPVCPSAH est plus efficace que le DPFIPSAH.
- L'efficacité thermique du DPVCPSAH et DPFIPSAH augment avec l'augmentation du débit massique jusqu'à une valeur typique de 0.04kg/s.
- L'efficacité thermohydrolique maximal du DPVCPSAH est plus élevée que DPFIPSAH.

Sunil Chamoli et al (2012) [41], ont fait une révision sur la performance d'un capteur solaire à air à double passe. Des études ont été réalisées dans le but de vérifier l'influence de plusieurs paramètres sur la performance d'un capteur solaire à air à double passe. Ils ont trouvé que le taux de recyclage, le débit massique de l'air et la porosité du matériau sont considérés comme les paramètres les plus importants qu'ils sont influents sur la performance du capteur solaire.

Prashant Kumar (2012) [42], a étudié l'effet du débit massique sur la performance thermique du capteur solaire à air à double passage. L'effet du débit massique total dans les conduites du capteur solaire a été montré pour être un paramètre dominant sur la détermination de l'efficacité thermique effective du capteur solaire. Il a trouvé que la performance thermique dans le système à contre courant est plus élevée que celle dans le système à co-courant. La comparaison entre les deux systèmes montre que l'efficacité thermique augmente avec l'augmentation du débit massique d'air.

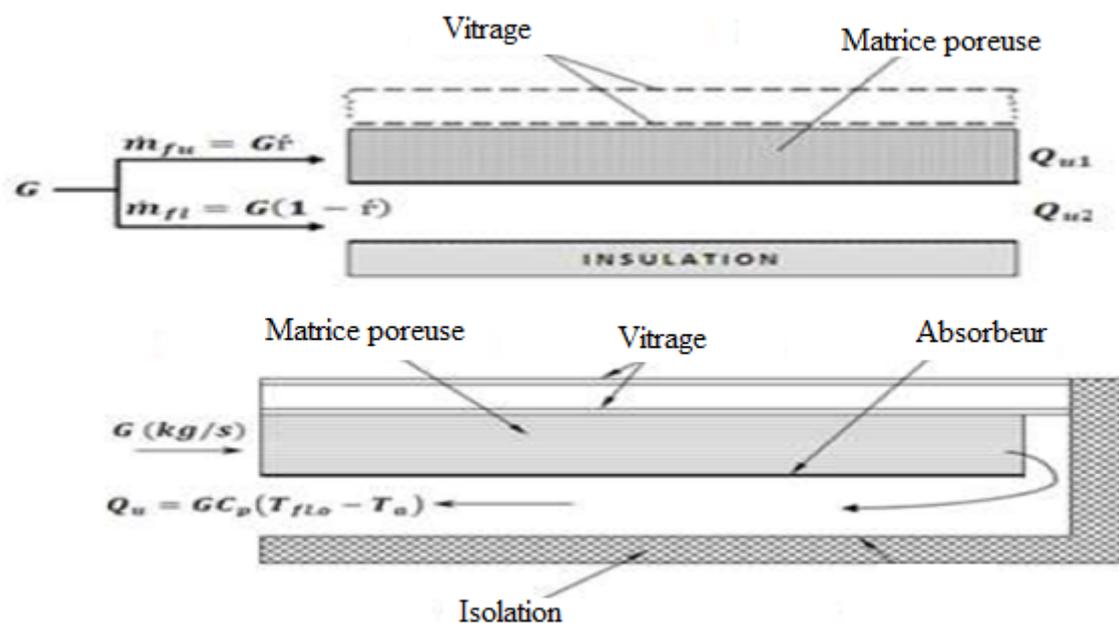


Figure (I.39) : Diagramme schématique du capteur solaire à double passe représenter le débit massique différentiel [42].

Chii-Dong Ho et al (2012), [43] ont fait des études expérimentales et théoriques sur la performance d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes et déflecteurs.

Les résultats expérimentaux s'écartent de 1,5 à 23% des prédictions théoriques. La comparaison entre la performance du capteur solaire avec différents modèles a été effectuée. Pour renforcer le coefficient de transfert de chaleur par convection et augmenter la zone de transfert de chaleur il faut utiliser le dispositif à double passage. Les résultats théoriques et expérimentaux montrent que le rendement du modèle du capteur solaire à double passage avec recyclage est beaucoup plus élevé que les autres modèles. L'utilisation des ailettes améliore l'efficacité thermique du capteur solaire.

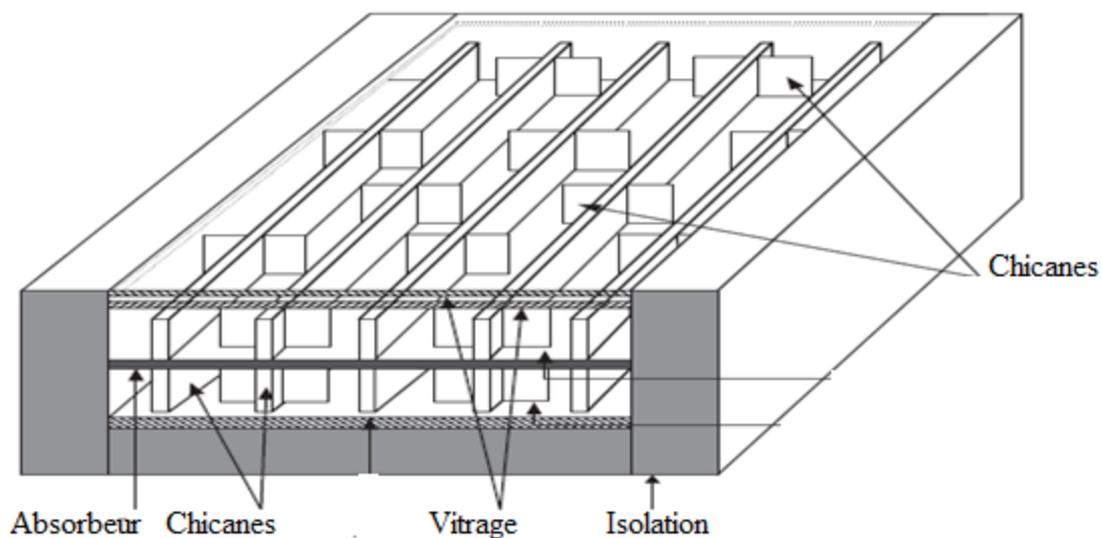


Figure (I.40) : Un dessin schématique d'un capteur solaire à air à double passe avec des ailettes plus confuses [43].

S.S. Krishnananth, et al (2012) [44], ont fait une étude expérimentale sur un capteur solaire à air à double passe avec intégration d'un système de stockage d'énergie thermique, ils ont utilisé la cire de paraffine comme un milieu de stockage thermique, le capteur solaire qui a intégré avec un système de stockage thermique a une grande efficacité que le capteur solaire sans système de stockage thermique. Ils ont fait une comparaison entre trois positions d'emplacement du matériel du stockage thermique. Ils ont conclu que la présence du milieu de stockage thermique dans la plaque absorbante est la meilleure configuration.

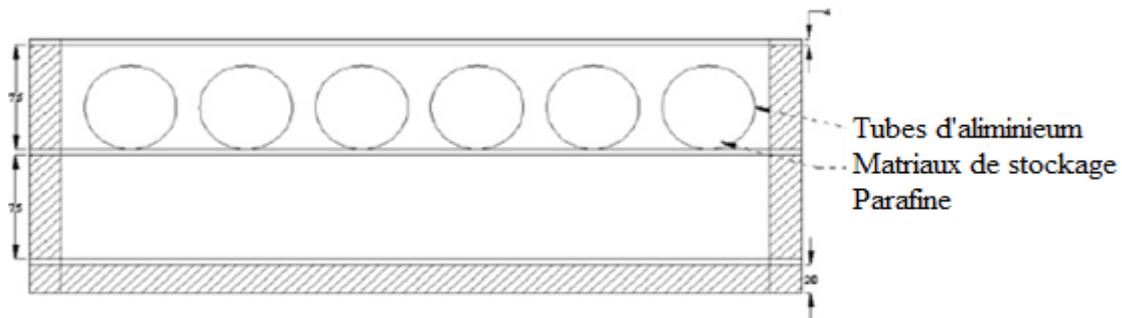


Figure (I.41) : Les capsules au-dessus de la plaque absorbante [44].

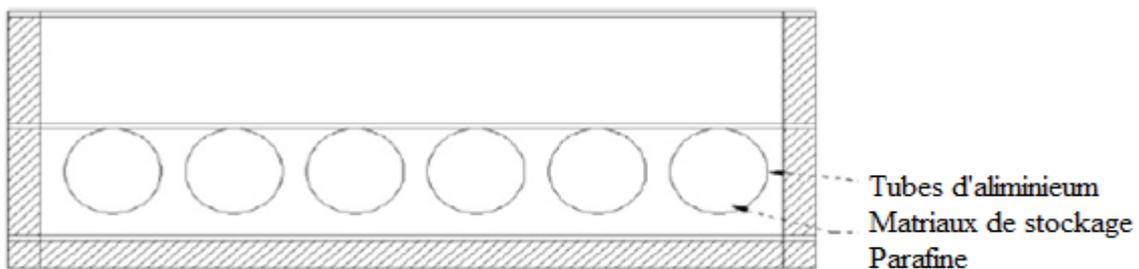


Figure (I.42) : Les capsules au-dessous de la plaque absorbante [44].

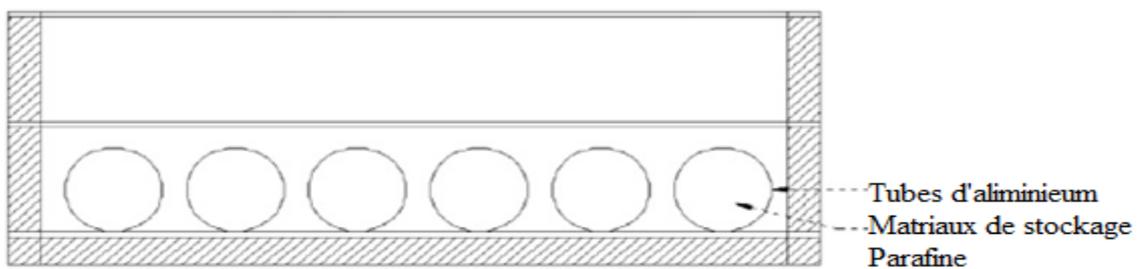
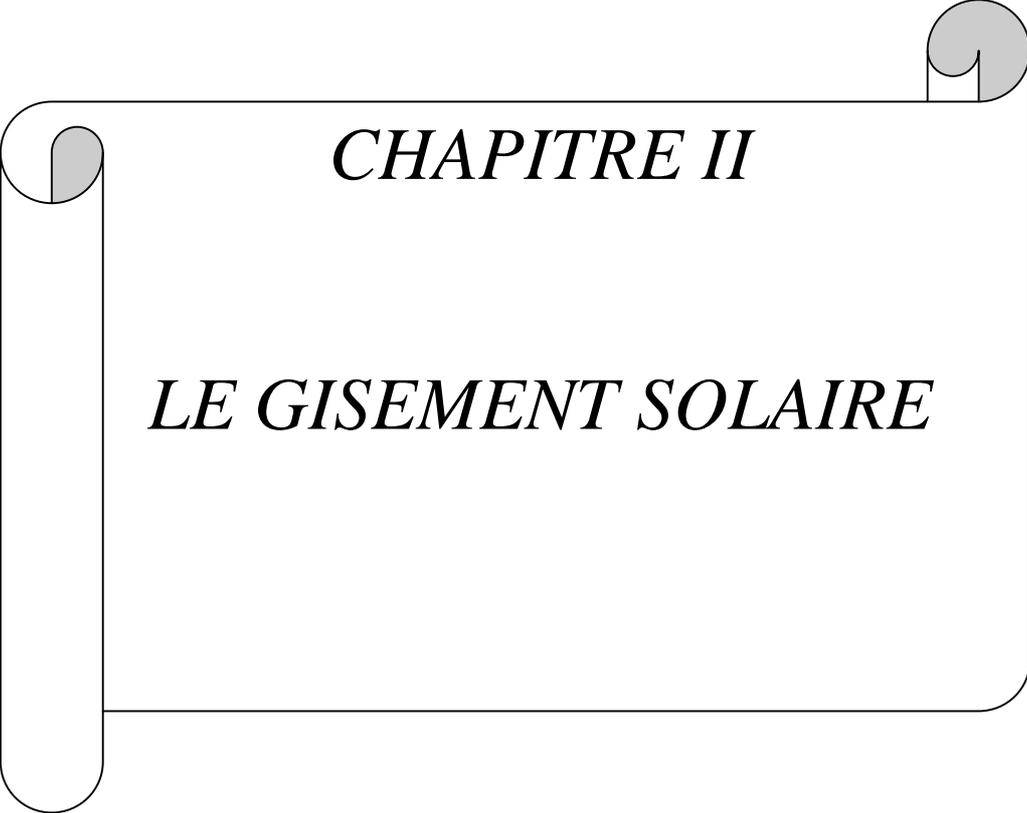


Figure (I.43) : Les capsules au-dessus de l'isolant [44].

A partir de résultats expérimentaux obtenus, ils ont trouvé que le capteur solaire avec la cire de paraffine est libéré une température d'air très élevée dans toute la journée, et que l'efficacité est plus élevée pendant les heures du soir. Le capteur solaire à doubles passe avec des capsules placés au-dessus de la plaque absorbant est le plus efficace.

I.4 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 de ces capteurs à partir de l'amélioration des différents paramètres influents sur leur efficacité thermique.



CHAPITRE II

LE GISEMENT SOLAIRE

II.1 Introduction

L'énergie solaire transmise par rayonnement rend possible la vie sur terre par apport d'énergie thermique et de lumière, permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. La polarisation naturelle de la lumière solaire, après diffusion ou réflexion, par la Lune ou par des matériaux tels que l'eau ou les cuticules végétales est utilisée par de nombreuses espèces pour s'orienter dans l'espace [46].

Le rayonnement solaire est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète. En effet, le bilan radiatif global de la terre est tel que la densité thermique à la surface de la terre est en moyenne à 99,97 % ou 99,98 % d'origine solaire. Comme pour tous les autres corps, ces flux thermiques sont continuellement émis dans l'espace, sous forme de rayonnement thermique infrarouge ; la terre restant ainsi en « équilibre dynamique ».

Dans ce chapitre, nous étudierons brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude et nous introduirons quelques données sur le gisement solaire en Algérie.

II.2 Le Soleil

Le mot « Soleil » provient du latin populaire *soliculus*, dérivé du latin classique *sol*, *solis* désignant l'astre et la divinité, mais aussi employé par métaphore en poésie pour « jour, journée » et par analogie aux sens de « plein jour », de « vie publique » et de « grand homme ». Ces différents sens se retrouvent dans de nombreuses périphrases qui le caractérisent : *l'œil du ciel*, *le maître des astres*, *l'âme du monde*, *le seigneur des étoiles*, *le père du jour*, *le fils aîné de la nature*, *le grand flambeau*, etc [45].

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

Environ $8,9 \times 10^{37}$ protons (noyaux d'hydrogène) sont convertis en hélium chaque seconde, libérant l'énergie à raison de 4,26 millions de tonnes de matière consommées par seconde, produisant (383×10^{24} joules) par seconde [47].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [48].



II.2.1 Les grandes dates

En 1543, Copernic présente son modèle d'Univers dans lequel le Soleil est au centre et les planètes tournent autour de lui. En 1610, Galilée observe les taches solaires avec son télescope. Peu de temps après, en 1644, Descartes énonce une théorie selon laquelle le Soleil est une étoile parmi bien d'autres. Entre 1645 et 1715, se trouve la période durant laquelle on observa peu de taches solaires, on appelle cette période « le minimum de Maunder » [45].

L'astronome français Pierre-Simon de Laplace énonce en 1796, l'hypothèse de la nébuleuse selon laquelle le Soleil et le Système solaire sont nés de l'effondrement gravitationnel d'un grand nuage de gaz diffus.

C'est en 1845 que la première image du Soleil fut prise, par les physiciens français Hippolyte Fizeau et Léon Foucault. La première relation entre l'activité solaire et géomagnétique eu lieu en 1852 (première observation 1859 par l'astronome amateur Richard Carrington).

L'observation de l'éclipse solaire totale de 1860 permet le premier enregistrement d'une éjection de masse coronale.

Au siècle dernier, en 1908, premier enregistrement des champs magnétiques des taches solaires par l'astronome américain George Ellery Hale. Onze ans après, en 1919, les lois de la polarité de Hale fournissent une preuve du cycle magnétique solaire. En 1942, première observation d'une émission d'ondes radio solaires.

En 1946, première observation de rayons ultraviolets (UV) solaires à l'aide d'une fusée sonde, et évaluation de la température de la couronne à 2 millions de °C, à l'aide des raies spectrales. La première observation des rayons X solaires à l'aide d'une fusée sonde date de 1949 [51].

En 1954 on s'aperçoit que l'intensité des rayons provenant du Soleil varie sur un cycle solaire de 11 ans. Observation massive de taches solaires en 1956. Première observation du vent solaire en 1963, par la sonde Mariner. 1973 et 1974, Skylab observe le Soleil et découvre les trous coronaires. En 1982 la première observation des neutrons d'une tache solaire par la sonde SMM (Solar Maximum Mission).

Et pour finir, en 1994 et 1995, Ulysse (sonde lancée par la navette Discovery en 1990) survole les régions polaires du Soleil [45].

II.2.2 Structure du Soleil

Le soleil n'est pas une sphère homogène on peut distinguer:

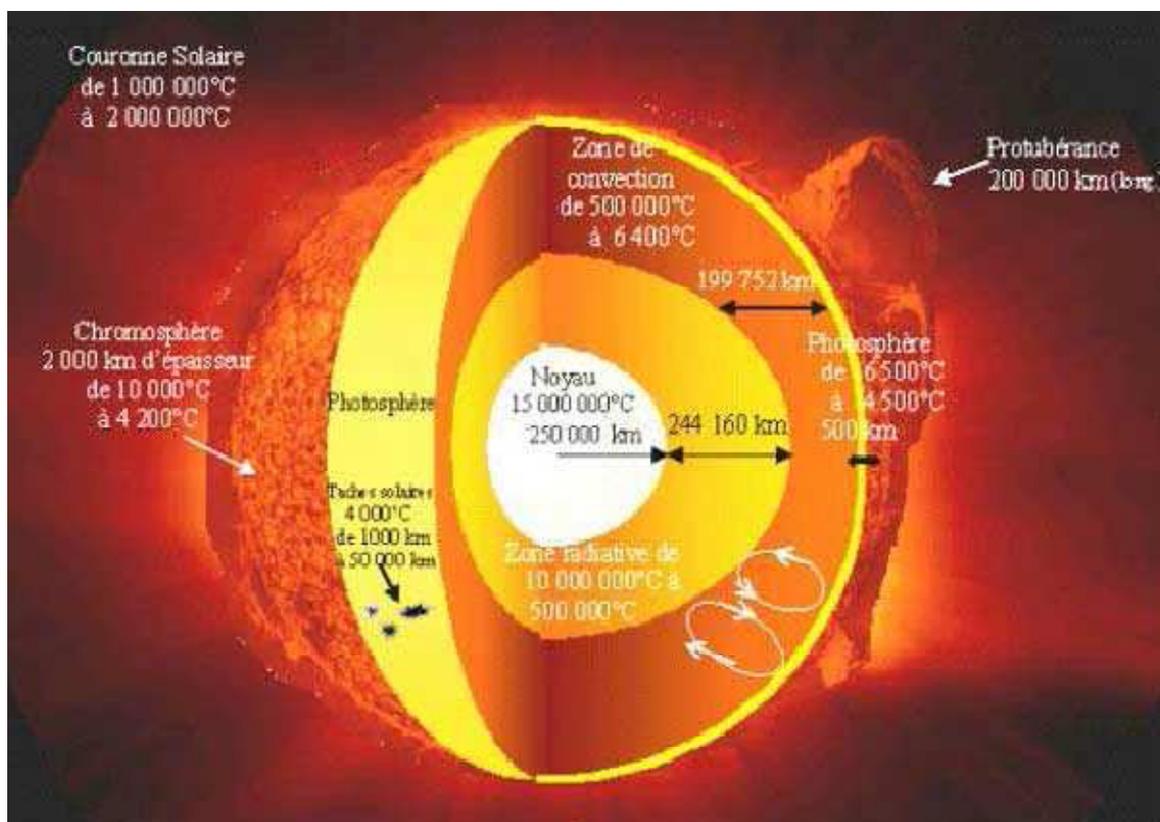


Figure II.1 : Structure du soleil en coupe [48].

II.2.2.1 Le cœur ou noyau

Le cœur est la seule partie du Soleil qui produise une quantité notable de chaleur par fusion, le reste de l'étoile tire sa chaleur uniquement de l'énergie provenant du cœur. La totalité de l'énergie produite dans le cœur doit traverser de nombreuses couches successives jusqu'à la photosphère, avant de s'échapper dans l'espace sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules [47].

On considère que le cœur du Soleil s'étend du centre à environ 0,25 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à $150\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (150 fois la densité de l'eau sur Terre) et sa température approche les 15 millions de kelvins (ce qui contraste nettement avec la température de surface du Soleil, qui avoisine les 5 800 kelvins). C'est dans le cœur que se produisent les réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment, dans le cas du Soleil, l'hydrogène en hélium.

II.2.2.2 La zone de radiation

La zone de radiation ou zone radiative. La matière solaire y est si chaude et si dense que le transfert de la chaleur du cœur vers les couches les plus extérieures se fait par la seule radiation thermique [47].

L'hydrogène et l'hélium ionisés émettent des photons qui voyagent sur une courte distance avant d'être réabsorbés par d'autres ions. Les photons de haute énergie (rayons X et gamma) libérés lors des réactions de fusion mettent un temps considérable pour atteindre la surface du Soleil, ralentis par l'interaction avec la matière et par le phénomène permanent d'absorption et de réémission à plus basse énergie dans le manteau solaire.

On estime que le temps de transit de l'énergie d'un photon du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans. Dans cette zone, il n'y a pas de convection thermique car bien que la matière se refroidisse en s'éloignant du cœur, le gradient thermique reste inférieur au gradient thermique adiabatique. La température y diminue à 2 millions de kelvins.

II.2.2.3 La zone de convection

La zone de convection ou zone convective s'étend de 0,8 rayon solaire du centre à la surface visible du Soleil. Elle est séparée de la zone de radiation par une couche épaisse d'environ 3 000 kilomètres, la tachocline, qui d'après les études récentes pourrait être le siège de puissants champs magnétiques et jouerait un rôle important dans la dynamo solaire [47].

Dans la zone de convection la matière n'est plus ni assez dense ni assez chaude pour évacuer la chaleur par radiation : c'est donc par convection, selon un mouvement vertical, que la chaleur est conduite vers la photosphère. La température y passe de 2 millions à 5 800 kelvins. La matière parvenue en surface, refroidie, plonge à nouveau jusqu'à la base de la zone de convection pour recevoir la chaleur de la partie supérieure de la zone de radiation, etc.

Les gigantesques cellules de convection ainsi formées sont responsables des granulations solaires observables à la surface de l'astre. Les turbulences survenant dans cette zone produisent un effet dynamo responsable de la polarité magnétique nord-sud à la surface du Soleil.

II.2.2.4 La photosphère

La photosphère est la partie visible de la surface du Soleil. En dessous d'elle, le Soleil devient opaque à la lumière visible. Au-delà de la photosphère, la lumière visible est libre de se propager dans l'espace, et son énergie de s'échapper entièrement du Soleil [47].

La lumière solaire y a approximativement le spectre électromagnétique d'un corps noir (ce qui permet d'estimer sa température à 6000 kelvins, soit 5727 degrés Celsius).

II.2.2.5 La couronne solaire

La zone de transition entre la chromosphère et la couronne est le siège d'une élévation rapide de température, qui peut approcher 1 million de kelvins. Cette élévation est liée à une transition de phase au cours de laquelle l'hélium devient totalement ionisé sous l'effet des très hautes températures [47].

La zone de transition n'a pas une altitude clairement définie. Grossièrement, elle forme un halo surplombant la chromosphère sous l'apparence de spicules et de filaments. Elle est le siège d'un mouvement chaotique et permanent. Difficile à percevoir depuis la Terre malgré l'utilisation de coronographes, elle est plus aisément analysée par les instruments spatiaux sensibles aux rayonnements ultraviolets extrêmes du spectre. La couronne solaire est composée à 73 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Les températures sont de l'ordre du million de degrés.

Bien plus vaste que le Soleil lui-même, la couronne solaire elle-même s'étend à partir de la zone de transition et s'évanouit progressivement dans l'espace, mêlée à l'héliosphère par les vents solaires. La couronne inférieure, la plus proche de la surface du Soleil, a une densité particulière comprise entre $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ et $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, soit moins d'un milliardième de la densité particulière de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer.

Sa température, qui peut atteindre les 5 millions de kelvins, contraste nettement avec la température de la photosphère. Bien qu'aucune théorie n'explique encore complètement cette différence, une partie de cette chaleur pourrait provenir d'un processus de reconnexion magnétique.

II.2.2.6 La chromosphère

La chromosphère proprement dite est épaisse d'environ 2 000 kilomètres. Sa température augmente graduellement avec l'altitude, pour atteindre un maximum de 100 000 kelvins à son sommet. Son spectre est dominé par des bandes d'émission et d'absorption. Son nom, qui vient de la racine grecque *chroma* (couleur), lui a été donné en raison du flash rose soutenu qu'elle laisse entrevoir lors des éclipses totales de Soleil [47].

II.2.2.7 L'héliosphère

Débutant à environ 20 rayons solaires (0,1 ua) du centre du Soleil, l'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du système solaire. On admet qu'elle débute lorsque le flux de vent solaire devient plus rapide que les ondes d'Alfvén, les turbulences et forces dynamiques survenant au-delà de cette frontière n'ont pas d'influence sur la structure de la couronne solaire, car l'information ne peut se déplacer qu'à la vitesse des ondes d'Alfvén.

Le vent solaire se déplace ensuite en continu à travers l'héliosphère, donnant au champ magnétique solaire la forme d'une spirale de Parker jusqu'à sa rencontre avec l'héliopause, à plus de 50 ua du Soleil. En décembre 2004, Voyager 1 est devenue la première sonde à franchir l'héliopause. Chacune des deux sondes Voyager a détecté d'importants niveaux énergétiques à l'approche de cette frontière.

II.3 Caractéristiques de la terre

Les principales caractéristiques sont données dans le tableau II.1

Caractéristiques	Valeur
Masse	$6 \cdot 10^{21} \text{t}$
Volume	$1083320 \cdot 10^6 \text{km}^3$
Surface	$510101 \cdot 10^3 \text{km}^2$
Diamètre équatorial	12756,32 km
Diamètre polaire	12713,55 km

Tableau II.1 : Caractéristiques principales de la terre [48].

II.3.1 L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère, entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère, entre 80 et 200 km d'altitude.

II.4 Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible, il en résulte que la distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149,579 \cdot 10^6 \text{km}$ (fig II.2). La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée point vernal g. La révolution complète de la terre autour du soleil s'effectue en une année [46], on distingue :

L'année tropique est l'intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps successifs. Elle est de 365j, 5h, 48min, 46s.

L'année sidérale est le temps mis par le soleil pour que sa longitude céleste augmente de 360° à partir d'un équinoxe fixe. Elle est de 365j, 6h, 9min, 10s.

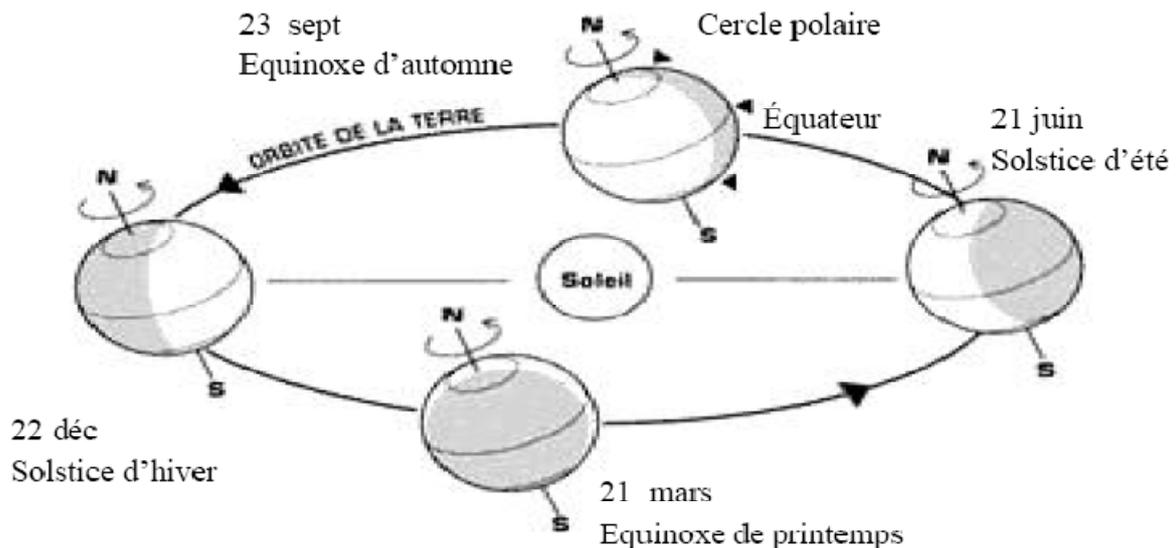


Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil [46].

II.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil dans son rayonnement, direct ou diffus. Sur terre grâce à divers procédés elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière [47].

II.5.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

II.5.2 Énergie solaire thermique

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire on le transformant en énergie thermique. Il se présente de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) où indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

II.5.3 Caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire

Certaines particularités de l'énergie solaire doivent être prises en compte pour optimiser son utilisation, les principales caractéristiques sont la dilution et l'intermittence.

➤ *La dilution :*

L'énergie du rayonnement solaire est un niveau d'énergie relativement réduit c'est ce qui est désigné connu sous le nom de dilution.

La dilution nécessite l'utilisation d'une surface importante de captation pour obtenir des puissances élevées ou bien de prévoir une concentration des rayons solaires pour obtenir des températures élevées.

➤ *L'intermittence :*

L'intermittence du rayonnement solaire et l'autre Caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire ainsi que sa variation journalière et même suivant l'année, en effet l'énergie solaire est asservie aux conditions météorologiques. Dans les régions à climat tempéré, le problème de l'intermittence est difficile à résoudre.

Une solution souvent employée est d'envisager des stockages d'importances très variables suivant les applications envisagées. Par exemple il est nécessaire de prévoir un stockage quotidien et de l'utiliser durant la nuit de même de prévoir le stockage nébuleux qui correspond à des passages nuageux accidentels.

II.5.4 Paramètres de position

Pour définir la position terre-soleil à un instant donné, on utilise les coordonnées suivantes :

II.5.4.1 Les coordonnées géographiques terrestres (φ , L) qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure II.3), à savoir :

- **La latitude φ** , comptée positive dans l'hémisphère nord, et négative dans l'hémisphère sud.
- **La longitude L** , positive à l'ouest, négative à l'est par rapport au méridien de Greenwich.

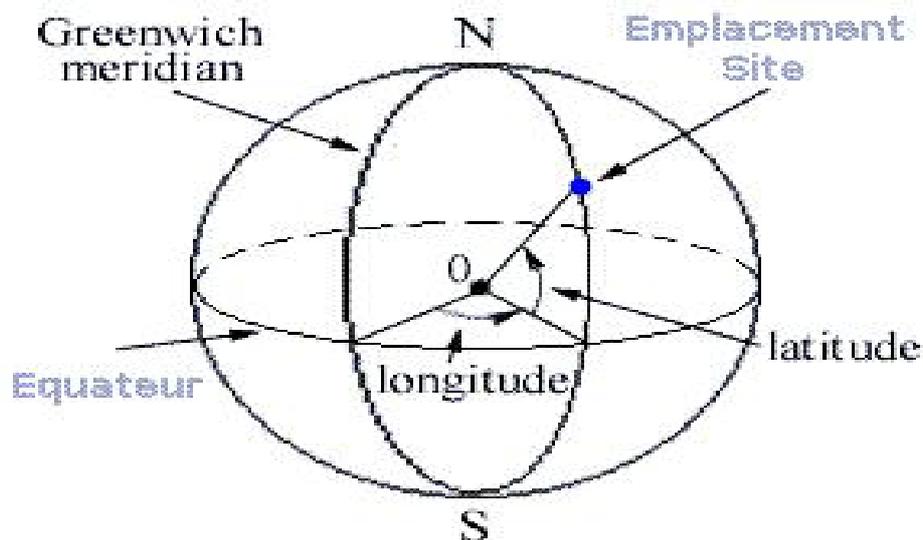


Figure II.3 : Les coordonnées géographiques terrestres [46].

II.5.4.2 Les coordonnées horaires (δ , ω , α)

Les coordonnées horaires sont :

L'angle horaire (ω) qui est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire du soleil avec le plan contenant le méridien céleste, il est compté positivement l'après midi.

La déclinaison (δ) est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation:

$$\delta = 23,45 \sin[0,980(j+284)] \quad (\text{II.1})$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

L'ascension droite (α) est l'angle qui fait le plan contenant le cercle horaire passant par le soleil et celui passant par le point vernal γ et contenant l'axe du monde.

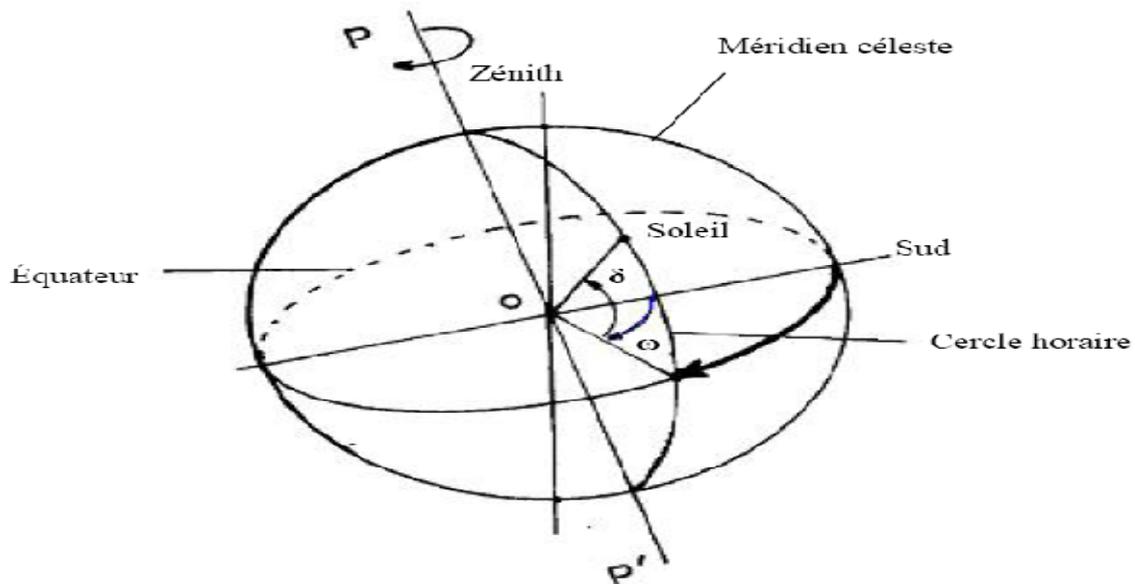


Figure II.4 : Les coordonnées horaires [46].

II.5.4.3 Les coordonnées horizontales (h, a) déterminent la projection du soleil sur l'horizon du lieu (figure II.5), et sont définies comme suit :

Hauteur angulaire (h) c'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal c'est-à-dire tangent au sol.

Azimut (a) correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil; a est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

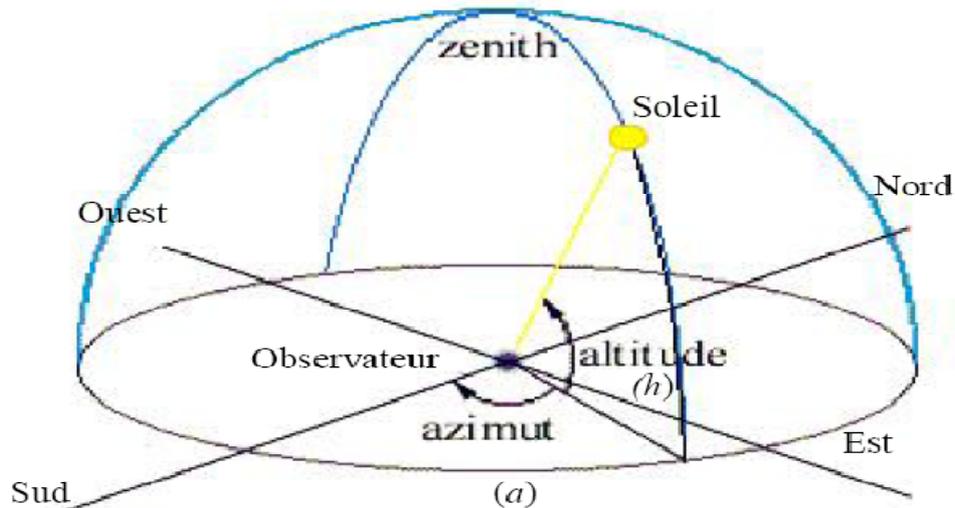


Figure II.5 : Les coordonnées horizontales [46].

On peut écrire trois expressions scalaires appelées formules de Gauss reliant entre elles les coordonnées a , h , ω , δ pour une latitude donnée :

$$\cos(h).\sin(a) = \cos(\delta).\sin(\omega) \quad (\text{II.2})$$

$$\cos(h).\cos(a) = \cos(\delta).\cos(\omega).\sin(\varphi) - \sin(\delta).\cos(\varphi) \quad (\text{II.3})$$

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

II.5.5 Le temps solaire

L'heure solaire est l'heure basée sur le mouvement du soleil dans le ciel. Le midi solaire correspond au moment où le soleil est le plus haut dans le ciel, ce moment est généralement décalé par rapport au midi de l'heure légale :

II.5.5.1 Temps solaire vrai

Le soleil tourne dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures, soit 15° par heure, il existe ainsi une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.5})$$

II.5.5.2 Durée de jour

Le module ω_l de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant $\sin(h)=0$. On en déduit que la durée du jour est:

$$d = 24 \cdot \frac{\omega_l}{\pi} \quad (\text{II.6})$$

La durée du jour est en heures et ω_l en radians.



II.5.5.3 Equation du temps

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation de temps noté ET (en min), est donné par la relation suivante:

$$ET = [-0,0002 + 0,4797 \cos(0,984j) - 3,2265 \cos(2,0,984j) - 0,0903 \cos(3,0,984j) - 7,3509 \sin(0,984j) - 9,3912 \sin(2,0,984j) - 0,3361 \sin(3,0,984j)] \quad (\text{II.7})$$

II.5.5.4 Temps solaire moyen TSM varie de ± 16 min par rapport au TSV :

$$TSM = TSV - ET \quad (\text{II.8})$$

II.5.5.5 Temps universel (TU)

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) pour un lieu situé à la longitude « L » : [47]

$$TU = TSM + (L/15) \quad (\text{II.9})$$

TSM : Temps Solaire Moyen

L : la longitude exprimée en degrés et les temps en heures.

II.5.5.6 Temps légal TL c'est l'heure que nous lisons aux horloges publiques:

$$TL=TU+C \quad (\text{II.10})$$

C : étant le décalage entre le méridien de Greenwich et l'état considéré (C=1 heure pour l'Algérie).

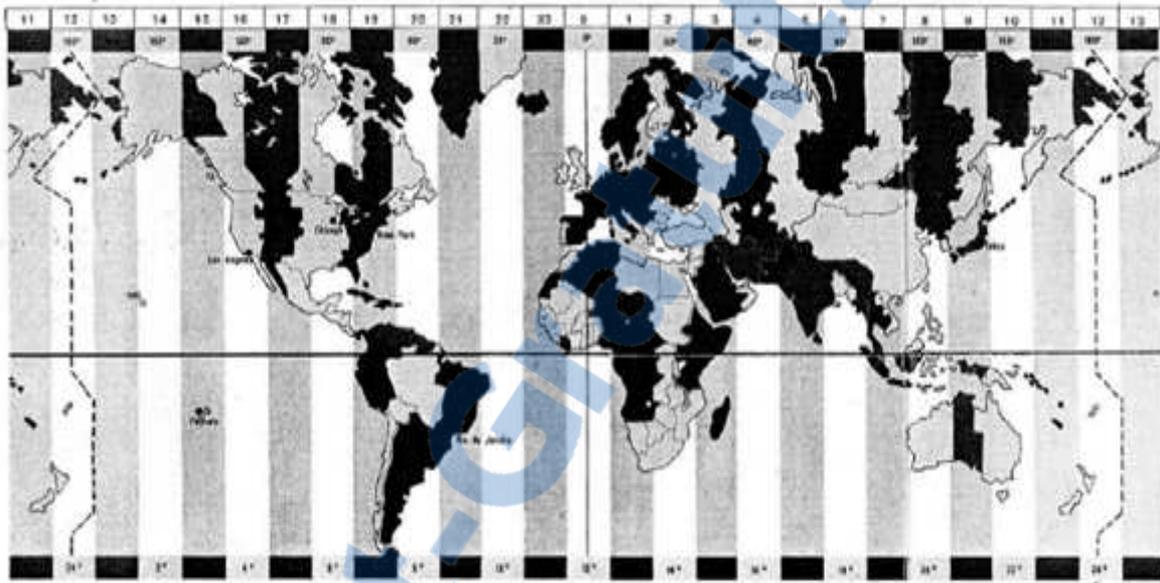


Figure. II.6 : Fuseaux horaires avec le décalage horaire [46].

II.5.6 Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil [46].

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8\mu\text{m}$.

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique.

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau (II.2).

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m^2)	87	656	623

Tableau II.2 : Répartition spectrale du rayonnement thermique.

II.5.7 Le spectre de la radiation solaire

Le spectre de la radiation solaire peut approximativement se diviser en ultraviolet (UV), lumière visible, infrarouge (IR) et grandes longueurs d'ondes (chaleur).

La figure II.7 illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes.

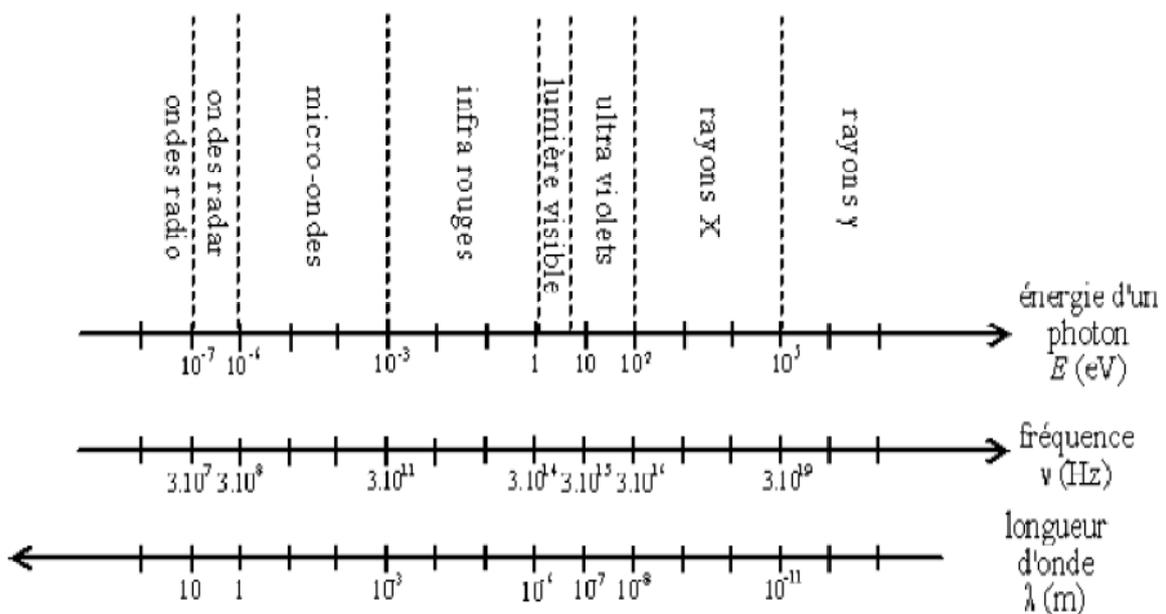


Figure II.7 : Spectre solaire [48].

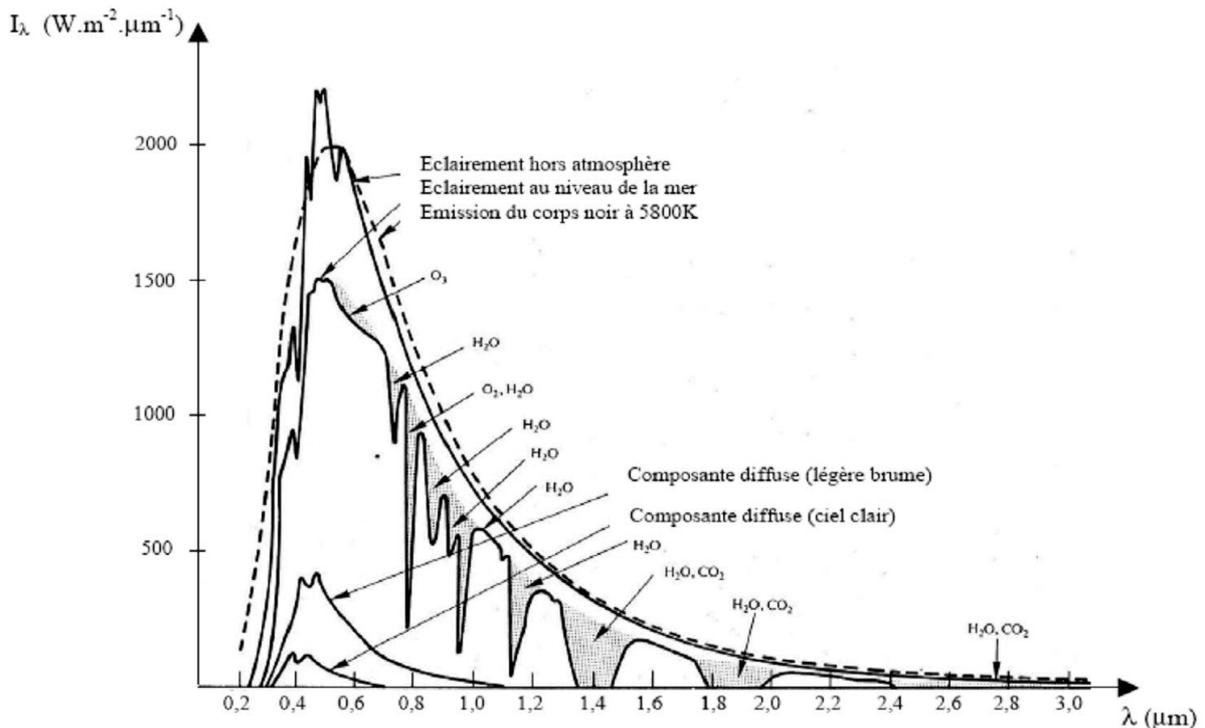


Figure II.8 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [46].

II.5.8 Rayonnement solaire hors atmosphère

Le soleil est le siège de réactions de fusion de l'hydrogène en hélium, qui libèrent une grande quantité d'énergie dispersée dans l'espace par rayonnement. La perte de masse du soleil est de l'ordre de $4 \text{ à } 5 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$.

II.5.8.1 La constante solaire I_0

C'est la densité de l'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est approximativement égale à 1360 (cependant elle varie de $\pm 3\%$ dans l'année à cause des légères variations de la distance terre-soleil).

On peut calculer la valeur du flux du rayonnement solaire I reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires par la relation:

$$I = I_0 \cdot \exp \left[1 + 0,033 \cos \frac{360j}{365} \right] \quad (\text{II.11})$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

II.5.9 Direction des rayons solaires par rapport à un plan

Soit un plan quelconque sur la terre, sa position est généralement repérée par les paramètres suivants:

- β , angle entre le plan horizontal et le plan considéré

$\beta = 0$ pour le plan horizontal

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

$\beta > 0$ si le plan regarde l'équateur

- α , angle entre le méridien local et la normale au plan

$\alpha = 0$ vers le sud

$\alpha < 0$ vers l'est

$\alpha > 0$ vers l'ouest

Soit i l'angle entre le rayon incident et la normale au plan, le cosinus de l'angle i est donné par l'expression:

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(a - \alpha) + \cos(\beta) \cdot \sin(h) \quad (\text{II.12})$$

- Pour une surface horizontale ($\beta = 0$) :

$$\cos(i) = \sin(h) \quad (\text{II.13})$$

- Pour une surface verticale ($\beta = 90^\circ$) :

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \cos(a) \quad (\text{II.14})$$

- Pour une surface orientée vers l'équateur et inclinée d'un angle β sur l'horizontale:

$$\cos(i) = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.15})$$

II.5.10 Atténuation du rayonnement solaire (rôle de l'atmosphère)

L'énergie solaire ne parvient pas en intégralité sur la terre. En effet elle subit des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

- L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments, qui sont :

- L'ozone qui forme un écran et arrête les UV ($\lambda < 0,28\mu\text{m}$) nocifs pour la vie.
- L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers $0,69$ et $0,76\mu\text{m}$).
- Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2\mu\text{m}$).
- La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR, on ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($Z < 5\text{km}$).

- Les poussières et les nuages ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

II.5.11 L'irradiation ou rayonnement solaire au sol

C'est l'énergie reçue pendant une certaine durée. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement :

II.5.11.1 Le rayonnement direct (S) est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

II.5.11.2 Le rayonnement diffus (D) est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, ...). Il n'a pas de direction privilégiée.

II.5.11.3 Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements direct et diffus.

II.5.12 L'albédo

En réalité la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo [46].

On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente.

On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit.

Le tableau II.3 regroupe les valeurs d'albédos pour différentes surfaces :

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Forêt tropicale	0,12
Herbe verte	0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

Tableau II.3 Albédo pour différentes surfaces [46].

II.5.13 Mesure et calcul des rayonnements solaires

Le rayonnement solaire peut être déterminé de plusieurs manières en fonction de données disponibles, on distingue notamment :

II.5.13.1 Le rayonnement direct (S)

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (tableau II.4).

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par :

$$\tau_{dir} = a \times \exp \frac{-p \times b}{1000 \times \sin h} \quad (\text{II.16})$$

Où:

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h: hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau II.4 : Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [48].

Le tableau II.5 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau II.5 : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [48].

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$Gdirh = C^* \times \tau dir \quad (II.17)$$

$Gdirh$: éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique $Gdir$ reçu sur un plan incliné est donné par :

$$Gdir = Gdirh \times \cos\theta \quad (II.18)$$

θ : Angle d'incidence des rayons solaires.

II.5.13.2 Le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste.

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est :

$$\tau dif = 0.271 - 0.2939 \times \tau dir \quad (II.19)$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par:

$$Gdifh = C^* \times \sin(h) \times \tau dif \quad (II.20)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par :

$$Gdif = Gdif1 + Gdif2 \quad (II.21)$$

$$Gdif1 = Gdifh \times \frac{1+\cos(i)}{2} \quad (II.22)$$

$$Gdif2 = alb \times \frac{1+\cos(i)}{2} \times (Gdifh \times \sin(h) + Gdifh) \quad (II.23)$$

$Gdifh1, Gdifh2$: Rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

alb : albédo du sol.

i : angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

II.5.13.3 Le rayonnement global

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct :

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (\text{II.24})$$

II.5.14 Taux d'ensoleillement

Par ciel clair, sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement σ , le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement :

II.6 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure II.9 :

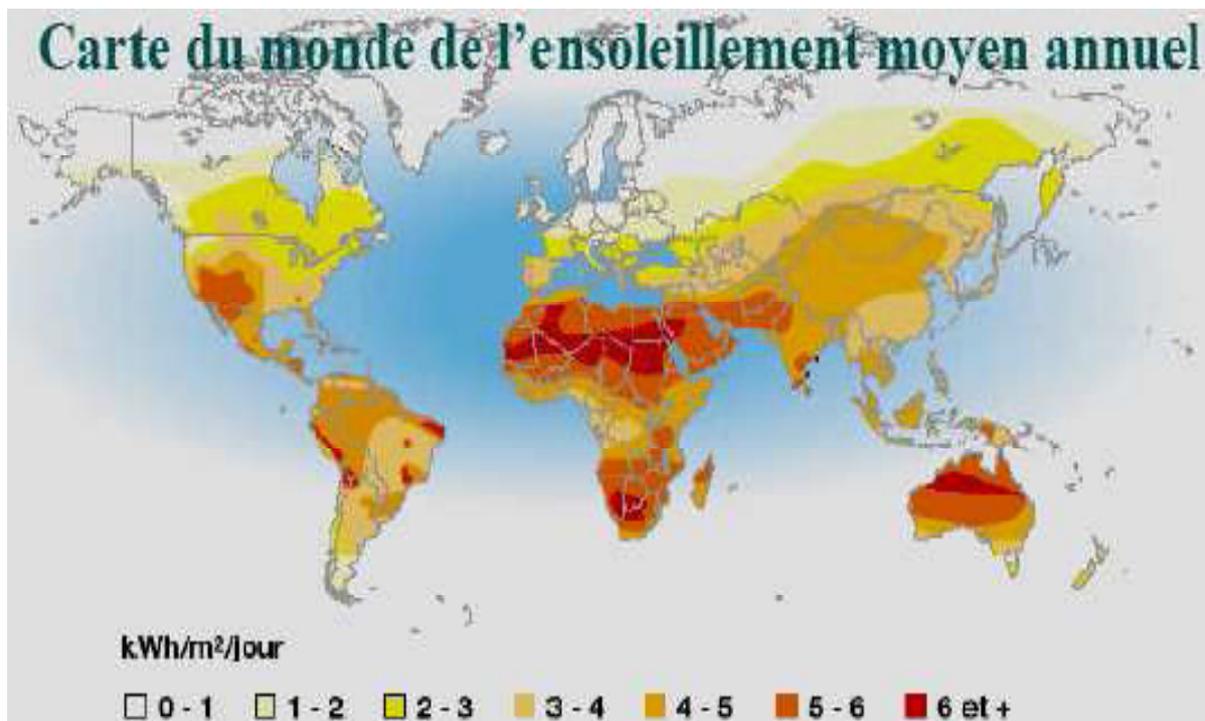


Figure II.9 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [48].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau II.6 selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau II.6 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [48].

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

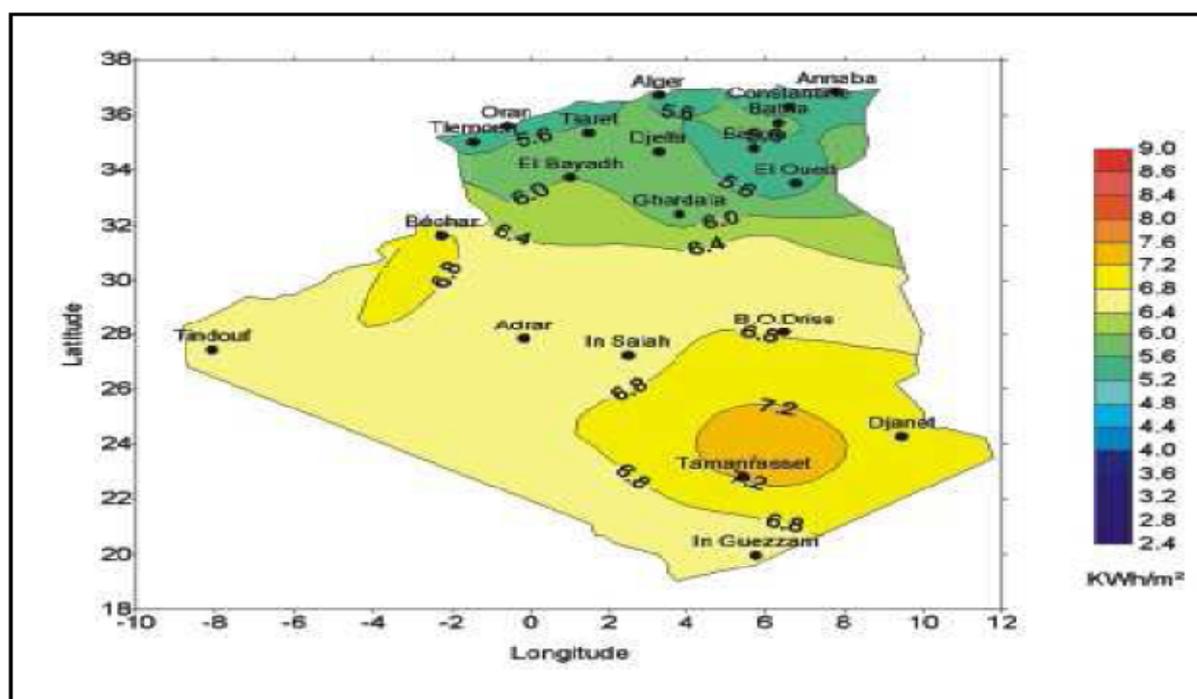
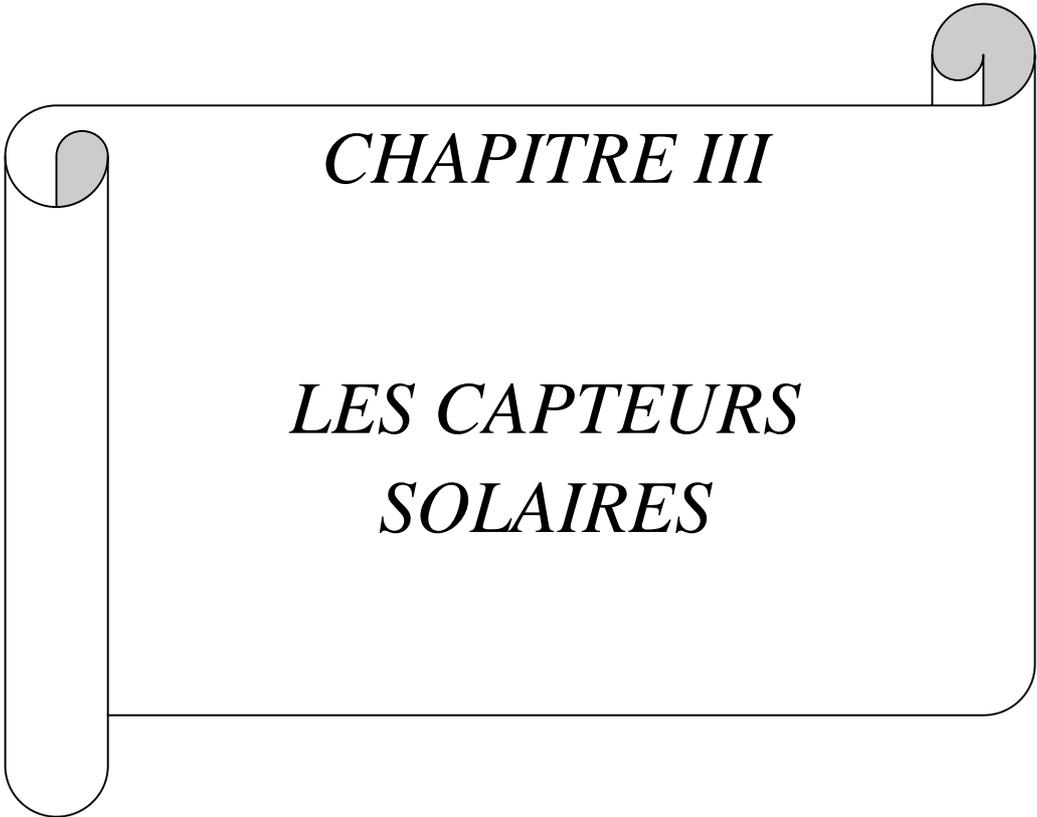


Figure II.10 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [48].

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

II.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une généralité sur le gisement solaire, ses propriétés et les équations mathématiques utilisant dans le domaine d'énergie solaire. Et nous verrons dans le chapitre suivant une étude sur les capteurs solaires, leurs composantes et leurs types utilisant dans le domaine de l'énergie solaire.



CHAPITRE III

*LES CAPTEURS
SOLAIRES*

III.1 Introduction

Les capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les capteurs solaires. On va voir la notion et les composantes d'un capteur solaire, ainsi que ses types et ses utilisations dans le domaine de l'énergie solaire.

III.2 Définition et principe d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire (figure III.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 du 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 [46].

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 [49].

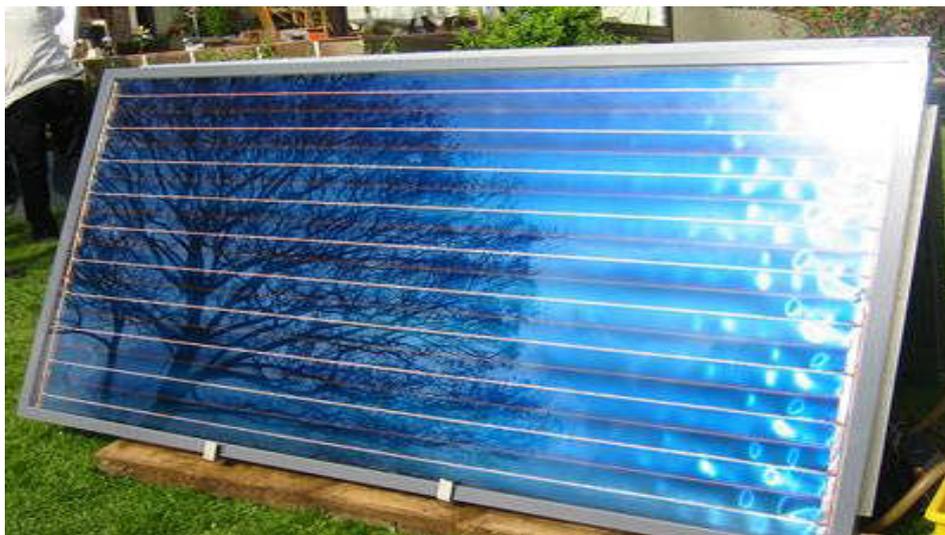


Figure III.1 : Capteur solaire thermique [46].

III.3 Constituants d'un capteur solaire plan

Les techniques et les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. Généralement, un capteur solaire est composé des éléments suivants:

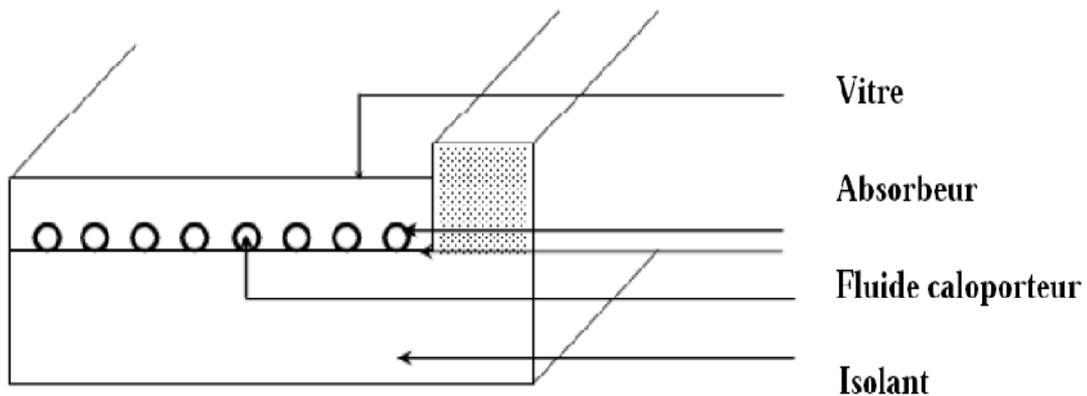


Figure III.2 : Composants d'un capteur solaire [48].

III.3.1 Une couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles [46]:

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres. Le tableau III.1 fournit quelques indications sur ces matériaux:

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur massique ($j/kg.K$)	Conductivité thermique ($w/m.K$)	Dilatation thermique (K^{-1})
Verre	85-92	2700	840	0.93	$0.9 \cdot 10^{-5}$
Polycarbonate	82-89	1200	1260	0.2	$6.6 \cdot 10^{-5}$
Polyméthacrylate	89-92	1200	1460	0.2	$7 \cdot 10^{-5}$
Polyester armé	77-90	1400	1050	0.21	$3.5 \cdot 10^{-5}$
Polytéréphtalate Ethylène	84	1.38	1170	0.25	$7 \cdot 10^{-5}$
Polyfluoroéthylène Opoyléne	97	2.15	1170	0.25	10^{-4}
Polyflurure Vinyle	93	1.50	1380	0.12	$4 \cdot 10^{-5}$

Tableau III.1 : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [46].

III.3.2 Partie absorbante

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

L'absorbant doit assurer les fonctions suivantes [49] :

- 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.

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 Inoxydable	14	460	7800	04
Aluminium	204	879	2700	86

Tableau III.2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques [46].

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm [48].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas.

III.3.3 Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau, des mélanges eau glycol sont aussi employés à cause des conditions climatiques, ces mélanges ont une chaleur spécifique inférieure à celle de l'eau pure. Par rapport à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été et il n'y a pas de problème de corrosion. Néanmoins l'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux et les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

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

III.3.4 L'isolation thermique

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

Partie avant de l'absorbeur

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [48].

Parties arrière et latérale

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

Le choix du matériau à utiliser dépend de [46] :

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

Matériau	Conductivité thermique (w/m.K)	Masse volumique (kg/m³)	Chaleur massique (j/kg.K)	Diffusivité (10⁻⁷ m²/s)
Air (à 20°C)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de Polyuréthane	0.029	30	1600	6.0
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène Expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier journal Comprimé	0.105	130	1340	6.0
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

Tableau III.3 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [46].

III.3.5 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.

III.4 Les types d'un capteur solaire thermique

III.4.1 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 (III.4).



Figure III.3 : Capteurs solaires sans vitrage [49].

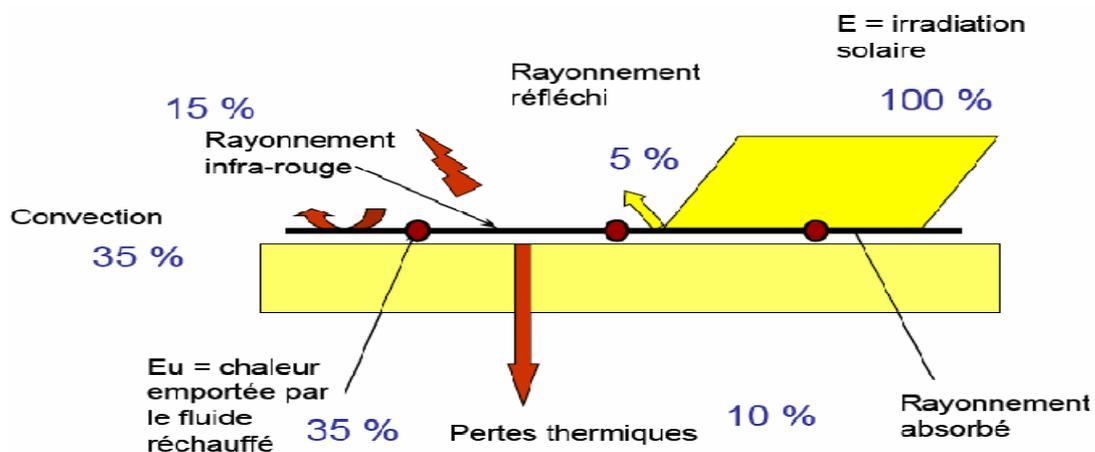


Figure III.4 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [49].

III.4.2 Les capteurs plans vitrés

C'est un dispositif sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est une plaque métallique sensiblement plane et noircie pour absorber le maximum de rayonnement. Elle est recouverte d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière (figure III.5).

Les rayons solaires qui traversent la vitre sont absorbés par l'absorbeur qui s'échauffe et émet des rayons infrarouges. Ces derniers restent piégés dans le capteur à cause de la vitre (effet de serre) et de l'isolant sur les autres parois. Un liquide dans des tubes récupère la chaleur et la véhicule jusqu'au point d'utilisation [46].

Ce type des capteurs peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple), la figure (III.6) montre le principe de fonctionnement de ce type [49].

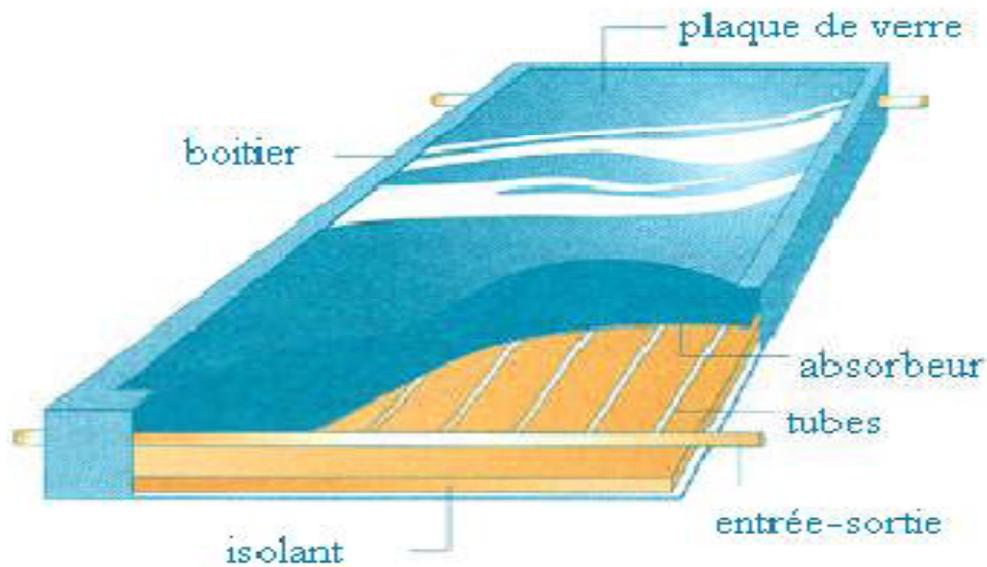


Figure III.5 : Capteur solaire vitré [46].

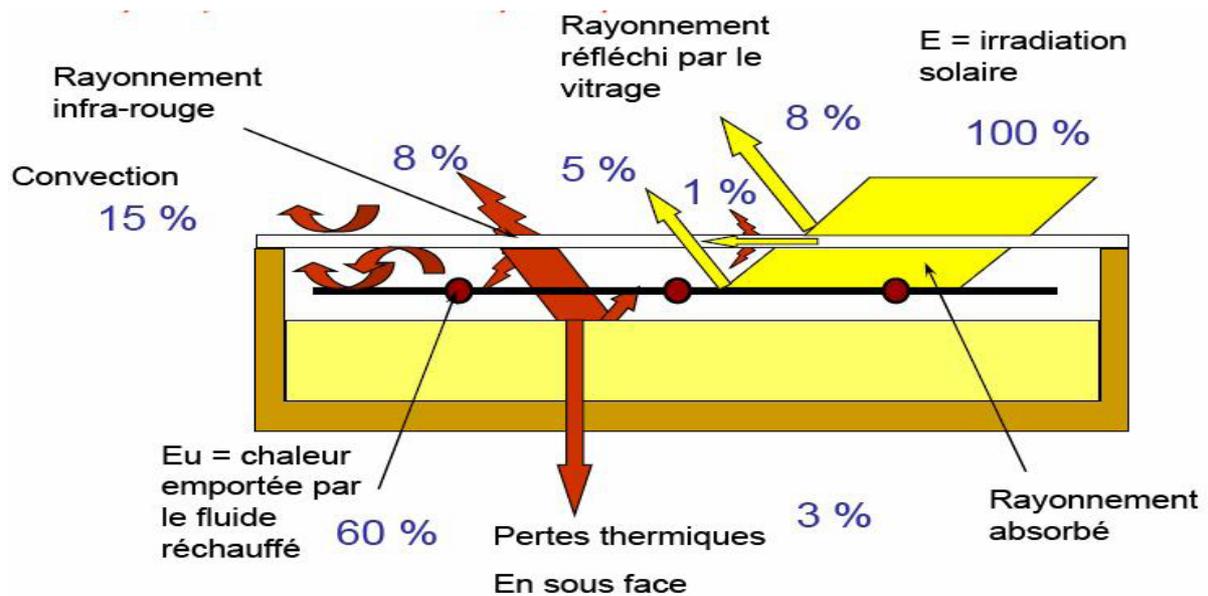


Figure III.6 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [49].

III.4.3 Les capteurs à tubes sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (figure III.7) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où la partie extérieure et la partie intérieure de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1 Pa. Ainsi, les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées.



Figure III.7 : capteurs à tube sous vide [46].

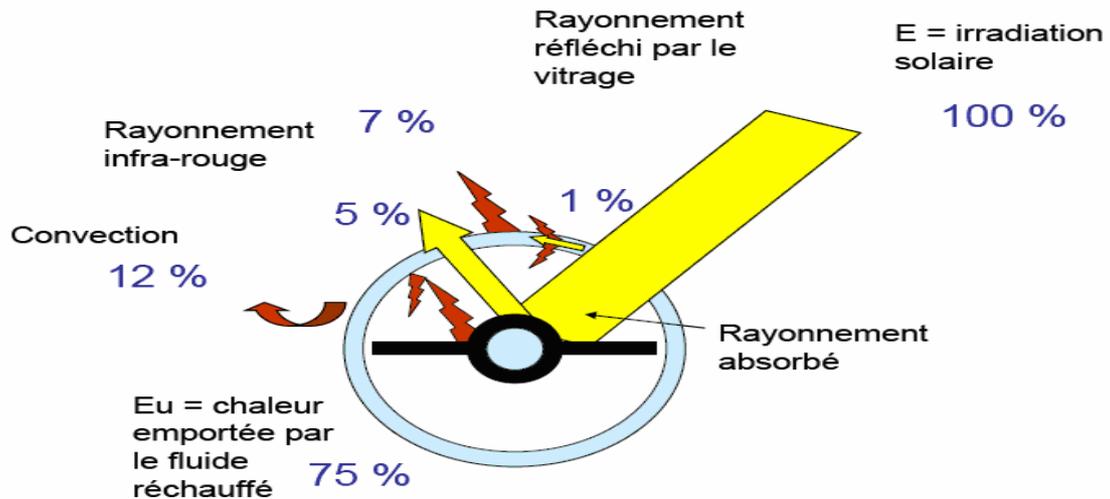


Figure III.8 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [49].

III.4.4 Le capteur cylindro-parabolique

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (figure III.9) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.



Figure III.9 : Système à réflecteur cylindro-parabolique [46].

III.4.5 Le capteur CPC (Compound Parabolic Concentrator)

C'est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques" (figure III.10). 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.

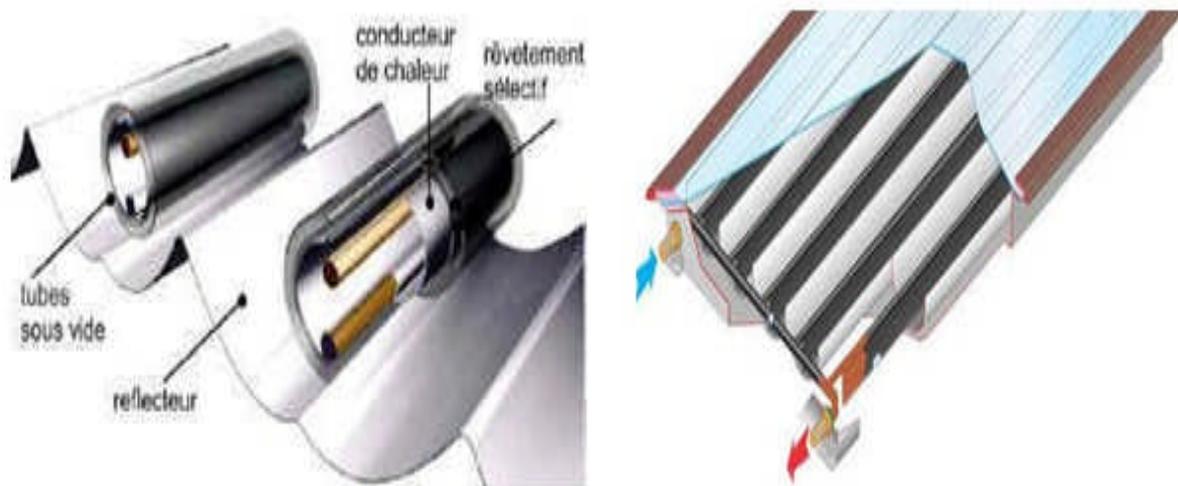


Figure III.10 : Coupe schématique du capteur CPC [46].

III.4.6 Le 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 III.11). 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 [46].

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 à des besoins spécifiques saisonniers.

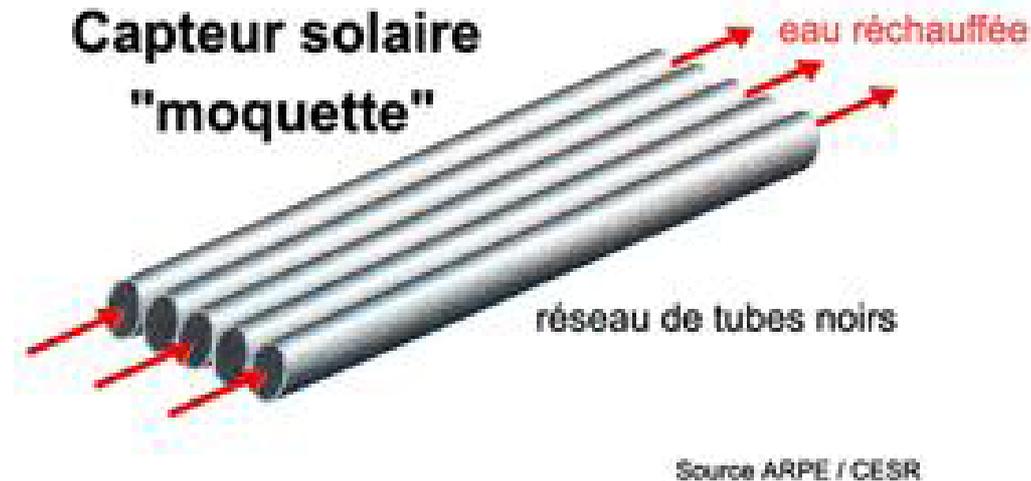


Figure III.11 : Capteur solaire moquette [46].

III.5 Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

III.5.1 Les paramètres internes

III.5.1.1 La vitre

La plus part des capteurs solaires couverts utilisés sont à couverture simple, à double ou triple. S.Youcef-Ali a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur. Turhan. Koyuncu, a aussi étudié expérimentalement l'influence du nombre de couvertures et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur.

Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur. Mais son utilisation possède aussi des inconvénients qui sont, son coût élevé et sa fragilité pendant le transport et en service, c'est la raison pour laquelle, pendant plusieurs années des couvertures en plastique transparent ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de coût modéré et rigides.

III.5.1.2 L'absorbeur

L'augmentation de la surface du capteur accroît le taux du rayonnement solaire intercepté et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (augmentation de la surface d'échange), mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur.

III.5.1.3 Forme et diamètres des pipes

Un autre facteur influe aussi sur l'efficacité du capteur, c'est bien, la tuyauterie, qui est généralement soudée à la partie inférieure de l'absorbeur et des fois fait partie de l'absorbeur, sa forme diffère d'un capteur à un autre.

III.5.1.4 La circulation du fluide caloporteur

M. N. Bargach et al (2004), C. D. Ho et al (2005), ont montré que l'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance du capteur solaire.

III.5.1.5 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.

III.5.1.6 L'orientation et l'inclinaison du capteur

L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur.

Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007) ont trouvé que la meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud. L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. Cet angle joue un rôle important en augmentant la collection d'énergie par les capteurs solaires.

III.5.2 Paramètres externes

III.5.2.1 Obstacles

Il s'agit avant tout des constructions et de la végétation, leur position dans la trajectoire solaire peut créer sur les surfaces captatrices une ombre nuisible au bon fonctionnement de l'installation.

III.5.2.2 Rayonnement solaire

Selon F. Moukhtari et D. Semmar (1999), l'efficacité du capteur solaire est influée considérablement par le rayonnement solaire, et l'élévation de la température varie presque linéairement avec le rayonnement solaire incident.

III.5.2.3 Température

La température de l'environnement influe fortement sur le fonctionnement du capteur solaire. Runsheng Tang et al (2008) ont montré dans une étude expérimentale que les capteurs peuvent être endommagés par le gel pendant la nuit couverte.

III.5.2.4 Vitesse du vent

La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est importante. Lorsque le coefficient de transfert thermique dû au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau.

III.6 Pertes thermiques dans un capteur solaire

Les pertes thermiques au niveau du capteur solaire peuvent avoir lieu par l'intervention des trois modes de transfert thermique: convection, conduction et rayonnement.

III.6.1 Pertes par convection

Ce mode de transfert intervient généralement entre la couverture et le milieu extérieur, l'absorbeur et la lame d'air, la lame d'air et la couverture. Le coefficient de pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, sa température, et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, alors qu'il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre. Les obstacles soudés à l'absorbeur peuvent réduire les pertes par l'avant en diminuant la température de l'absorbeur.

III.6.2 Pertes par conduction

Les pertes par conduction peuvent avoir lieu entre l'absorbeur et la vitre lorsque ces derniers se trouvent sur une très faible distance, comme elles existent au niveau de l'isolation de la partie arrière et latérale du capteur.

III.6.3 Pertes par rayonnement

Les matériaux utilisés comme couvertures laissent passer le rayonnement solaire incident mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100 C (c'est l'effet de serre), la face interne de la couverture absorbe ce rayonnement infrarouge, puis elle subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur et moitié vers l'absorbeur. Donc, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs couvertures.

III.7 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure III.12).

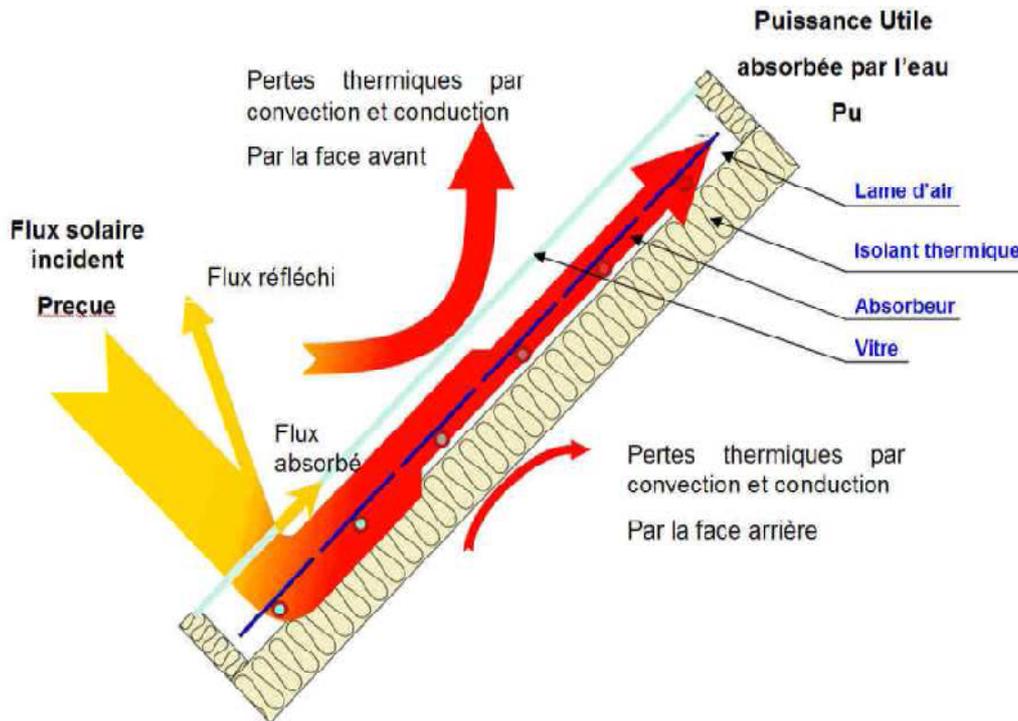


Figure III.12 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan [48].

III.7.1 La conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation:

$$q = -K.A.gradT \quad (III.1)$$

q : Flux de chaleur.

K : Coefficient de conductivité thermique.

A : Surface d'échange.

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieure de la vitre hcv.
- Les faces supérieures et inférieure de l'isolant his.
- L'absorbeur et l'isolant hcvai.

Le flux de chaleur par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par:

$$q_{cdai} = \frac{T_{ab}-T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab}-T_{ail}}{\varphi_2} \quad (\text{III.2})$$

φ_1 et φ_2 sont exprimés par :

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{s_{abi} \times k_i} + \frac{e_i}{s_{abi} \times k_{ab}} \quad (\text{III.3})$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{s_{abil} \times k_{il}} + \frac{e_{il}}{s_{abil} \times k_{ab}} \quad (\text{III.4})$$

q_{cdai} : Quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

T_{ab} : Température de l'absorbeur.

T_{ii} : Température de la face intérieure de l'isolant.

T_{ail} : Température de l'isolant latéral.

e_{ab} : Épaisseur de l'absorbeur.

s_{abi} : Surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

k_i : Conductivité thermique de l'isolant horizontal.

e_i : Épaisseur de l'isolant horizontal.

e_{il} : Épaisseur de l'isolant latéral.

k_{ab} : Conductivité thermique de l'absorbeur.

k_{il} : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

III.7.2 La convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc).
- **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermocirculation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton:

$$q = h \cdot s \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{III.5})$$

q : Le flux échangé par convection.

h : Coefficient de convection.

s : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

III.7.3 Le rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [48]:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (\text{III.6})$$

q : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à : $5,6.10^{-8} \text{ w. m}^{-2} . \text{K}^{-4}$

T : Température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

III.8 Système de Capteurs solaires

III.8.1 Installation des Capteurs solaires

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le Sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permette que la surface du capteur soit exposée au maximum de lumière solaire.

Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l'emplacement du système de chauffage solaire. En général, il s'agit de la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15 degrés. En hiver, lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel.

III.8.2 Protection contre le gel

Les chauffe-eau solaires conçus pour utilisation par temps froid doivent être protégés contre le gel. Dans une première méthode de prévention du gel, l'eau qui se trouve dans le circuit du capteur est évacuée automatiquement dans un réservoir au moment où la pompe s'arrête où que la température de l'eau dans la boucle chute en deçà d'un seuil de température déterminé à l'avance. Ce système s'appelle système à vidange autonome.

Une deuxième méthode de protection, le transfert de la chaleur du capteur au réservoir de stockage est effectué à l'aide d'un antigel non toxique spécial par l'intermédiaire d'un échangeur thermique.

Les systèmes de chauffage solaires saisonniers, c'est-à-dire ceux qui sont destinés à ne servir qu'au printemps, en été et à l'automne, sont habituellement protégés du gel par des soupapes de retenue à bille ou des soupapes manuelles qui permettent l'évacuation et le drainage de l'eau qui se trouve dans le circuit du capteur en temps de gel.

III.9 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une étude générale sur les capteurs solaire et tous qui dépendent de ses types, ses composantes, les facteurs influant sur leur efficacité, et le domaine d'utilisation de chaque un. Et nous verrons dans le chapitre suivant les formules mathématiques liées aux phénomènes physiques qu'ils génèrent dans ce capteur.

CHAPITRE IV

*MODELISATION
MATHEMATIQUE DU
PROBLEME*

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la géométrie du problème et les équations gouvernantes qui régissent le phénomène d'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un capteur solaire à air à double passe sans et avec milieu poreux. Les conditions aux limites imposées sur les frontières de la géométrie sont aussi présentées.

IV.2 Géométrie du problème

La géométrie du problème considéré est présentée dans la figure (IV.1). Il s'agit d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux. L'air circule d'abord dans la conduite supérieure avec un débit d'entrée et passe ensuite dans la conduite inférieure dans le sens inverse de l'écoulement. Le milieu poreux est placé dans la deuxième conduite. Une faible quantité du rayonnement solaire incidente sur le capteur est absorbé par la couverture en verre. Le reste est réfléchi vers l'extérieur et transmis à travers l'air vers l'absorbeur qui absorbe la grande quantité grâce à son grand coefficient d'absorption.

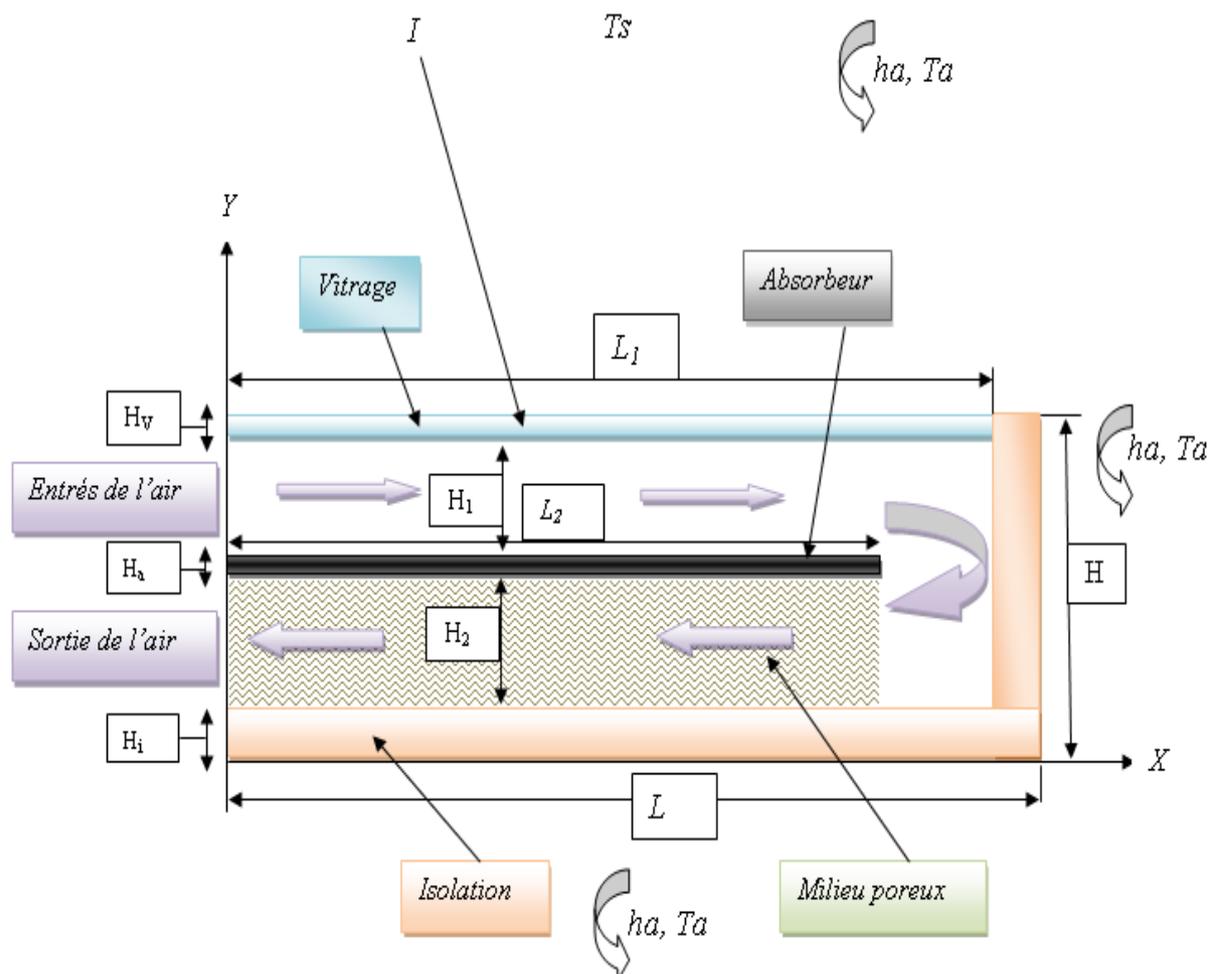


Figure IV.1 : Schéma du capteur solaire à double passe avec milieu poreux.

Les dimensions géométriques du problème étudié sont basées sur les données expérimentales publiées par **Sopian et al.**

Dimension	Symboles	Valeurs	Unités
Largeur du capteur	B	1.2	m
Langueur du capteur	L	2.24	m
Hauteur de la première conduite	H ₁	0.07	m
Hauteur de la deuxième conduite	H ₂	0.07	m
Epaisseur du milieu poreux	dpm	0.07	m
Epaisseur de l'absorbeur	H _a	0.002	m
Longueur de l'absorbeur	L ₂	2.13	m
Epaisseur du vitrage	H _v	0.004	m
Langueur du vitrage	L ₁	2.2	m
Epaisseur de l'isolation	H _i	0.04	m

Tableau IV.1 : Dimensions géométriques du capteur solaire [33].

IV.3 Les paramètres radiatifs

Le tableau IV.2 présente les différents paramètres radiatifs des différents composants du capteur solaire à double passe avec milieu poreux utilisés dans la simulation numérique.

Paramètres	Symboles	Valeurs	Unités
Coefficients d'absorption du vitrage	α_v	0.05	–
Coefficients de transmission du vitrage	τ_v	0.94	–
Emissivité du vitrage	ε_v	0.94	–
Coefficients d'absorption de l'absorbeur	α_a	0.95	–
Emissivité de l'absorbeur	ε_a	0.8	–
Emissivité de l'isolation	ε_i	1	–
Porosité	\emptyset	80%	–
Température ambiante	T_a	306	K

Tableau IV.2 : Paramètres radiatifs des différents composants du capteur solaire [33].

IV.4 Propriétés thermophysiques des différents composants du capteur

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

- L'absorbeur est en aluminium, et qui représente la source de chaleur principale du capteur.
- La vitre est en verre qui constitue la couverture supérieure du capteur (paroi supérieure) qui provoque l'effet de serre.
- Les isolants en bois qui constitue les parois latérales.
- L'air à l'intérieur du capteur est situé entre la vitre et l'absorbeur dans la première conduite et entre l'absorbeur et l'isolation dans la deuxième conduite.

IV.4.1 Propriétés thermophysiques de l'air

Les propriétés thermophysiques de l'air sont présentées dans le tableau IV.3 [33]:

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

Tableau (IV.3) : Propriétés thermophysiques de l'air.

IV.4.2 Propriétés de La vitre

Les propriétés de la vitre sont présentées dans le tableau IV.4 [33].

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

Tableau (IV.4) : Propriétés thermophysiques de la vitre.

IV.4.3 Propriétés de L'absorbeur

Les propriétés de l'absorbeur sont présentées dans le tableau IV.5 [33-51] :

Propriétés physiques	Symboles	Valeurs
Masse volumique (Kg.m^{-3}).	ρ	2719
Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	C_p	500
Conductivité thermique ($\text{J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	λ	237

Tableau (IV.5) : Propriétés thermophysiques de l'absorbeur

IV.4.4 Propriétés de L'isolation

Les propriétés de l'isolation sont présentées dans le tableau IV.6 [33-51] :

Propriétés physiques	Symboles	Valeurs
Masse volumique (Kg.m^{-3}).	ρ	700
Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	C_p	2310
Conductivité thermique ($\text{J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	λ	0.116

Tableau (IV.6) : Propriétés thermophysiques de l'isolation

IV.4.5 Propriétés du milieu poreux

Le matériau poreux utilisé dans notre travail est la laine d'acier. Ses propriétés sont présentées dans le tableau IV.7 [50-52]:

Propriétés physiques	Symboles	Valeurs
Masse volumique (Kg.m^{-3}).	ρ	300
Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	C_p	452
Conductivité thermique ($\text{J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	λ	3.762

Tableau (IV.7) : Propriétés thermophysiques du matériau poreux

IV.5 Hypothèses simplificatrices :

Pour rendre les équations mathématiques gouvernantes plus simples et plus faciles à résoudre, on fait les hypothèses suivantes:

- L'écoulement est bidimensionnel, incompressible, instationnaire en régime laminaire ;
- Fluide visqueux newtonien;
- Les propriétés thermo-physique du fluide ($C_{pf}, \mu, \rho_f, \lambda_f$) et du solide ($C_{ps}, \rho_s, \lambda_s$) sont constantes.

IV.6 Modèle mathématique

D'après les hypothèses simplificatrices présentées précédemment, les équations gouvernantes suivantes décrivent le transfert thermo-convectif forcée à l'intérieur du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

IV.6.1 Dans l'air

Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

Equation de conservation la quantité de mouvement :

- suivant l'axe ox :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.2})$$

- suivant l'axe oy :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.3})$$

Equation de la conservation de l'énergie :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.4})$$

IV.6.2 Dans le milieu solide

Equation de la conservation de l'énergie :

➤ Dans le vitrage :

$$(\rho C)_{vi} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{vi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{vi} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.5})$$

➤ Dans l'absorbeur :

$$(\rho C)_{ab} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ab} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ab} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.6})$$

➤ Dans l'isolation :

$$(\rho C)_{is} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{is} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{is} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.7})$$

IV.6.3 Dans le milieu poreux

L'écoulement dans le milieu poreux est gouverné par le modèle de Brinkman–Forchheimer Extended Darcy dont les équations gouvernantes peuvent s'écrire comme suit :

Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial(\rho u_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_f)}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.8})$$

Equation de conservation la quantité de mouvement :

➤ suivant l'axe ox :

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{\partial u_f}{\partial t} + \frac{\rho}{\phi} \left(u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) - \frac{\mu u_f}{K} + \frac{\rho C \phi}{\sqrt{K}} |\vec{u}_f| u_f \quad (\text{IV.9})$$

➤ suivant l'axe oy :

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{\rho}{\phi} \left(u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) - \frac{\mu v_f}{K} + \frac{\rho C \phi}{\sqrt{K}} |\vec{v}_f| v_f \quad (\text{IV.10})$$

Où :

K : est la perméabilité du milieu poreux :

$$K = \frac{d_p^2 \phi^3}{175(1-\phi)^2} \quad (\text{IV.11})$$

d_p : est le diamètre de la particule.

C : est le coefficient d'inertie :

$$C = \frac{1.75}{\sqrt{175}} \phi^{-3/2} \quad (\text{IV.12})$$

Equation de la conservation de l'énergie :

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_m \left(u_f \frac{\partial T}{\partial x} + v_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{IV.13})$$

La conductivité thermique du milieu λ_m et le produit de la masse volumique par la capacité calorifique du milieu $(\rho c)_m$ sont calculées comme suit :

$$(\rho c)_m = \phi (\rho c)_f + (1 - \phi)(\rho c)_s \quad (\text{IV.14})$$

$$\lambda_m = \phi \lambda_f + (1 - \phi)\lambda_s \quad (\text{IV.15})$$

IV.7 Conditions initiales et aux limites

IV.7.1 Conditions initiales

Initialement, l'air est supposé au repos à la température ambiante.

$$t=0 \quad \longrightarrow \quad u=v=0$$

$$T_i = T_a$$

IV.7.2 Conditions aux limites

IV.7.2.1 Aux frontières des parois :

La face supérieure :

$$\hat{A} \quad 0 \leq x \leq L, y = H$$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T(x, H, t) - T_a) + \varepsilon \sigma(T^4(x, H, t) - T_s^4) + I \quad (\text{IV.16})$$

- La température du ciel est donnée par la formule de Swinbank [17]:

$$T_s = 0,0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (\text{IV.17})$$

- Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [26]:

$$h_a = 5.7 + 3.8V_{vent} \quad (\text{IV.18})$$

$$\hat{A} \quad x = L, 0 \leq y \leq H$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dx} = h_a(T(L, y, t) - T_a) \quad (\text{IV.19})$$

$$\hat{A} \quad 0 \leq x \leq L, y = 0$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T(x, 0, t) - T_a) \quad (\text{IV.20})$$

À $x=0, 0 \leq y \leq H_i$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dx} = h_a(T(0, y, t) - T_a) \quad (\text{IV.21})$$

À $x = 0, H_2+H_i \leq y \leq H_2+H_i+H_a$

$$-\lambda_a \frac{dT}{dx} = h_a(T(0, y, t) - T_a) \quad (\text{IV.22})$$

À $x=0, H_1+H_2+H_a+H_i \leq y \leq H$

$$-\lambda_v \frac{dT}{dx} = h_a(T(0, y, t) - T_a) \quad (\text{IV.23})$$

IV.7.2.2 A la sortie du capteur :

À $x = 0, H_i \leq y \leq H_i + H_2$

$$\begin{cases} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{(0,y,t)} = 0 \\ P = P_{atm} \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

IV.7.2.3 A l'entrée du capteur :

À $x = 0, H_i + H_2 + H_a \leq y \leq H_i + H_2 + H_a + H_1$

$$\begin{cases} v(0, y, t) = 0 \\ u(0, y, t) = u_{in} \\ T(0, y, t) = T_a \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

Pour la région de Tlemcen, on trouve que la température ambiante moyenne durant le mois de juillet est de l'ordre de 33°C. La valeur maximale du rayonnement solaire durant cette période peut atteindre 700w/m².

IV.8 L'équation de la variation de l'intensité solaire en fonction de temps [53]

La figure IV.2 présente la variation de l'intensité solaire en fonction du temps. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

$$G_{\text{sun}}(\tau) = \widehat{G}_{\text{sun}} \sin\left(\frac{\tau-a}{b-a} \pi\right), \quad a < \tau < b \quad (\text{IV.26})$$

\widehat{G}_{sun} : L'irradiation solaire maximal = 700 W/m^2

τ : Le temps en heure

a : Heure de lever de soleil = 6h

b : Heure de coucher de soleil = 20h

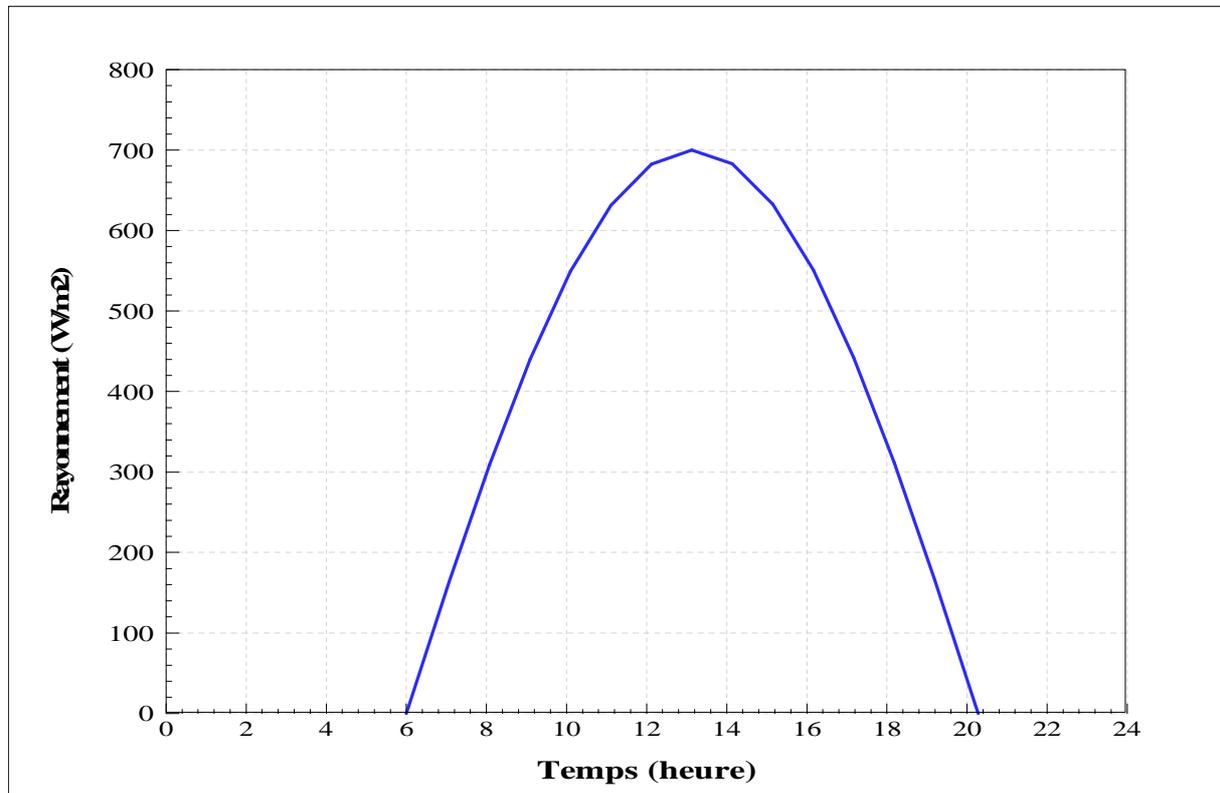


Figure IV.2 : La variation de l'intensité solaire en fonction du temps.

IV.9 L'équation de la variation de température ambiante en fonction du temps

[53]

La figure IV.3 présente la variation de la température ambiante en fonction du temps. Cette variation est modélisée mathématiquement par l'équation empirique suivante :

$$T_{\text{ao}}(\tau) = \bar{T}_{\text{ao}} + \bar{T}_{\text{ar}} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) \quad (\text{IV.27})$$

\bar{T}_{ao} : température ambiante moyenne = 33°C

\bar{T}_{ar} : amplitude de température = 6°C

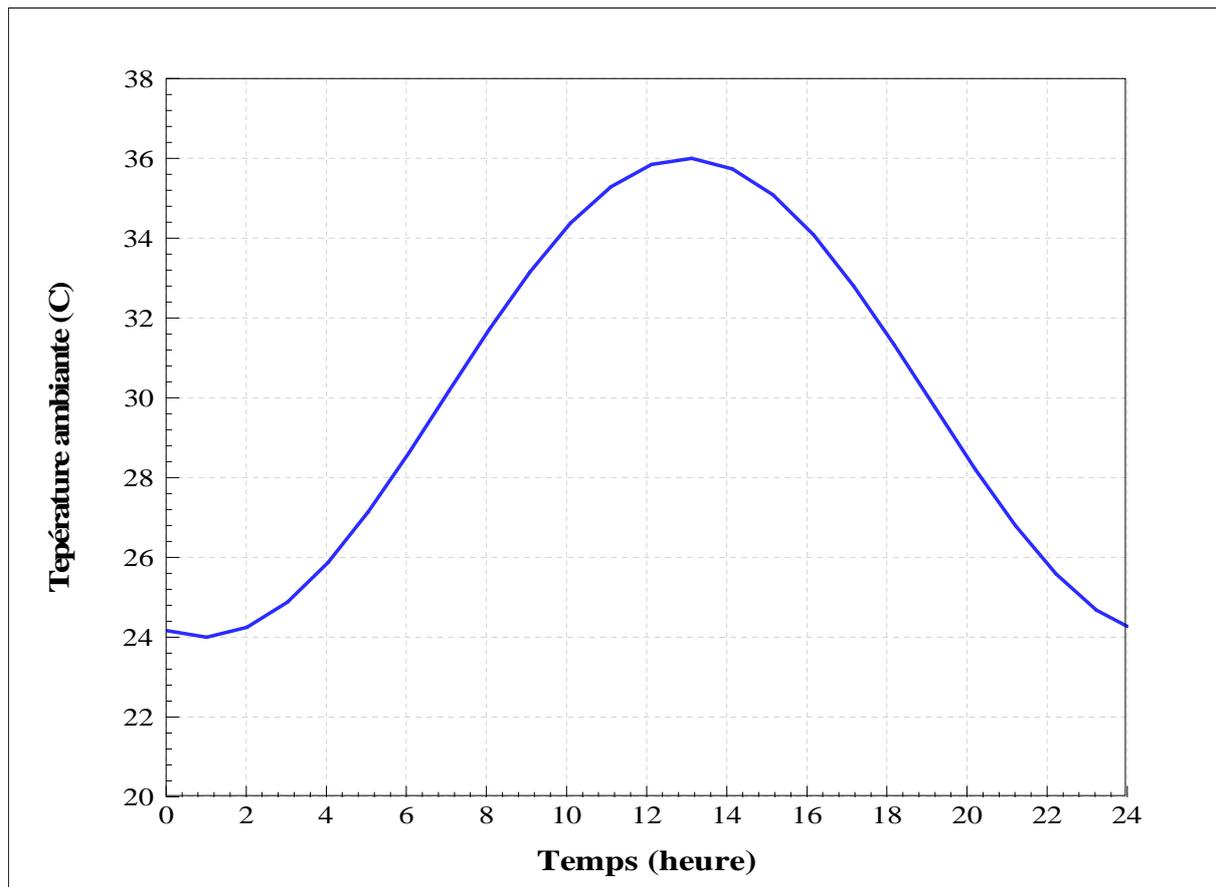


Figure IV.3 : La variation de la température ambiante en fonction du temps.

IV.10. Efficacité thermique du capteur solaire

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

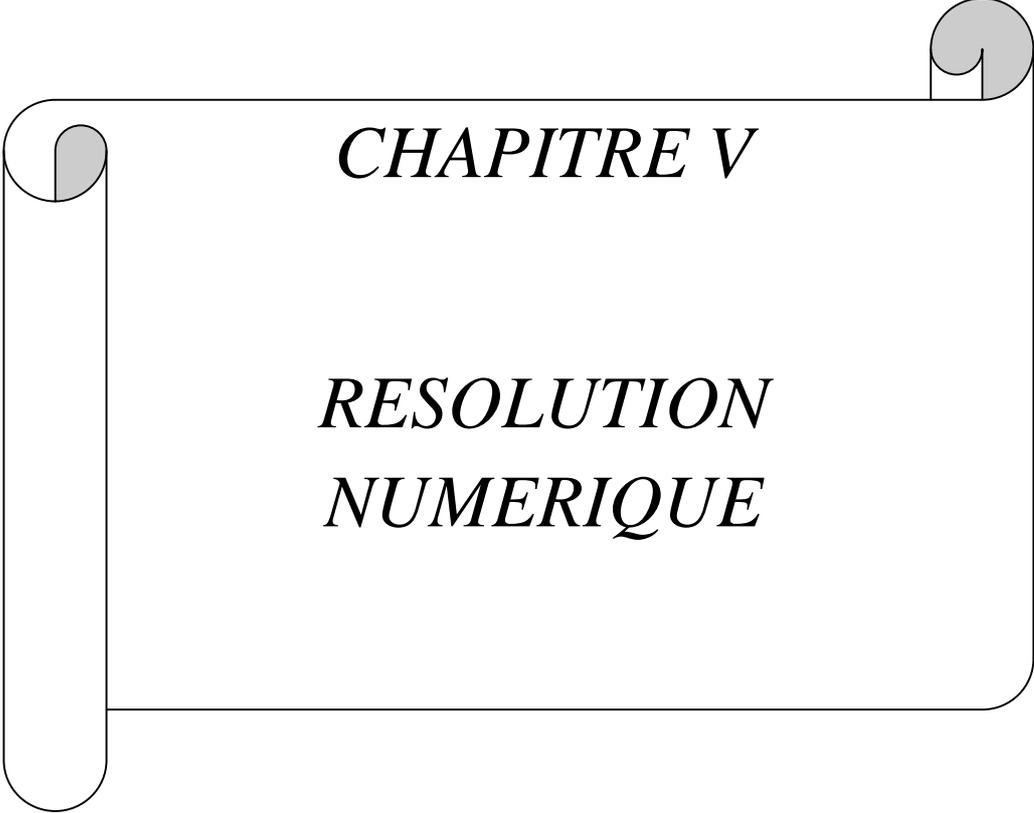
$$\eta = \frac{GfC_f(T_s - T_e)}{IA} \quad (\text{IV.28})$$

IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la géométrie du problème ainsi que les propriétés physiques des différents composants du capteur solaire. Ensuite, nous avons spécifié les équations mathématiques gouvernantes qui régissent le phénomène d'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux. Enfin, nous avons spécifié les conditions aux limites de toutes les frontières de la géométrie.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes étapes de simulation sur Fluent avec des illustrations afin de mieux expliquer la méthode.





CHAPITRE V

*RESOLUTION
NUMERIQUE*

V.1 Introduction

La prédiction du transfert thermique et des phénomènes qui ont lieu à l'écoulement des fluides peut être obtenue par trois méthodes : l'expérience, le calcul théorique et le calcul numérique. Dans ce chapitre, on va présenter le calcul numérique et ses étapes pour résoudre numériquement un problème d'écoulement d'un fluide.

V.2 Le calcul numérique (modélisation et simulation)

Le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation dans un système d'équations algébriques.

V.2.1 Principe du calcul numérique

Le principe du calcul numérique est illustré à la figure (VI.1).

Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

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

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

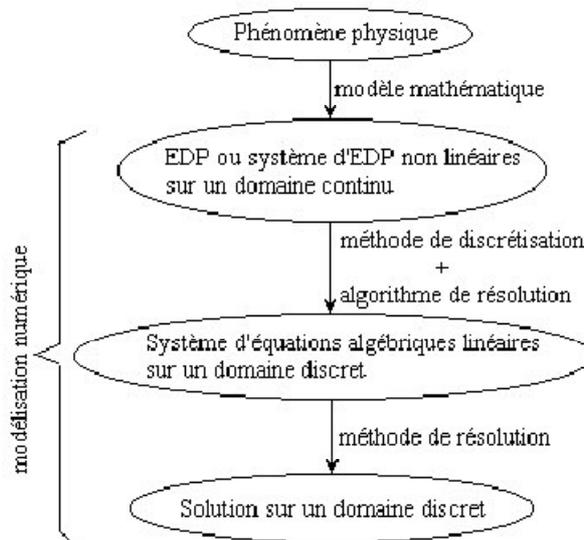


Figure (V.1): Le principe du calcul numérique.

Avantages

Le calcul numérique :

- Permet le calcul d'une solution numérique pour presque tous les problèmes pratiques ayant un modèle mathématique ;
- A un coût très faible, ayant une tendance à la baisse ;
- Présente de la rapidité (permet de modifier la géométrie, les conditions aux limites, etc...)
- Présente une information complète sur tous les champs, tous les points et à tout instant ;
- A la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles ;
- A la possibilité de simuler des conditions idéales.

Inconvénients

- Tout dépend du modèle mathématique initial ;
- Difficulté pour sélectionner la "bonne" solution en cas de solutions multiples au problème mathématique ;
- Parfois, plus coûteux que l'expérience.

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

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

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

Ses avantages

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

Ses inconvénients

- Moins précis que les méthodes spectrales.

L'algorithme numérique a les pas suivants :

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

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

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

Ainsi, un élément de volume de contrôle est défini autour de chaque nœud. Les grandeurs scalaires pression et température sont stockées dans le nœud P du maillage, figure (V.2), tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockées aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires et les équations de quantité de mouvement sont intégrées sur le volume de contrôle associé aux composantes de vitesse.

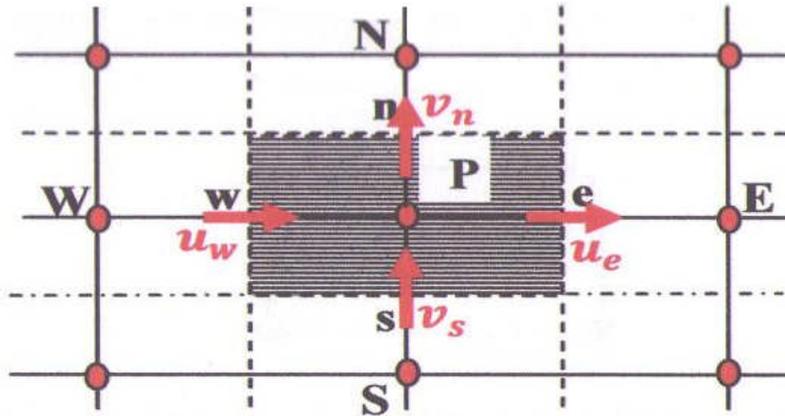


Figure (V.2): Schéma du maillage.

V.2.2.2 L'équation de transport

Pour ne pas refaire la discrétisation pour chaque équation, il est important de regrouper toutes les équations sous une forme générale dite équation de transport qui s'écrit comme suit:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_I + \sum_{j=1} \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi)}_{II} = \sum_{j=1} \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)}_{III} + \underbrace{S_\phi}_{IV} \quad (V.1)$$

Où:

I: Terme transitoire.

II: Terme convectif.

III: Terme diffusif.

IV: Terme source.

ϕ : Variable étudiée.

Γ : Coefficient de diffusion.

S_ϕ : Terme source.

Si on fait la sommation des flux convectifs et diffusifs sous le terme :

$$J_j = \rho u_j \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (V.2)$$

L'équation de transport précédente peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \sum \frac{\partial}{\partial x_j} J_j = S_\phi \quad (V.3)$$

L'équation différentielle générale dans le cas 2D instationnaire est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \quad (V.4)$$

V.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**

V.3.1 Présentation du logiciel Gambit

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

- 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 ».

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.

V.3.1.1 Description du panel général

Le panel général de Gambit est divisé en 6 parties (figure suivante) :

- une zone graphique, qui donne accès à une liste de menus (*files, edit, solver*) ;
- un panel relevant différentes informations comme les actions réalisées et leurs résultats (*Transcript*) ;
- un panel permettant d'insérer des commandes directement (*command*) ;
- un panel *Description* qui donne les définitions des différents boutons ;
- le panel *Global Control* permet entre autre, de zoomer, de changer de repère, de vérifier les maillages ;
- le dernier panel (*Operation*) au dessus de Global Control contient les boutons permettant le dessin et le maillage des pièces ou domaines.

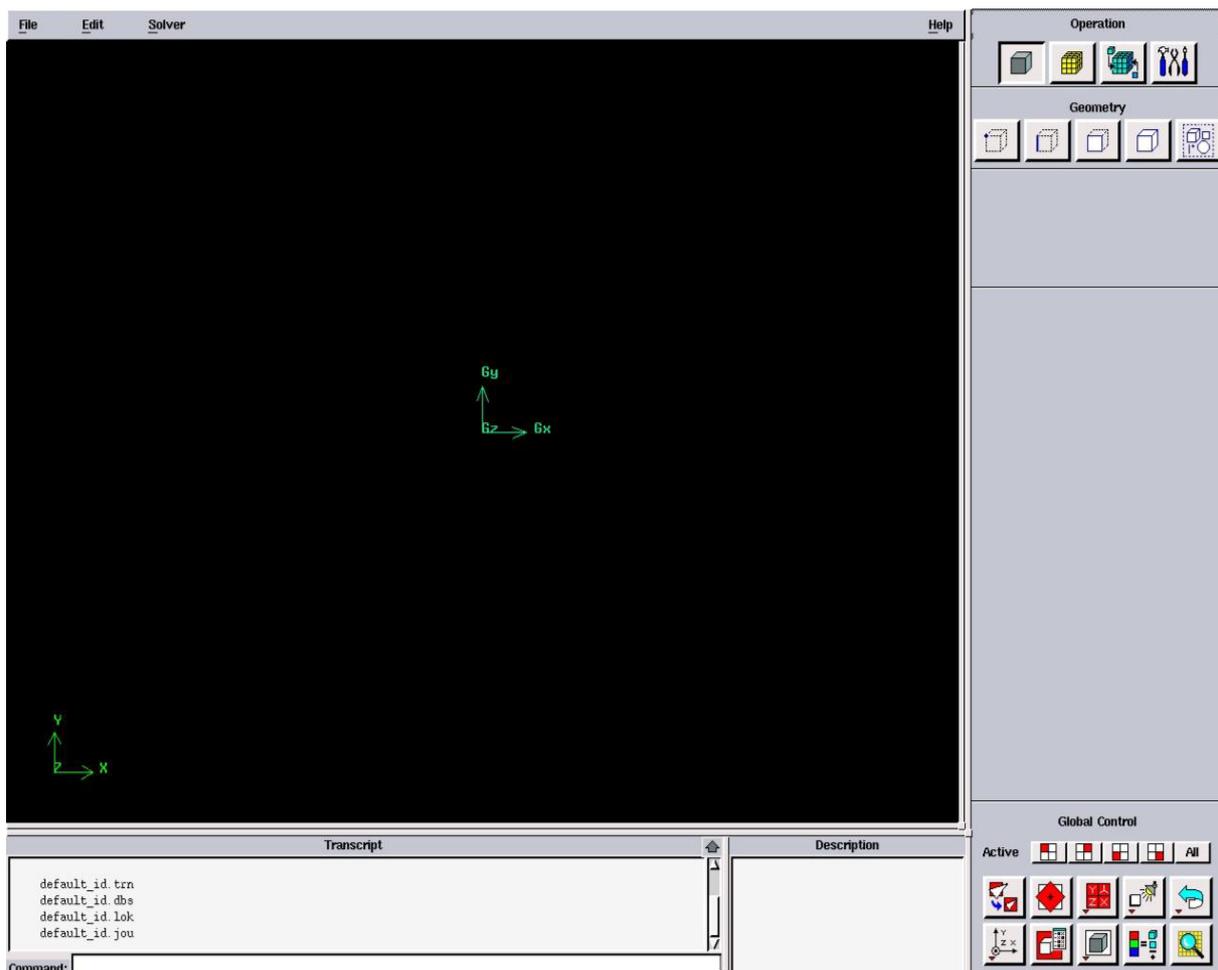


Figure (V.3) : panels généraux du logiciel Gambit.

V.3.1.2 Maillage de la géométrie

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ces paramètres sur la solution calculée.

V.3.1.2.1 Choix de type de maillage

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 :

- Difficile à les générer dans le cas d'une géométrie complexe ;
- Difficile d'obtenir une bonne quantité de maillage pour certaines géométries complexes.

b) Maillage non structuré (Tri/Tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant 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 maille comparativement au maillage structuré ;
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes 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.

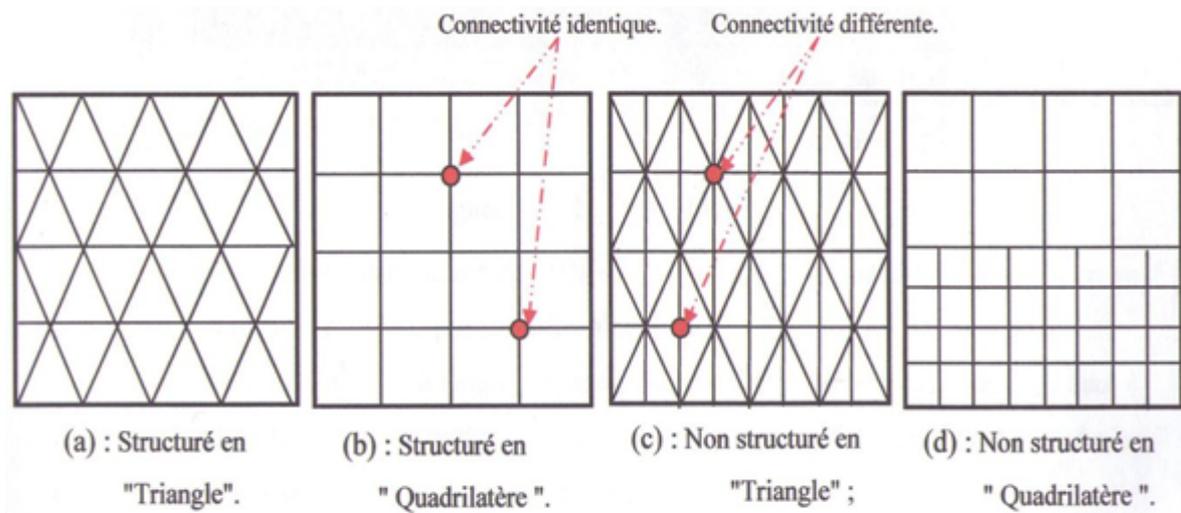


Figure (V.4): Exemple de maillage

V.3.1.2.2 Techniques générales de génération du maillage

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- 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).

V.3.1.2.3 Qualité du maillage

La génération d'une très bonne qualité du maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- ✓ Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais) ;
- ✓ Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc...etc.)

Enfin, la qualité de maillage à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout le temps de calcul.

V.3.1.3 Conditions aux limites et définition de domaine

Toutes les limites doivent être définies, et elles doivent l'être à partir des nœuds (NODE). Un bon moyen de vérification est d'ouvrir le fichier .neu et de regarder si la section qui définit les limites est constituée d'un tableau à une colonne ou d'un tableau à trois colonnes. Dans le dernier cas, les limites sont mal définies.

Dans le cas multibloc, les interfaces entre les blocs doivent être définies en premier dans une limite unique. L'utilisateur doit adapter la géométrie aux conditions limites, un segment en 2D (resp. une surface en 3D) 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. En 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 (*Mass flow Inlet*ou), et une pression à la sortie, la condition utilisée a été (*Pressure Outlet*).

V.3.2 Présentation du code FLUENT

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans transfert thermique. Le logiciel « Fluent » utilise la méthode des volumes finis. Il est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un seul PC de travail ou sur des machines en 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 :

- 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.

V.3.2.1 Interface du code Fluent

La première chose à faire quand vous entrez sous fluent est de choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D, figure suivante. Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier .msh) et ce en suivant la procédure suivante : File → Import → case.

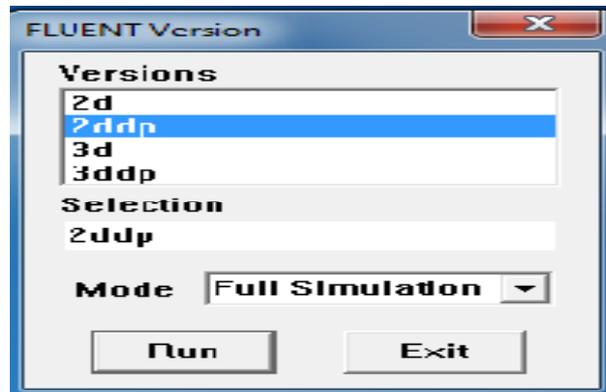


Figure (V.5): Type de résolution

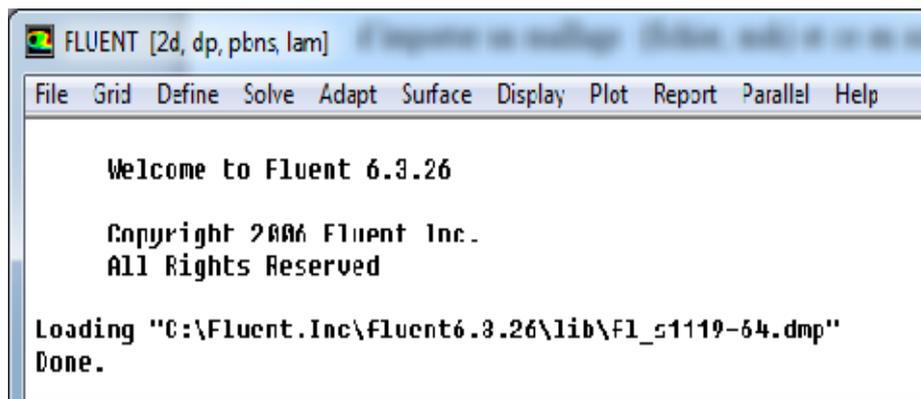


Figure (V.6): Vue globale de Fluent.

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite :

- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde, importation...etc ;
- **Grid** : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie ;
- **Define** : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites ;
- **Solve** : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisations, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul ;
- **Adapt** : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres ;
- **Surface** : pour créer des points, des lignes et des plans nécessaires à l'affichage des résultats;

- **Display et plot** : pour l'exploitation des résultats ;
- **Report** : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité ;
- **Parallèle** : pour le calcul parallèle ;
- **Help** : pour l'exploitation du contenu du code.

V.3.2.2 Résolution du problème avec le code FLUENT:

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme suit:

1^{ère} étape (choix du type de solveur): dans cette étape, on a choisi le solveur segregated-implicit parmi les quatre types que FLUENT nous offre, puisque l'approche segregated offre de la souplesse dans le traitement de la solution et nécessite moins de mémoire. A la fin de cette étape, on fait le choix du type d'écoulement.

2^{ème} étape (choix des matériaux): ici on fait le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon il faut les introduire selon nos besoins.

3^{ème} étape: introduction des conditions de fonctionnement (ici la pression, la température, la gravité).

4^{ème} étape (imposer les conditions aux limites): pour cette étape, FLUENT nous offre une option qui permet à l'utilisateur d'imposer ses conditions aux limites et de définir les matériaux de chaque partie du domaine.

5^{ème} étape (choix du schéma de discrétisation): pour la pression, on a choisi (Body Force Weighted) puisque c'est le schéma recommandé dans les cas où l'effet des forces de gravité sont importantes. Mais pour les équations de quantité de mouvement et de l'énergie le schéma « Upwind » avec une précision du 2nd ordre, est fortement recommandé dans les écoulements de dominance convective.

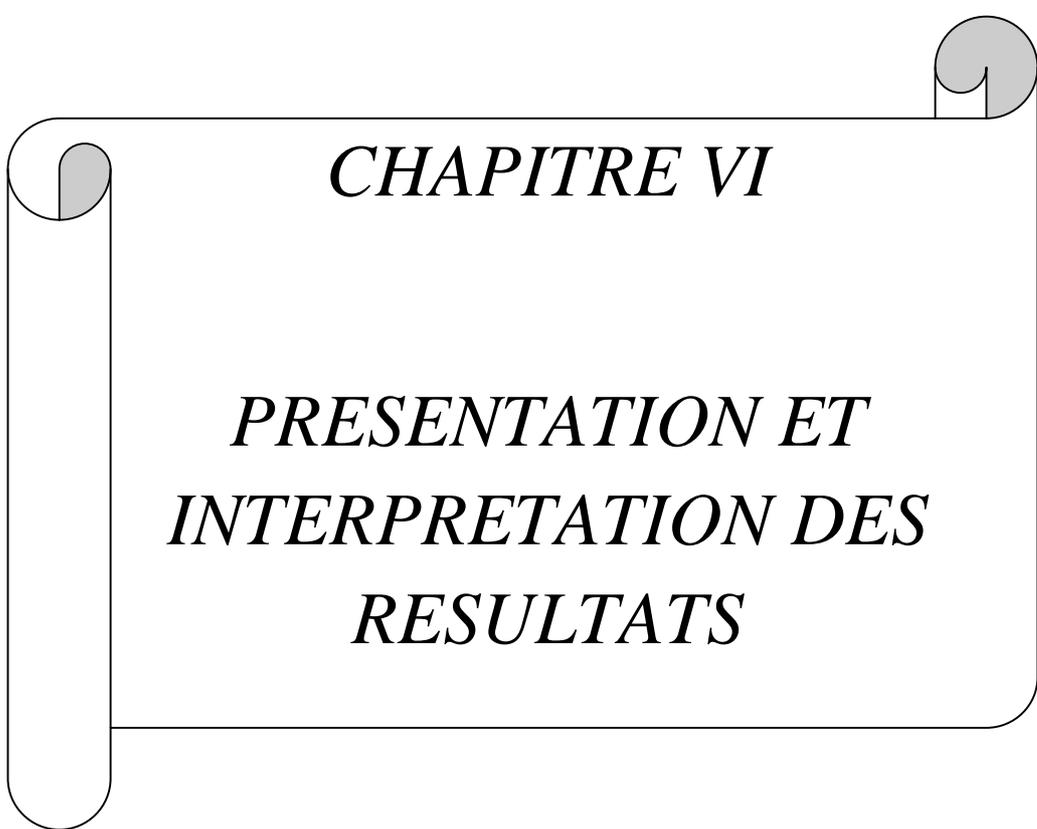
6^{ème} étape (choix des facteurs de sous relaxation): les facteurs de sous relaxation sont très importants pour la stabilisation du processus itératif, ils varient dans l'intervalle [0, 1].

7^{ème} étape (initialisation): il est nécessaire d'initialiser toutes les variables avant de commencer les calculs.

8^{ème} étape (itération): pour lancer le calcul.

V.4 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une généralité sur le calcul numérique et ses étapes utilisant pour résoudre numériquement un problème d'écoulement d'un fluide dans un capteur solaire. Dans le chapitre suivant, Nous présenterons les résultats obtenues de la simulation numérique et leurs interprétations.



CHAPITRE VI

*PRESENTATION ET
INTERPRETATION DES
RESULTATS*

VI.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats de l'étude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe sans et avec milieu poreux. L'objectif de notre travail est de voir l'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire dans les deux cas, stationnaire et instationnaire. La simulation numérique par le code de calcul Fluent permet d'obtenir l'évolution des températures des différents composants du capteur solaire (le vitrage, l'air dans le premier et le deuxième canal, l'absorbeur et l'isolation) et les profils de vitesse dans les différentes sections dans les deux canaux.

VI.2 Validation du modèle numérique

La comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux et théoriques de **Sopian et al [33]** est présentée dans la figure (VI.1). La figure montre la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'air en fonction du débit massique.

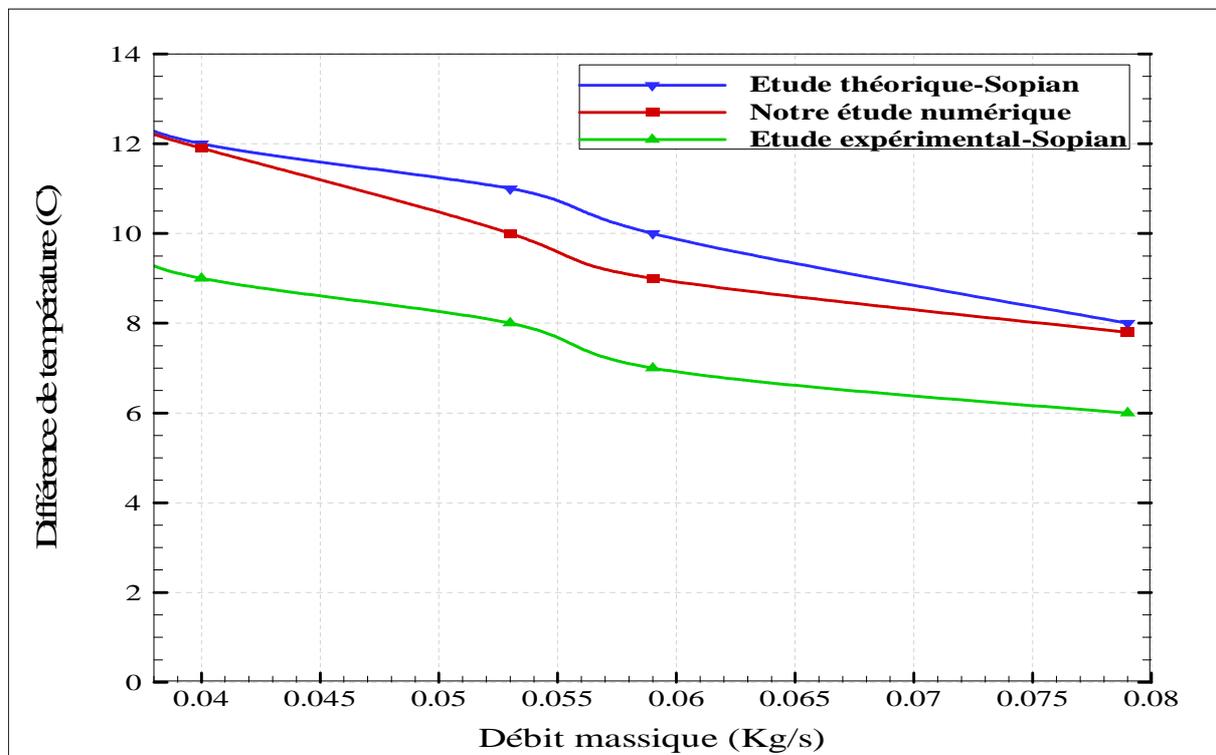


Figure VI.1 : Comparaison entre les résultats numérique et les résultats expérimentaux et théoriques de **Sopian et al.**

On remarque que nos résultats numériques trouvés sont assez proches aux résultats théoriques et expérimentaux donnés par **Sopian et al [33]**. Cela apporte une validité au modèle numérique développé et sa précision. Toutefois, on peut voir clairement la bonne précision de notre modèle par rapport à celui de Sopian. Le modèle développé par ce dernier est basé sur des bilans énergétiques appliqués aux différents composants et ne tient pas compte de l'effet dynamique de l'écoulement.

VI.3 Cas stationnaire

VI.3.1 Etude dynamique

VI.3.1.1 Présentation du contour de la vitesse axiale

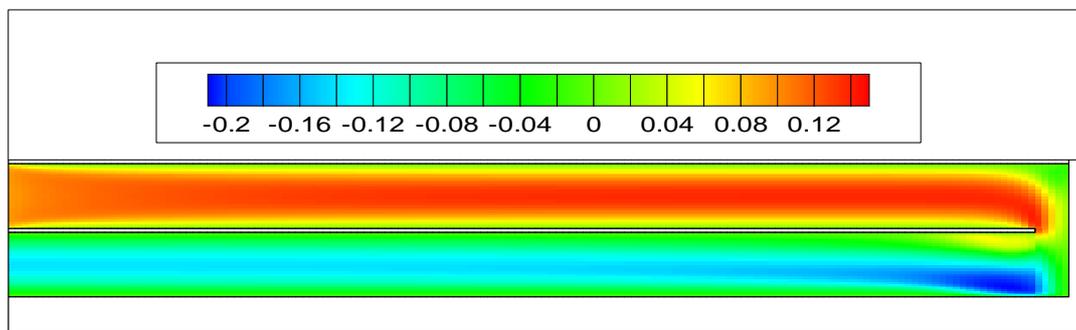


Figure VI.2 : Contour de la vitesse axiale.

La figure VI.2 montre les contours des vitesses axiales pour un débit d'entrée égale à 0.008kg/s. Les vitesses axiales de l'air dans le premier passage sont plus élevées par rapport aux vitesses dans le deuxième passage et la vitesse prend la valeur maximale au centre de la conduite et devient nulle aux cotés des parois.

VI.3.1.2 Présentation du contour des lignes de courant

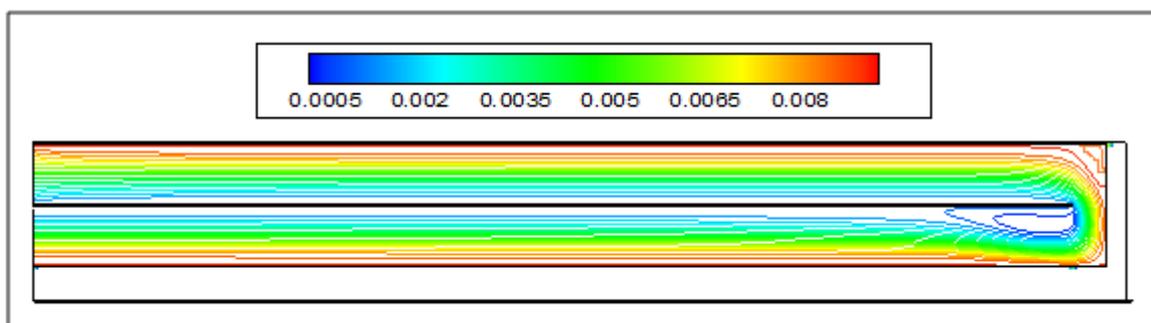


Figure VI.3 : Contour des lignes de courant.

La figure VI.3 montre les lignes de courant pour un débit d'entrée égale à 0.008 kg/s. On remarque la présence de deux zones de recirculation, une première dans le coin supérieur du capteur (au dessous de l'extrémité du vitrage) et une deuxième au dessous de l'extrémité droite de l'absorbeur. Ces zones sont générées par la présence d'une singularité dans l'écoulement du fluide.

VI.3.1.3 Profils de la vitesse axiale

On propose de choisir quatre sections : $x = 0.5\text{m}$; $x = 1\text{m}$; $x = 2\text{m}$ et $x = 2.17\text{m}$ pour tracer et comparer la variation du profil de la vitesse.

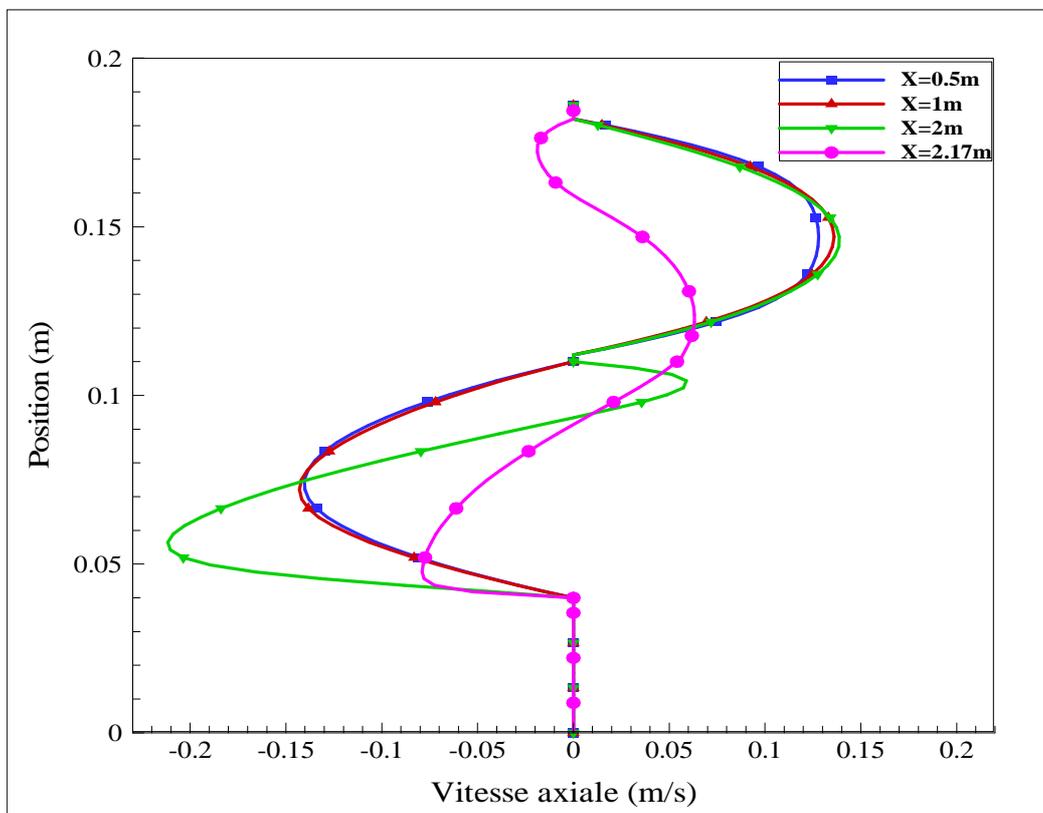
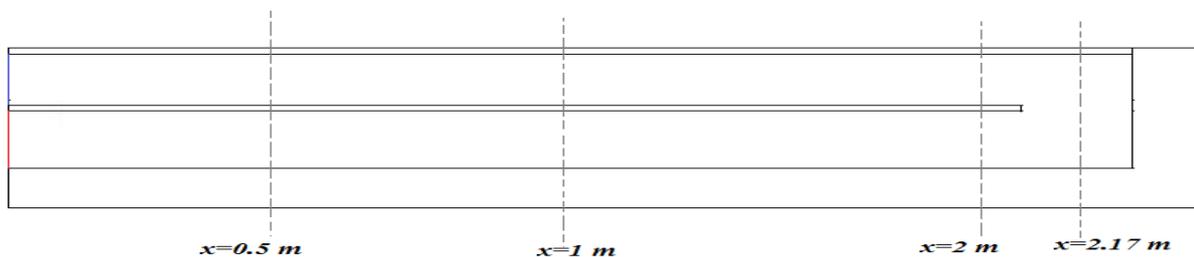


Figure VI.5 : Profil de la vitesse axiale pour les différentes sections.

La figure VI.5 montre l'évolution de la vitesse axiale dans les sections choisies du capteur solaire utilisant un débit de 0.008 Kg/s. On remarque que, la vitesse axiale dans le premier passage est presque uniforme dans toutes les sections, mais elle a diminuée dans la zone où le fluide change son sens d'écoulement (à $x=2.17\text{m}$) vers le canal inférieur. Dans cette région, on remarque des valeurs négatives de vitesse axiale montrant la présence d'une zone de recirculation du fluide à cause de retour des particules fluide. Dans le deuxième passage, on remarque qu'il a des valeurs positives de vitesse axiale (à $x=2\text{m}$). Ces valeurs reflètent la présence d'une autre zone de recirculation juste au dessous de l'extrémité de l'absorbeur qui est causée par l'orientation de l'écoulement d'air vers le deuxième passage avec des grandes vitesses.

VI.3.1.4 Influence du débit sur la vitesse axiale

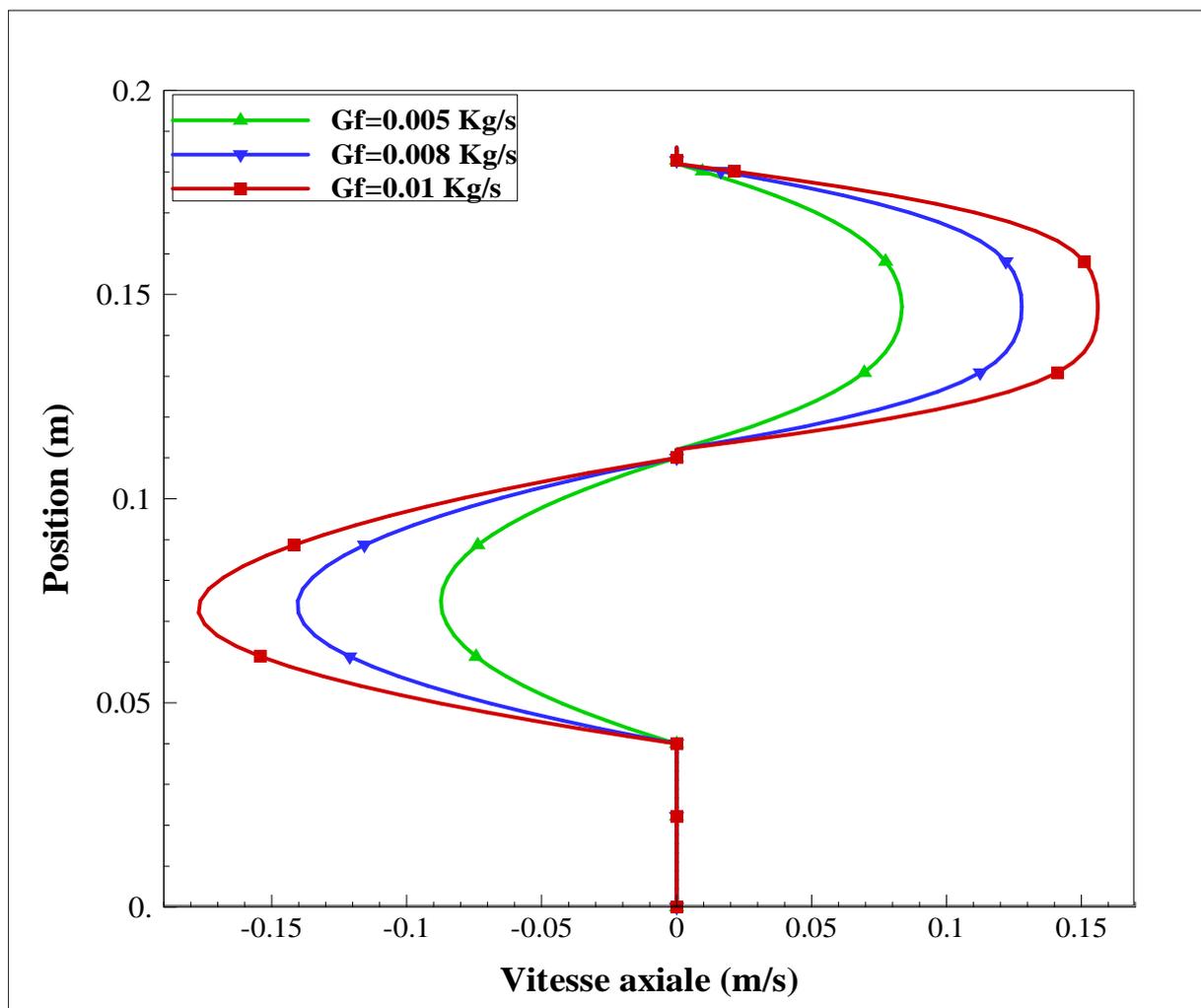


Figure VI.6 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 0.5\text{ m}$.

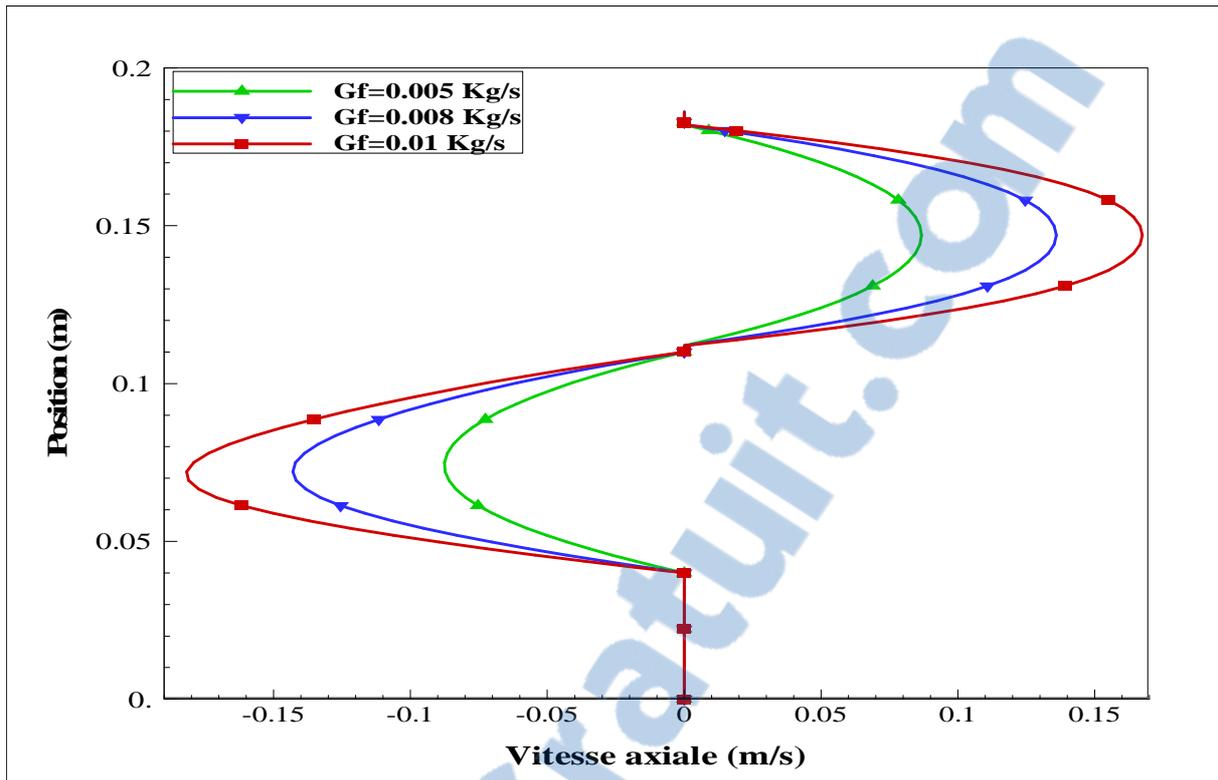


Figure VI.7 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 1$ m.

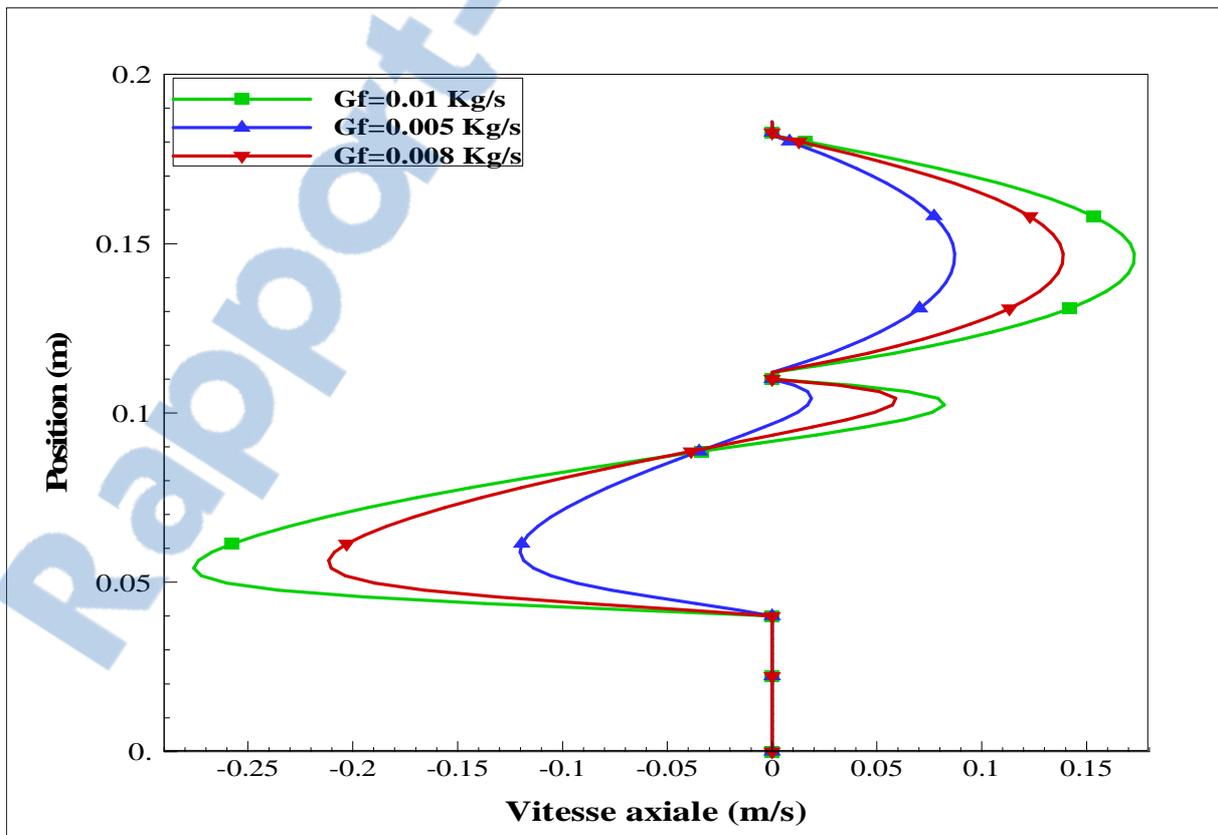


Figure VI.8 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 2$ m.

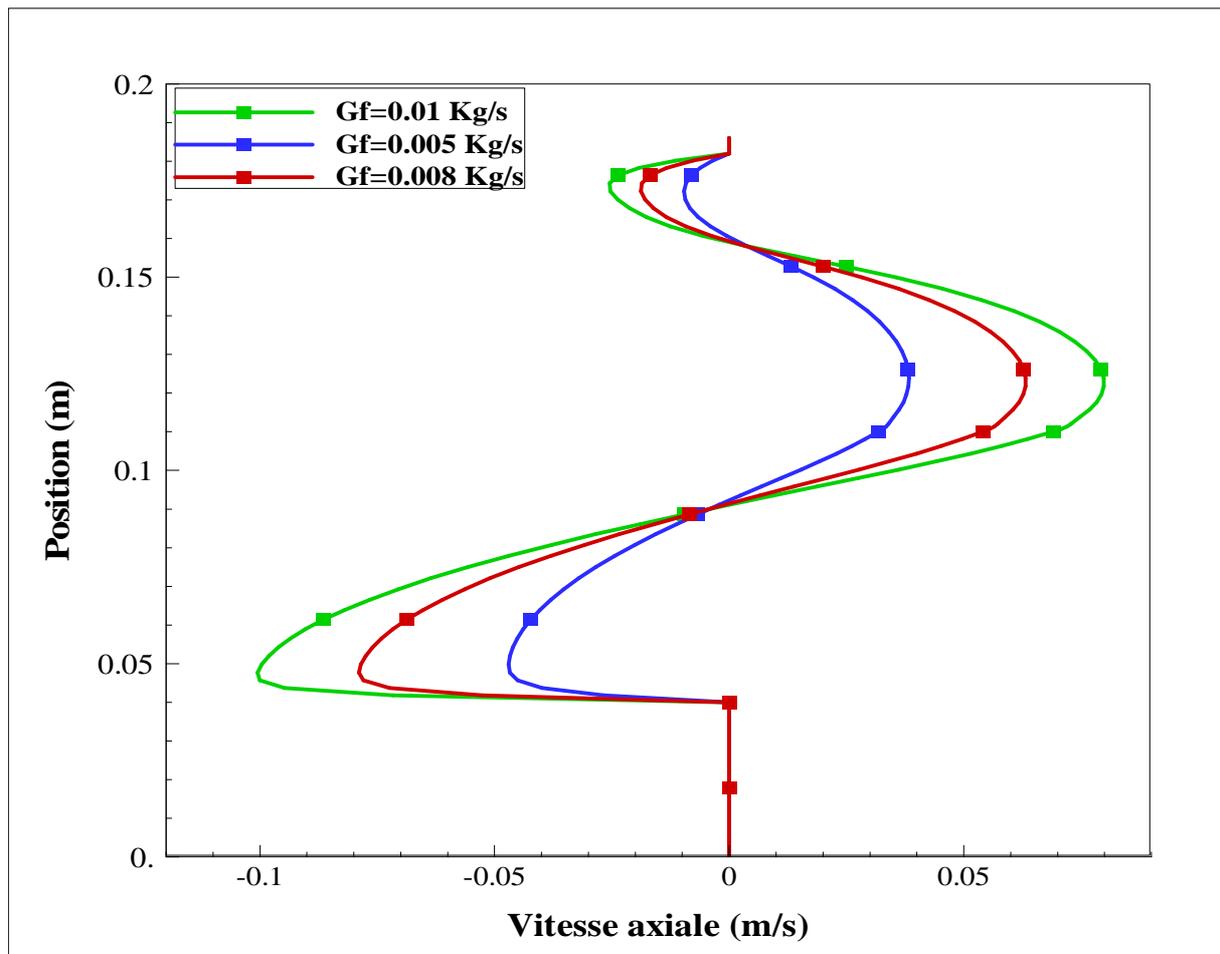


Figure VI.9 : Effet de variation du débit sur le profil de la vitesse axiale pour $x = 2.17\text{m}$.

Les figures VI.6, VI.7, VI.8 et VI.9 montrent l'influence du débit sur le profil de la vitesse axiale. On remarque qu'avec l'augmentation du débit, l'écoulement d'air s'accélère dans les deux passages du capteur solaire et, par conséquent, une augmentation au niveau de la vitesse axiale. Alors, on remarque qu'il y a une proportionnalité entre l'augmentation du débit d'air et la vitesse axiale. L'augmentation du débit influe aussi sur la taille de la zone de recirculation, parce qu'elle provoque l'accélération de l'écoulement qui augmente la taille des zones de recirculation.

VI.3.1.5 Profils de coefficient de friction

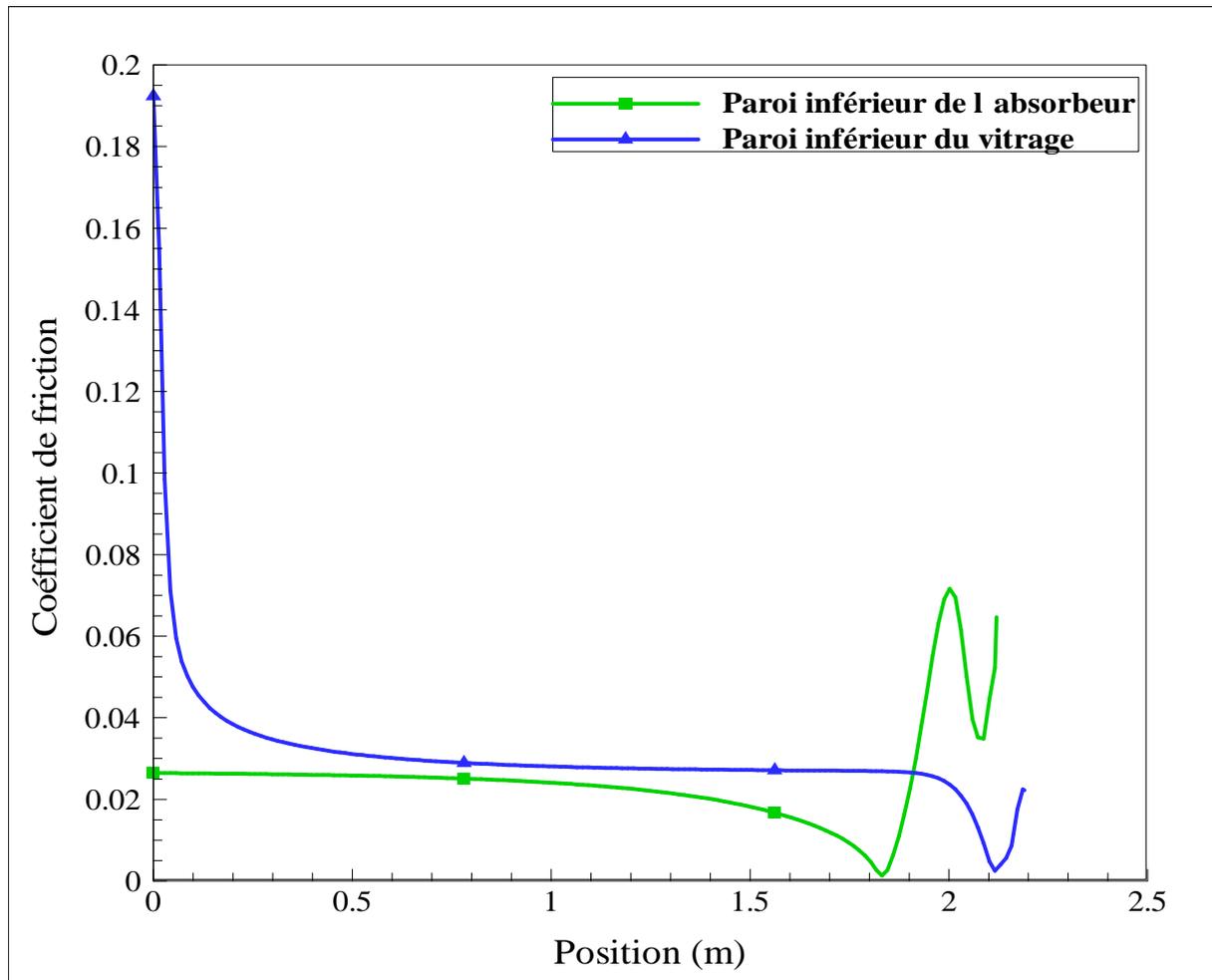


Figure VI.10 : Variation du coefficient de friction le long des parois inférieure du vitrage et de l'absorbeur pour $G_f=0.008\text{Kg/s}$.

La figure VI.10 montre la variation du coefficient de friction le long des parois inférieures du vitrage et de l'absorbeur. On remarque que les valeurs les plus élevées du coefficient de friction se trouvent :

1. à l'entrée du capteur solaire où l'air entre avec une grande vitesse et le frottement avec les parois du capteur est important
2. et au dessous de l'extrémité de l'absorbeur dans la zone arrondi à cause de la recirculation du fluide.

On remarque aussi que les faibles valeurs du coefficient de friction se trouvent le long du canal vu l'absence des obstacles.



VI.3.1.6 Influence du débit sur le profil du coefficient de friction

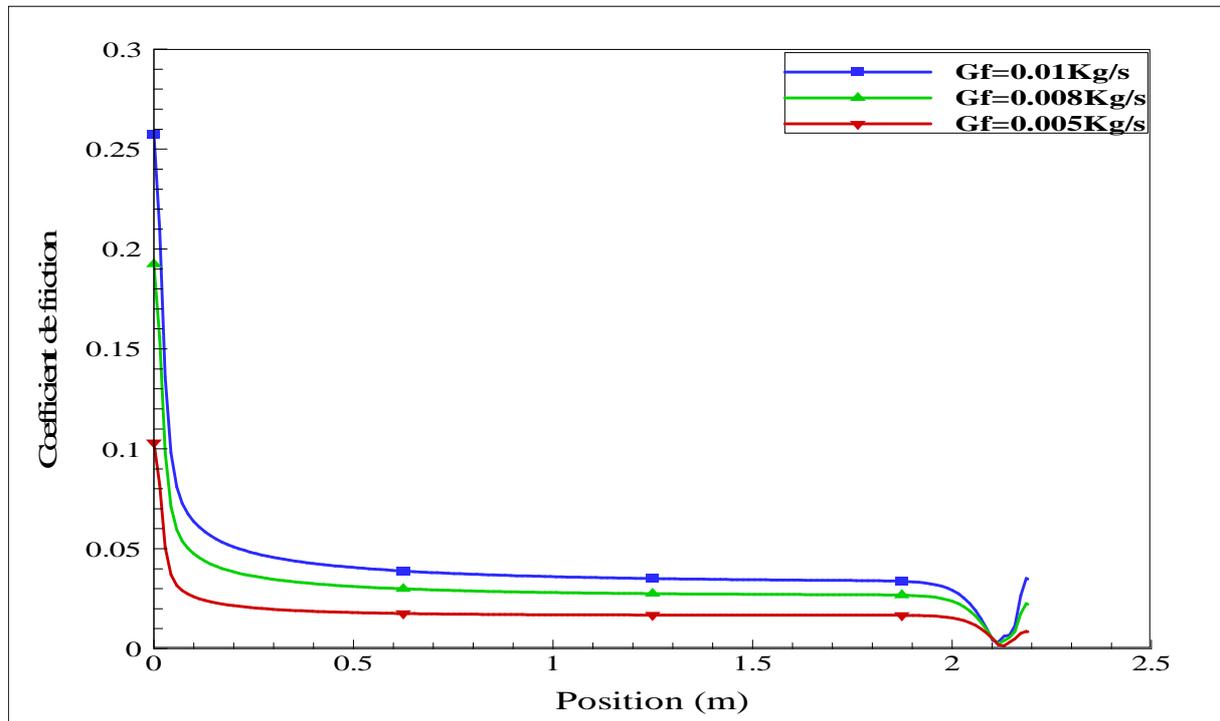


Figure VI.11 : Effet de variation du débit sur le profil du coefficient de friction dans la paroi inférieure du vitrage.

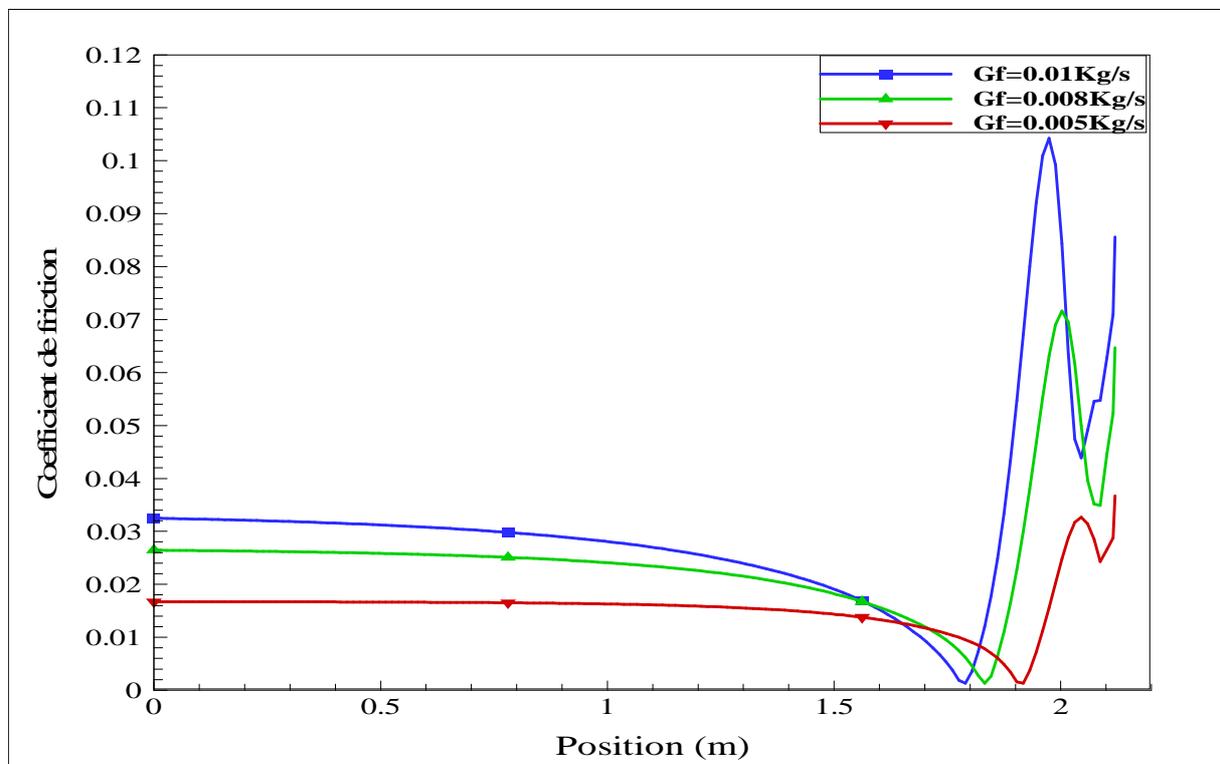


Figure VI.12 : Effet de variation du débit sur le profil du coefficient de friction dans la paroi inférieure de l'absorbeur.

Les figures VI.11 et VI.12 montrent l'influence de l'augmentation du débit sur le profil du coefficient de friction le long des parois inférieures du vitrage et de l'absorbeur. On remarque que l'augmentation du débit provoque l'augmentation de la vitesse des particules fluides qui entraînent des frottements entre les particules fluides et les parois inférieures du vitrage et de l'absorbeur, et par conséquent, l'augmentation du coefficient de friction. On remarque dans la figure VI.12 qu'il a des pics de coefficient de friction. Ces pics caractérisent les zones de recirculation où les frottements sont très élevés et qui sont dues à la présence de l'arrondi qui change brutalement le sens d'écoulement de l'air.

VI.3.2 Etude thermique :

VI.3.2.1 Présentation du contour de température

VI.3.2.1.1 Sans milieu poreux :

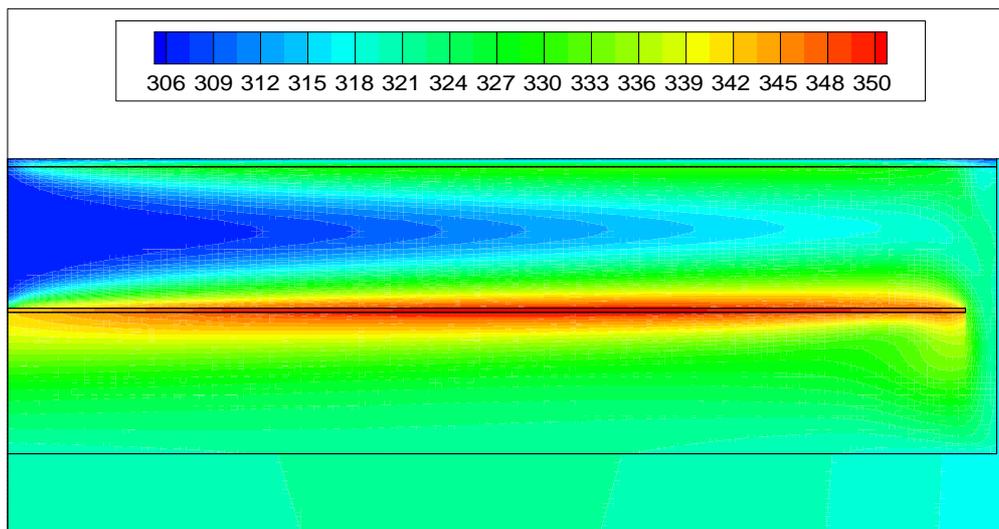


Figure VI.13 : Distribution de champ de température dans le capteur solaire à double passes sans milieu poreux.

La figure VI.13 présente le champ de température dans le capteur solaire à double passe sans milieu poreux pour un débit de 0.008 Kg/s et un rayonnement solaire de 500W/m². On observe que la température de l'air augmente dans la conduite supérieure dans le même sens des x par l'effet de la température du vitrage et de l'absorbeur et augmente dans le sens inverse des x dans la conduite inférieure par l'effet de l'absorbeur. Les zones les plus chaudes sont localisées au voisinage du vitrage et du côté de l'absorbeur.

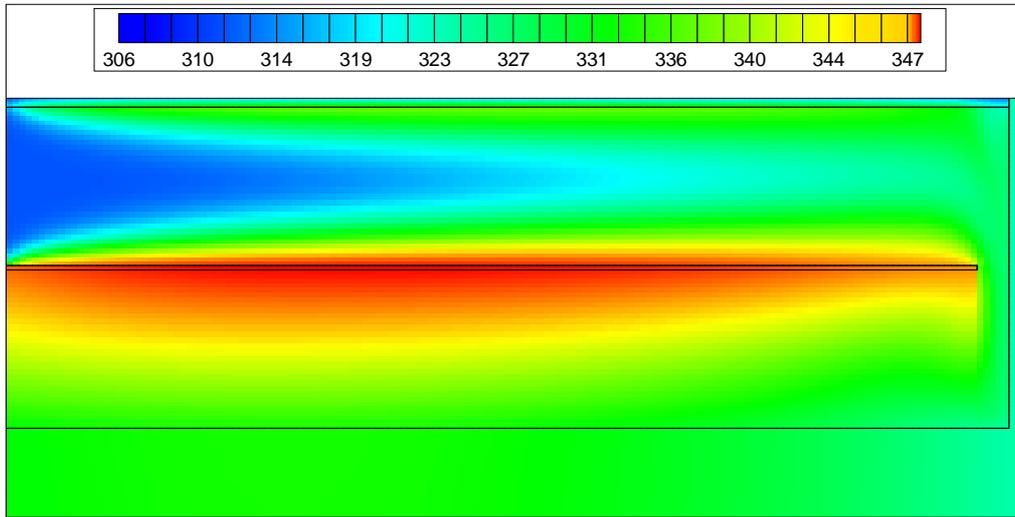
VI.3.2.1.2 Avec milieu poreux :

Figure VI.14 : Distribution de champ de température dans le capteur solaire avec milieu poreux.

La figure VI.14 présente le champ de température dans le capteur solaire à double passe avec milieu poreux pour un débit de 0.008 Kg/s et un rayonnement solaire de 500W/m^2 . On remarque que la température de l'absorbeur dans le cas du capteur solaire avec milieu poreux est plus faible que celle dans le cas sans milieu poreux, et que la température de l'air dans le canal inférieur du capteur avec milieu poreux est plus élevée que celle dans le cas sans milieu poreux. Cette augmentation de la température de l'air au niveau du canal inférieur est due à l'addition du milieu poreux qui augmente la surface d'échange thermique.

VI.3.2.2 Effet du débit massique sur les températures des composants du capteur solaire:

VI.3.2.2.1 Sans milieu poreux :

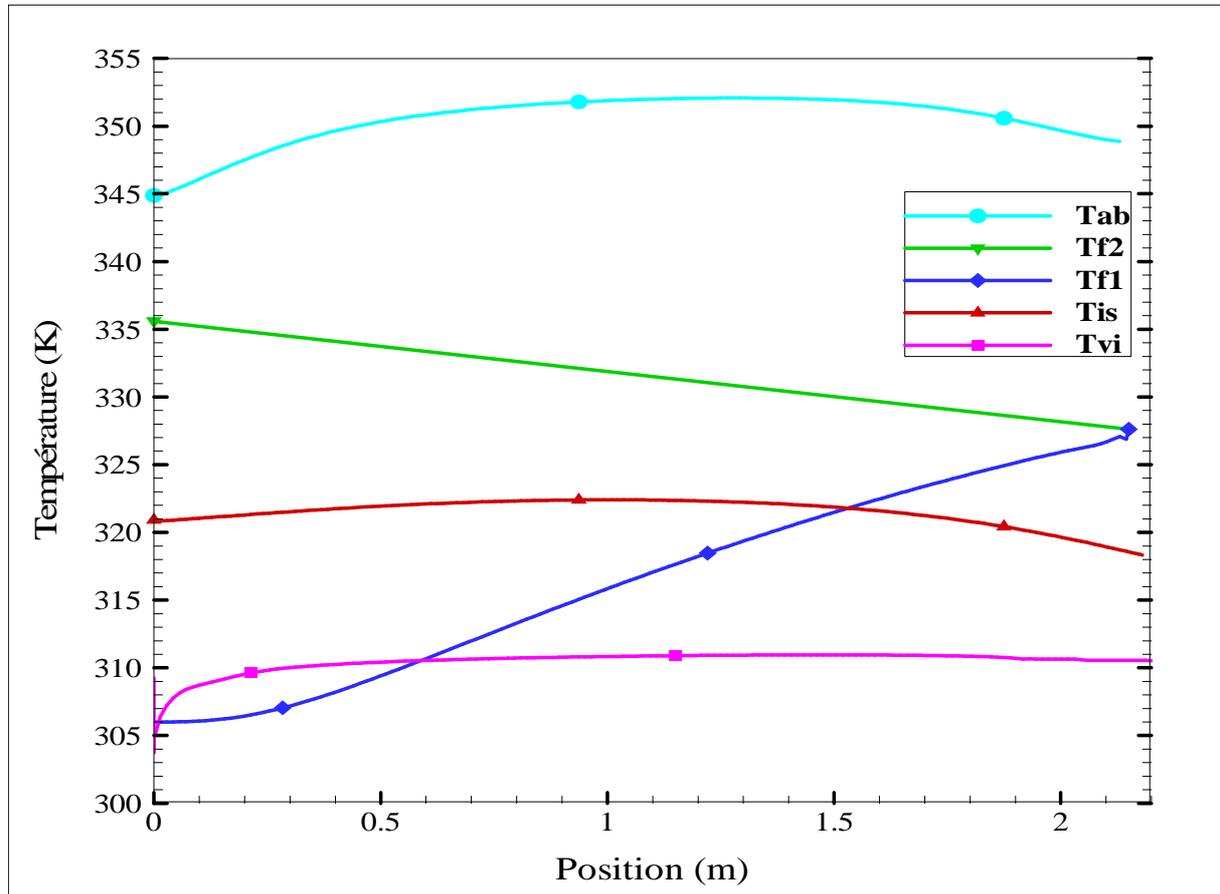


Figure VI.15 : Evolution des températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux pour $I=500\text{W/m}^2$ et $G_f = 0.005 \text{ kg/s}$.

La figure VI.15 montre la variation de température à la section centrale des différents composants du capteur solaire (l'absorbeur, le fluide dans les deux conduites, inférieur et supérieur, l'isolation, et le vitrage) en fonction de la position x . On remarque que la température de l'absorbeur est la plus grande (son température maximale atteint 352K) par rapport aux températures des autres composants du capteur. En effet, l'absorbeur absorbe la grande partie du rayonnement solaire grâce à son fort coefficient d'absorption pour chauffer le fluide dans les deux conduites. On observe aussi que la température de l'absorbeur est faible à l'entrée du capteur qui est dû au transfert de chaleur entre le fluide qui entre avec une faible

température (306K) et l'absorbeur. On peut voir une autre diminution de la température de l'absorbeur atteint 349K à son extrémité ($x = 1.9$ à 2.13m), c'est la zone dans laquelle se produit la turbulence de l'écoulement qui augmente le transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide. On remarque aussi que la température du fluide augmente dans la conduite supérieure dans le même sens des x de 306K jusqu'à 327 K par l'effet de la température du vitrage et de l'absorbeur, et elle augmente dans le sens inverse des x dans la conduite inférieure (écoulement à contre courant) de 327K jusqu'à 336K à la sortie du capteur. La température du vitrage connaît une petite diminution à l'entrée du capteur ($x = 0$ à 0.3m) due au transfert de chaleur entre le vitrage et le fluide. La température du vitrage est assez faible par rapport aux autres composantes du capteur due principalement aux pertes thermiques vers l'extérieur et à son faible coefficient d'absorption. La température de l'isolation est presque constante et assez faible par rapport à la température du fluide dans la conduite inférieure parce qu'il résiste aux pertes thermiques vers les cotés de l'absorbeur.

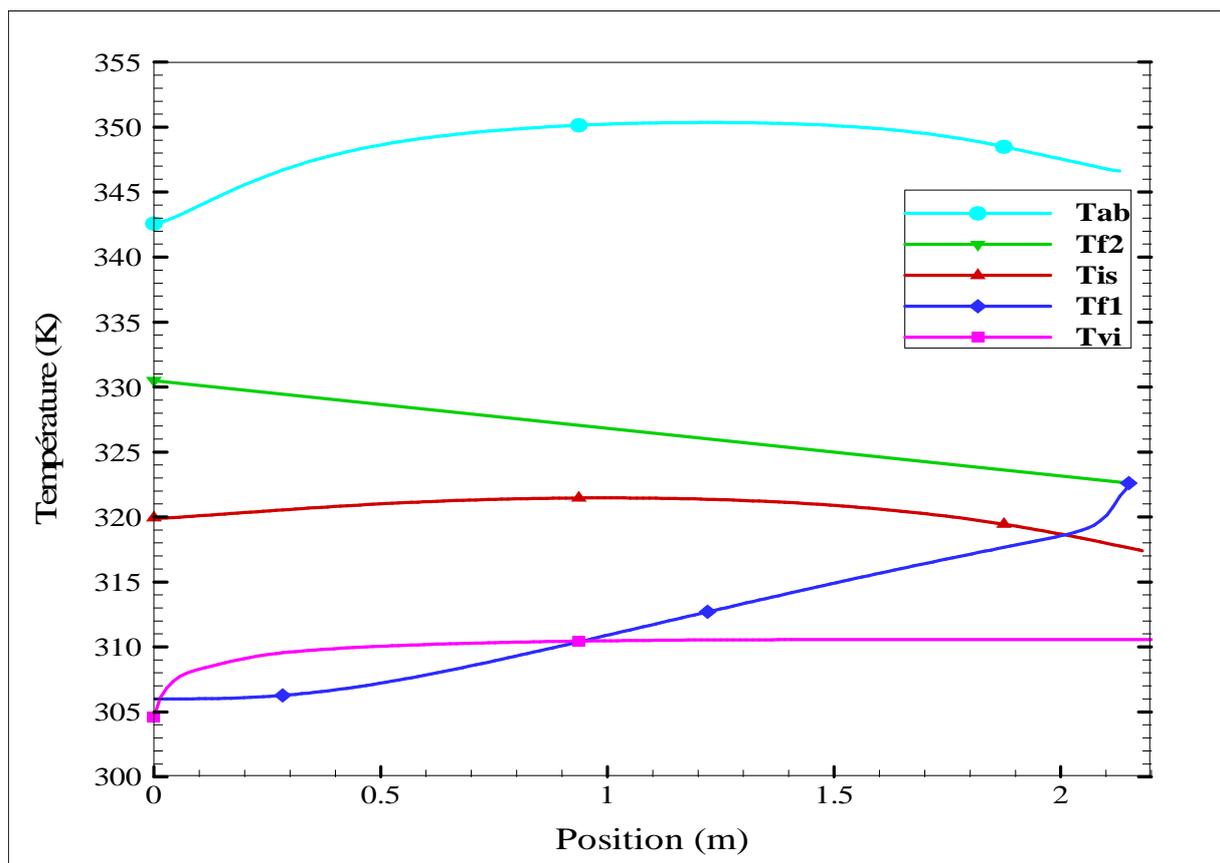


Figure VI.16 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500\text{W/m}^2$ et $G_f = 0.008 \text{ kg/s}$.

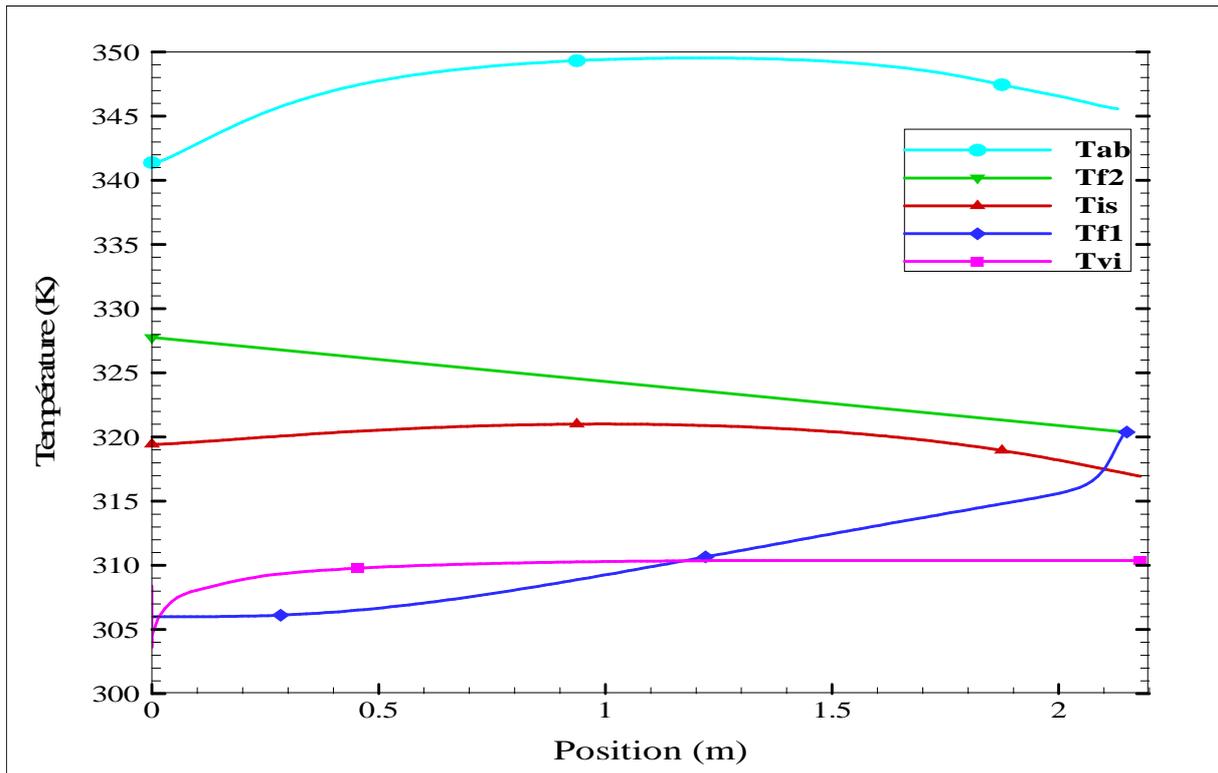


Figure VI.17 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.01 kg/s$.

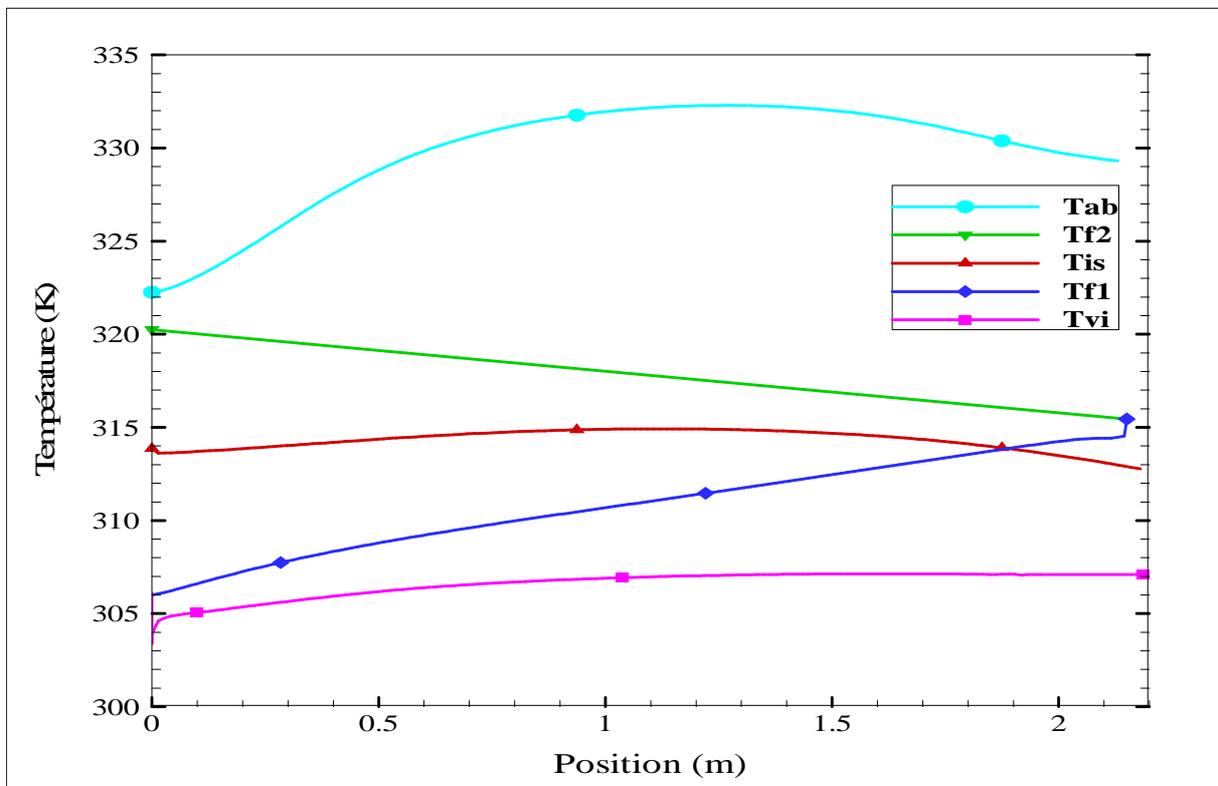


Figure VI.18 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.04 kg/s$.

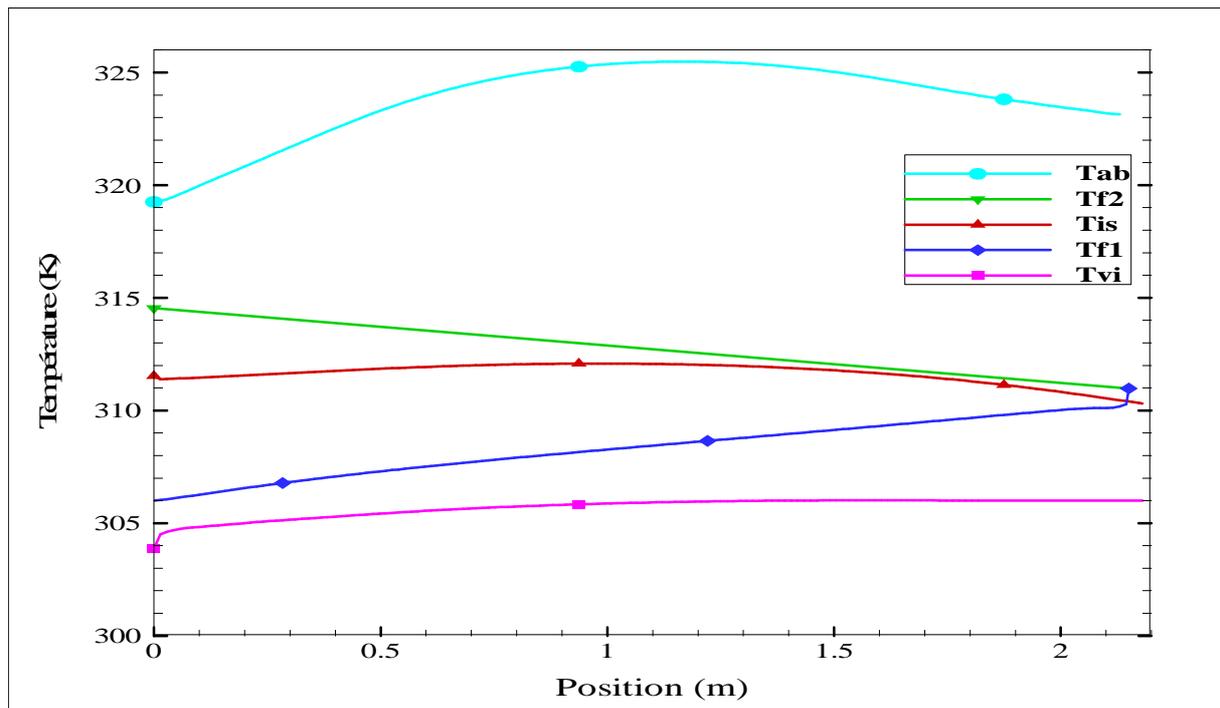


Figure VI.19 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.08 kg/s$

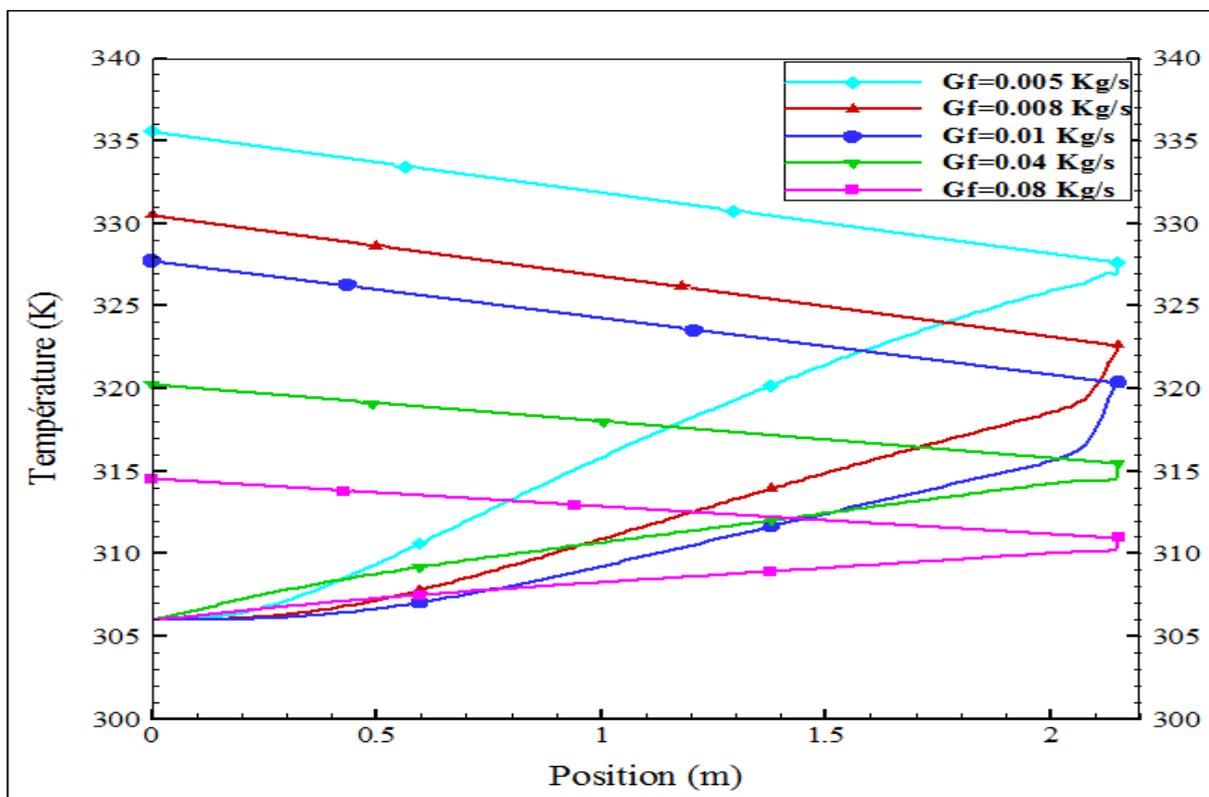


Figure VI.20 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans milieu poreux, pour $I=500W/m^2$ et différents débits massiques.

Les figures VI.16, VI.17, VI.18 et VI.19 montrent l'influence du débit massique sur les températures des composantes du capteur solaire, et cette influence est montrée bien sur la figure VI.20 où on remarque qu'avec l'augmentation du débit, les températures diminuent et l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur diminue. On constate que la diminution du débit massique augmente le temps de séjour du fluide dans les deux conduites ce qui cause l'augmentation du temps d'échange thermique avec l'absorbeur. Le tableau suivant donne la température du fluide dans les deux passages du capteur solaire sans milieu poreux pour toutes les valeurs du débit.

Débit (Kg/s)	Tf1 (K)	Tf2 (K)
0.005	327.5	336
0.008	322.5	330
0.01	320	328
0.04	315.5	320
0.08	311	315

Tableau VI.1 : L'influence du débit sur la température du fluide dans les deux passages du capteur solaire sans milieu poreux.

VI.3.2.2.2 Comparaison avec milieu poreux ($\varphi = 0.8$)

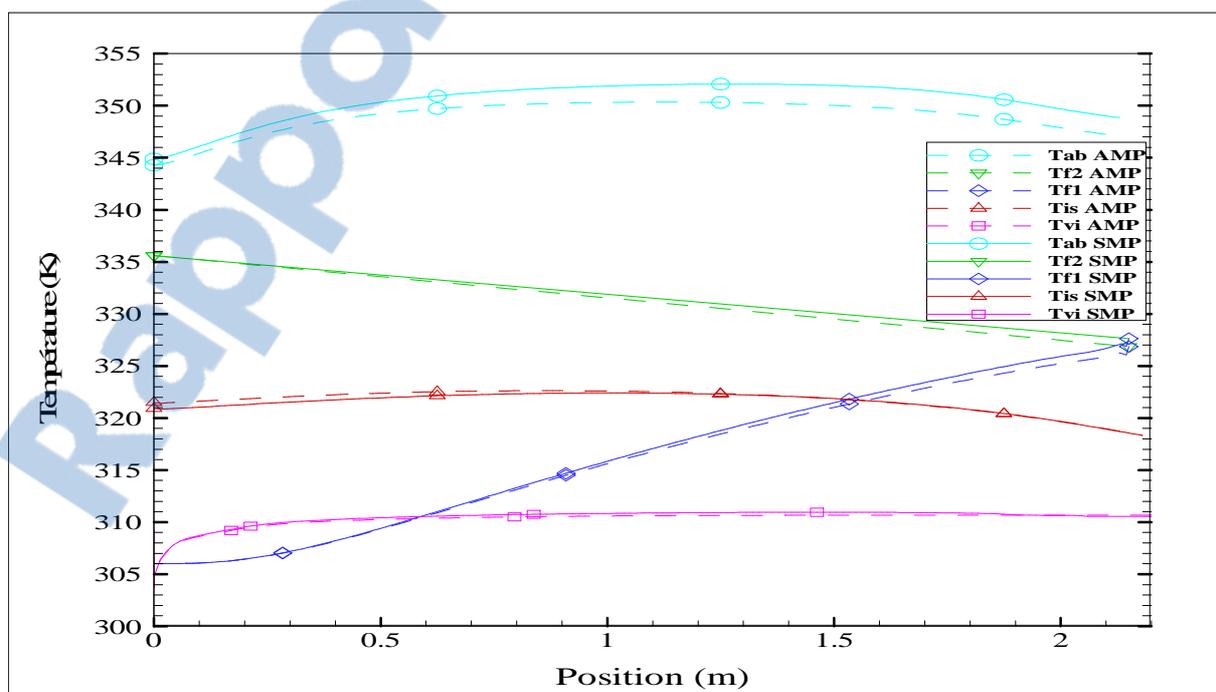


Figure VI.21 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.005$ kg/s.

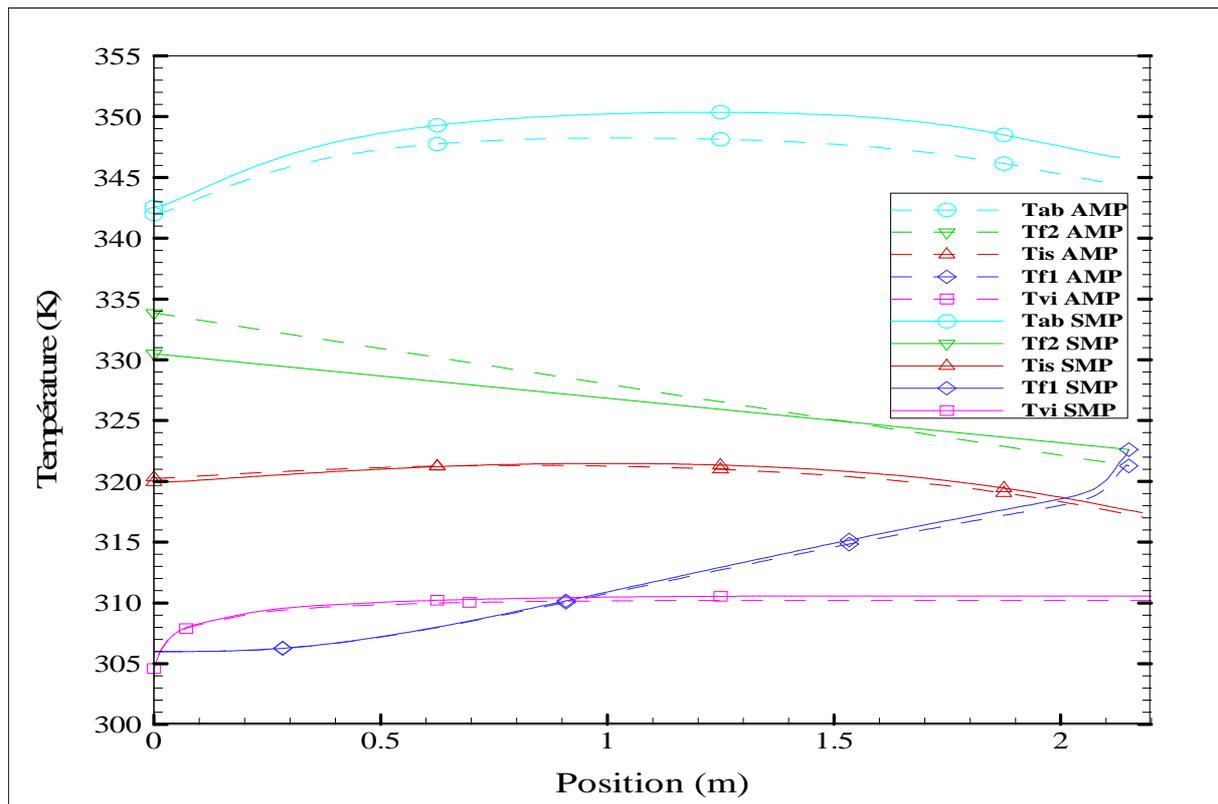


Figure VI.22 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 \text{ kg/s}$.

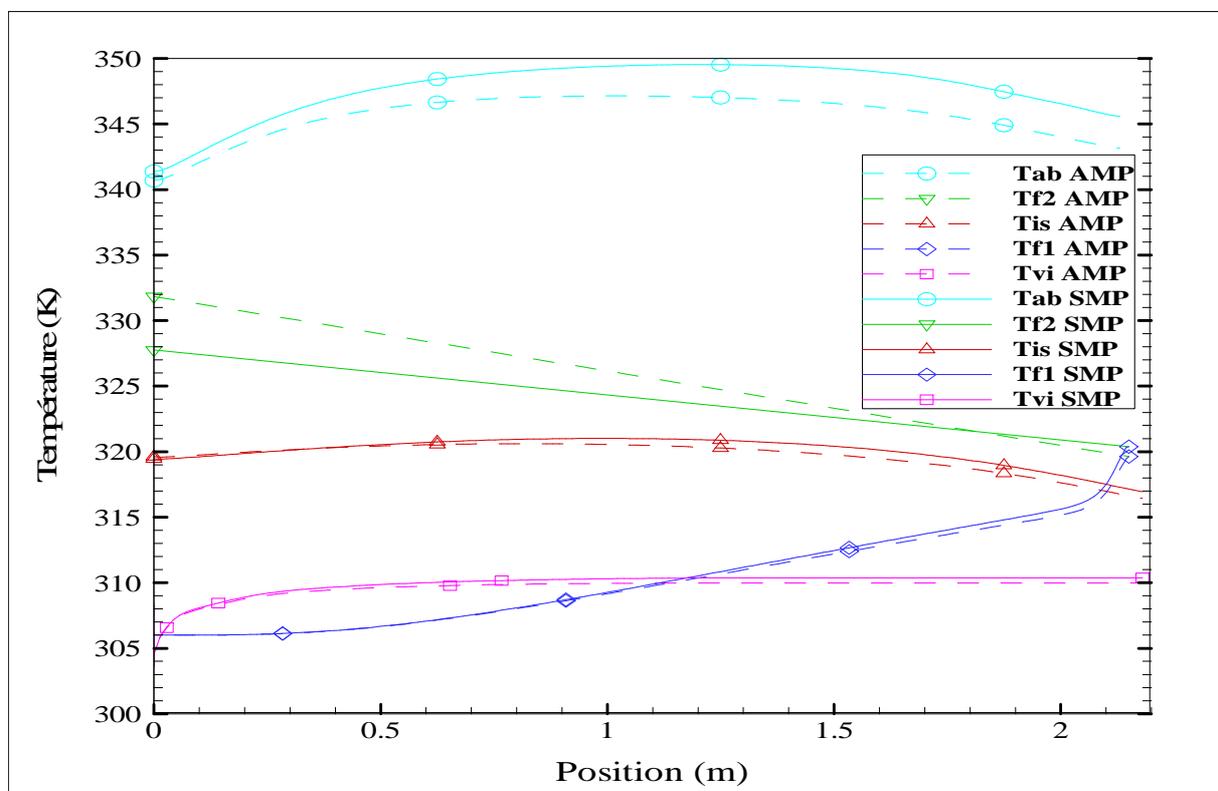


Figure VI.23 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.01 \text{ kg/s}$.

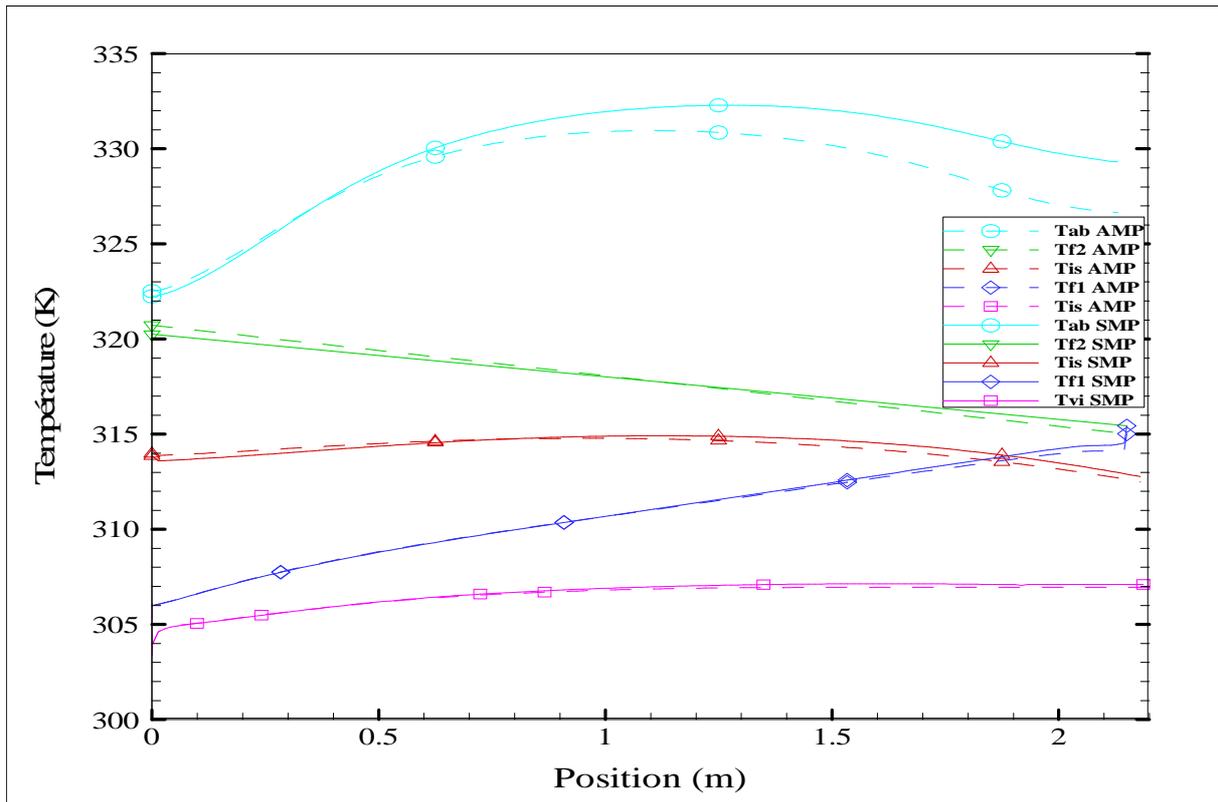


Figure VI.24 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.04$ kg/s.

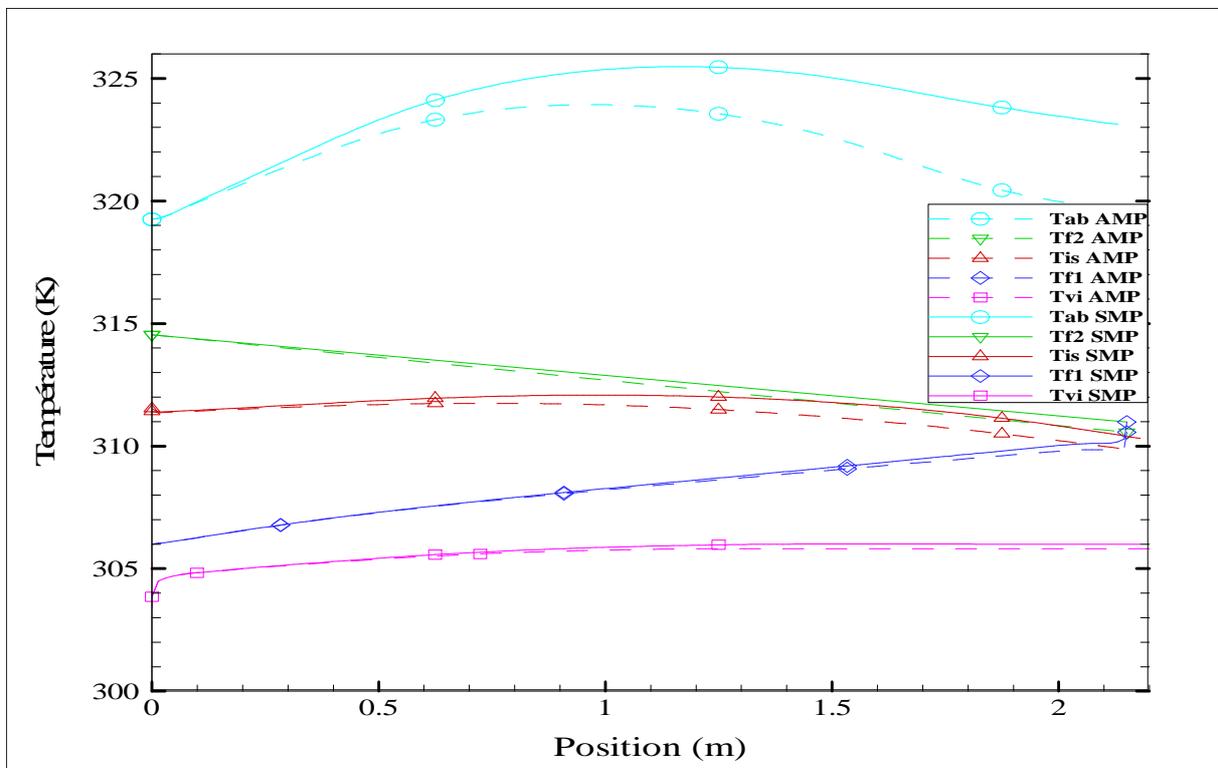


Figure VI.25 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.08$ kg/s.

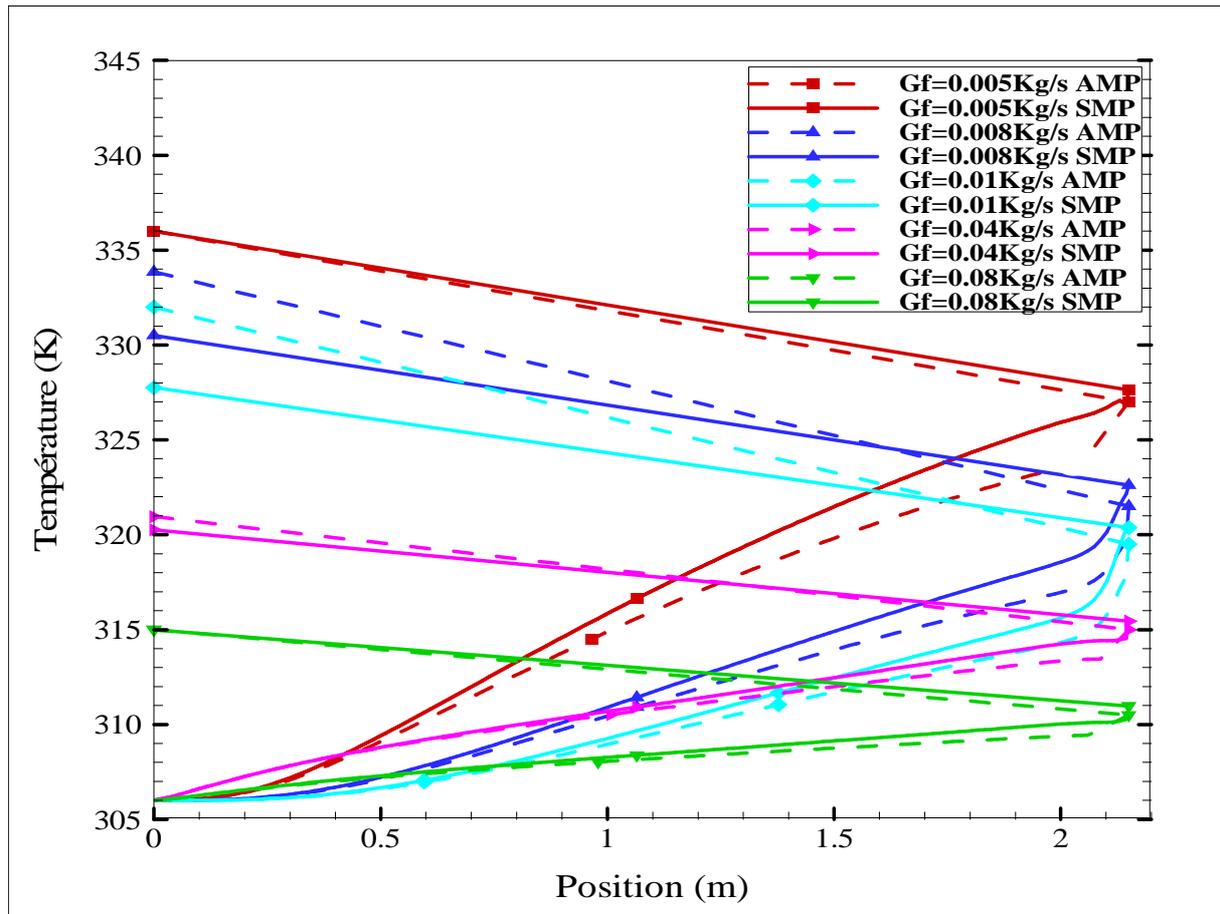


Figure VI.26 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et différents débits massique.

Les figures VI.21, VI.22, VI.23, VI.24 et VI.25 montrent l'évolution de la température des composants du capteur solaire à double passe sans et avec milieu poreux pour un rayonnement solaire de $500 W/m^2$ et différentes valeurs du débit massique. On remarque qu'avec le milieu poreux les températures du vitrage, d'isolation, de l'absorbeur et du fluide dans la conduite supérieure sont faibles par rapport au cas sans milieu poreux. Cette diminution se traduit par l'augmentation de la température du fluide dans le deuxième canal sous l'effet du milieu poreux.

La figure VI.26 montre l'influence du milieu poreux sur la température du fluide dans les deux passages du capteur solaire. En effet, l'addition du milieu poreux dans la conduite inférieure permet l'augmentation de la surface d'échange conduisant à l'augmentation de la température de l'air à la sortie. On remarque que, pour les débits suivants : $0.04kg/s$, $0.08Kg/s$ et $0.005Kg/s$, la température de l'air à la sortie du capteur solaire avec milieu poreux est égale à celle dans le cas sans milieu poreux. Par contre, pour les débits $0.008Kg/s$ et $0.01Kg/s$, la

température de l'air dans le cas du capteur solaire avec milieu poreux est plus élevée que celle dans le cas sans milieu poreux. Alors, on constate que l'intervalle du débit optimal dans le cas d'utilisation du milieu poreux est entre 0.008Kg/s et 0.01Kg/s.

On remarque aussi que l'augmentation du débit entraîne la diminution de l'écart de la température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur solaire dans les deux cas du capteur, avec et sans milieu poreux. Le tableau suivant donne les valeurs de la température du fluide à l'entrée et la sortie du capteur sans et avec milieu poreux en fonction du débit massique.

Débit (Kg/s)	Tf1(K)		Tf2(K)		DT(K)	
	SMP	AMP	SMP	AMP	SMP	AMP
0.005	327.5	327	336	336	30	30
0.008	322.5	321.5	330	334	24	28
0.01	320.5	319.5	328	332	22	26
0.04	315.5	315	320	321	14	15
0.08	311	310.5	315	315	9	9

Tableau VI.2 : L'influence du débit sur la température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

VI.3.2.3 Effet du rayonnement solaire sur les températures des composants du capteur solaire

On utilise des différentes valeurs du rayonnement solaire avec un débit massique constant, et on trace les températures des composants du capteur solaire dans les deux cas du capteur solaire, sans et avec milieu poreux, pour voir l'influence du rayonnement sur l'efficacité thermique du capteur.

VI.3.2.3.1 Sans milieu poreux

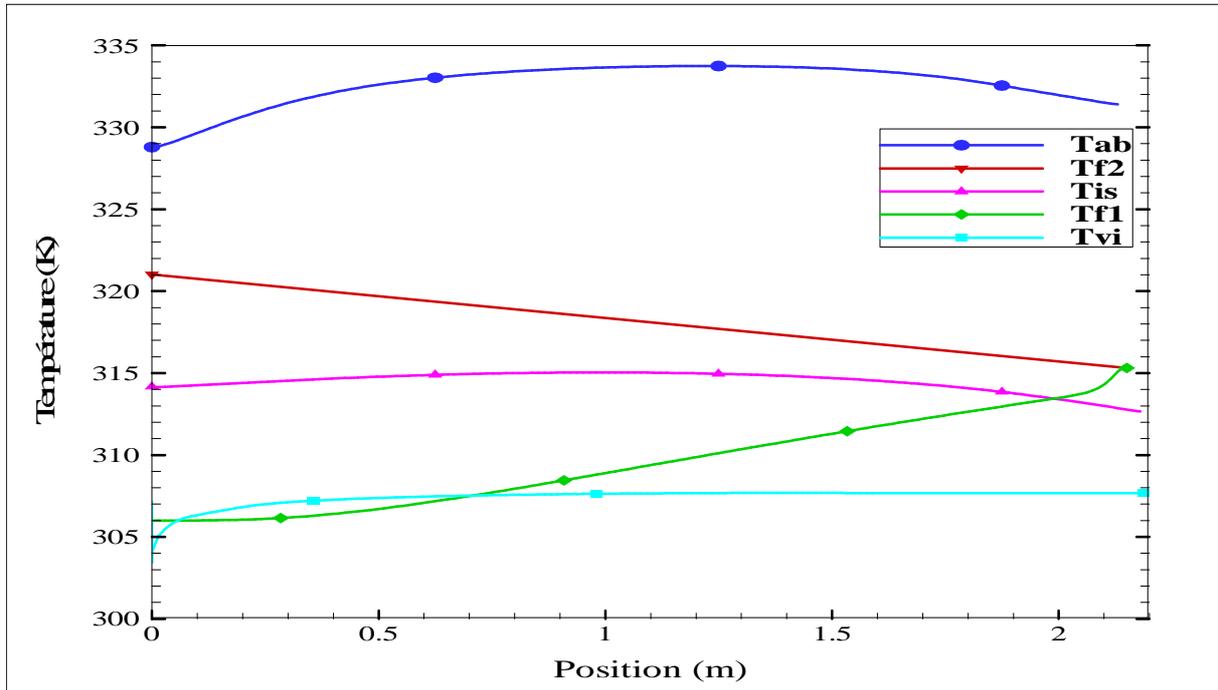


Figure VI.27 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=300W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

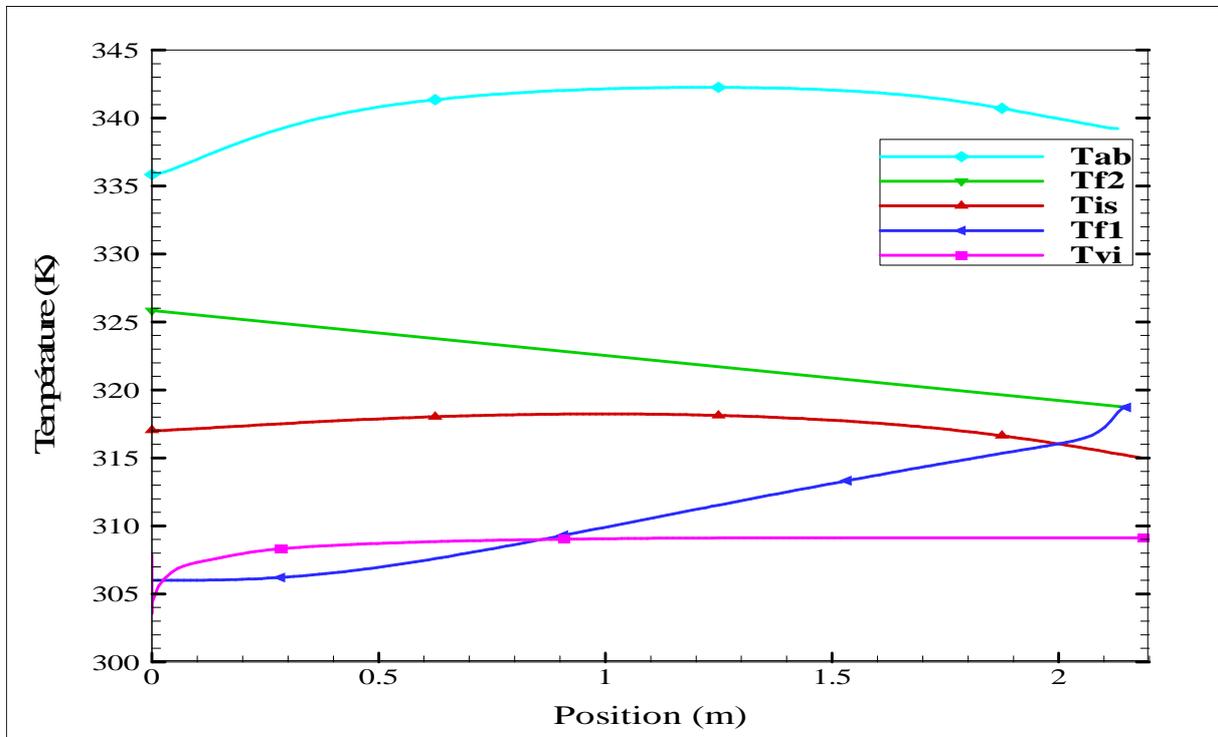


Figure VI.28 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=400W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

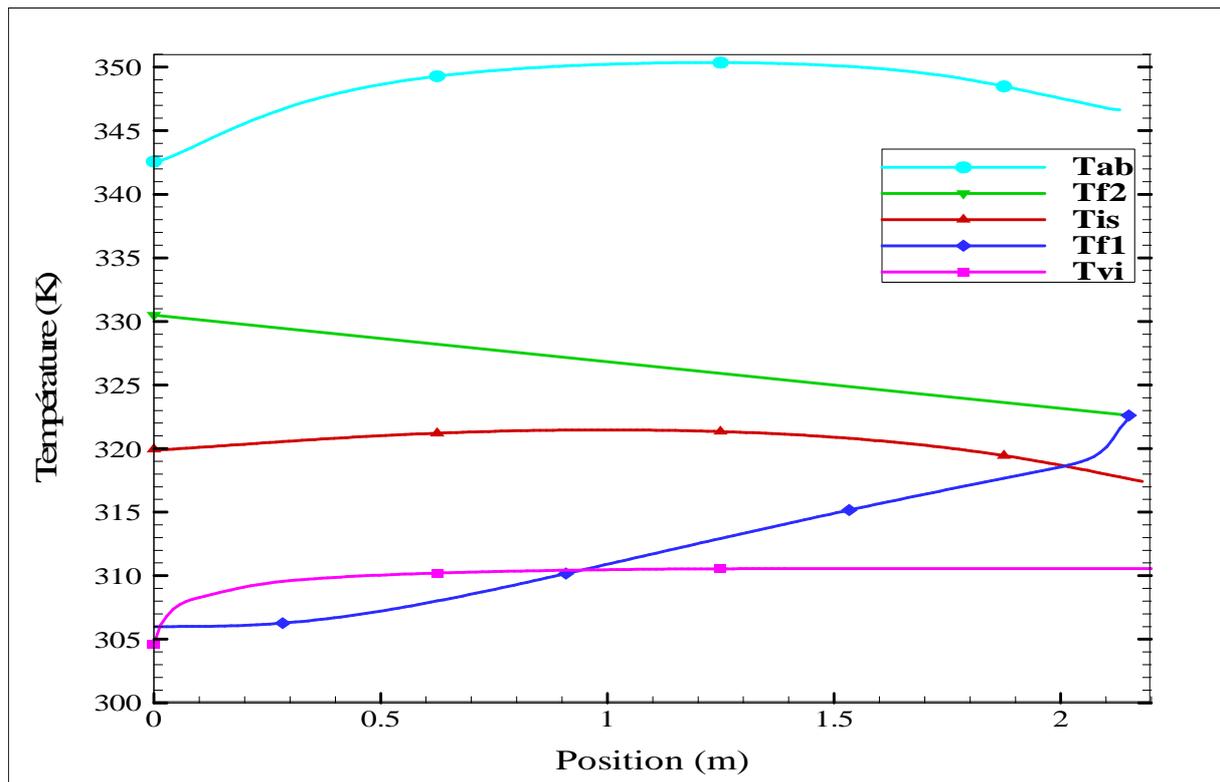


Figure VI.29 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

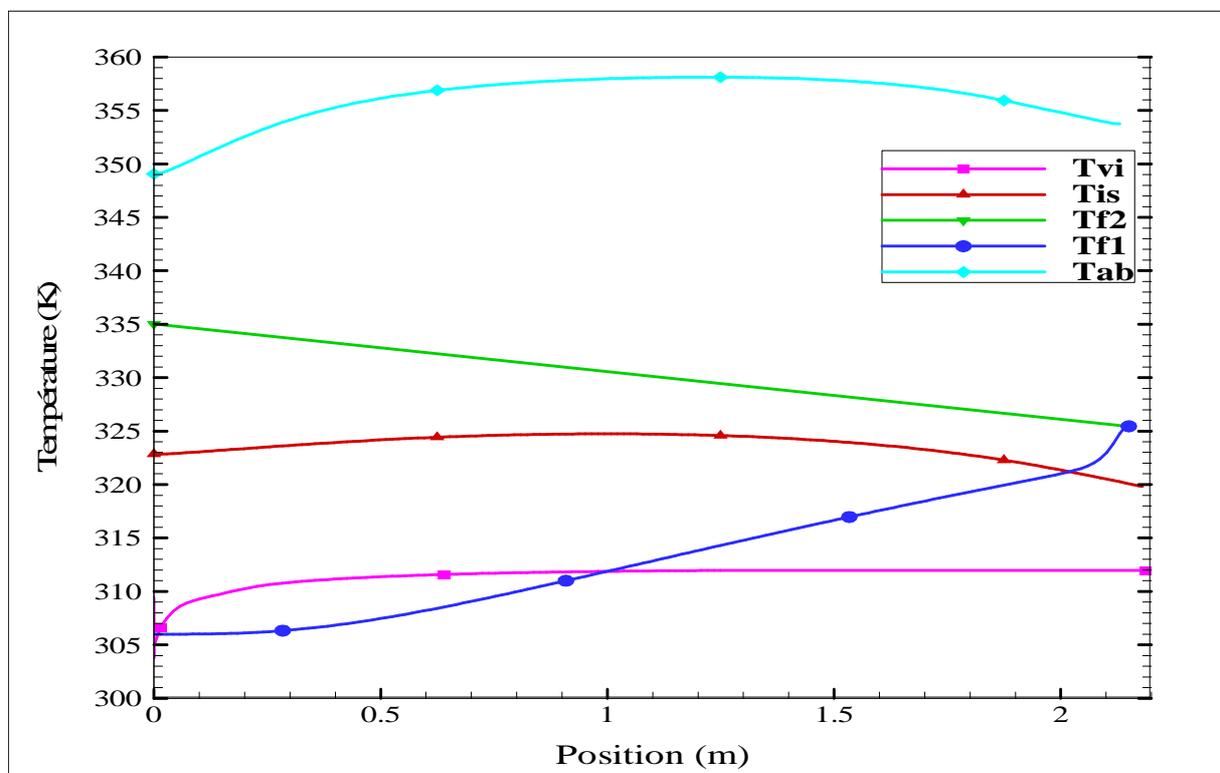


Figure VI.30 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=600W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

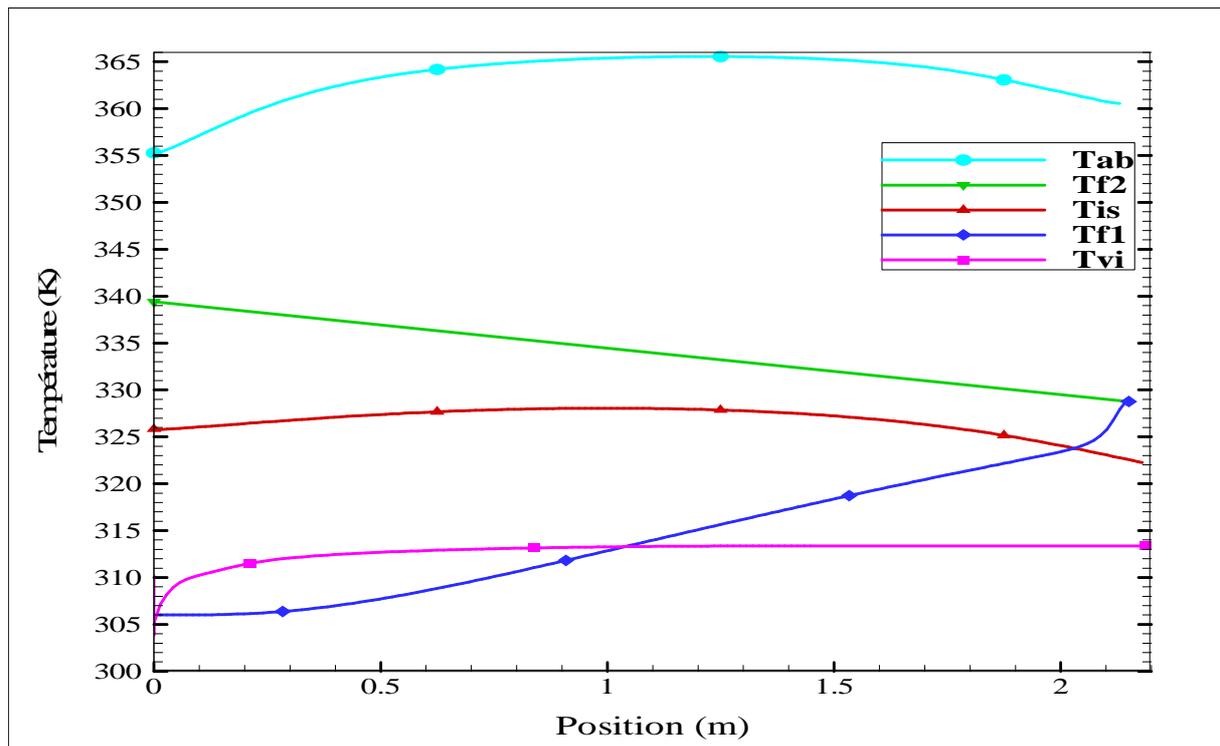


Figure VI.31 : Evolution des températures des composants du capteur sans milieu poreux pour $I=700W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

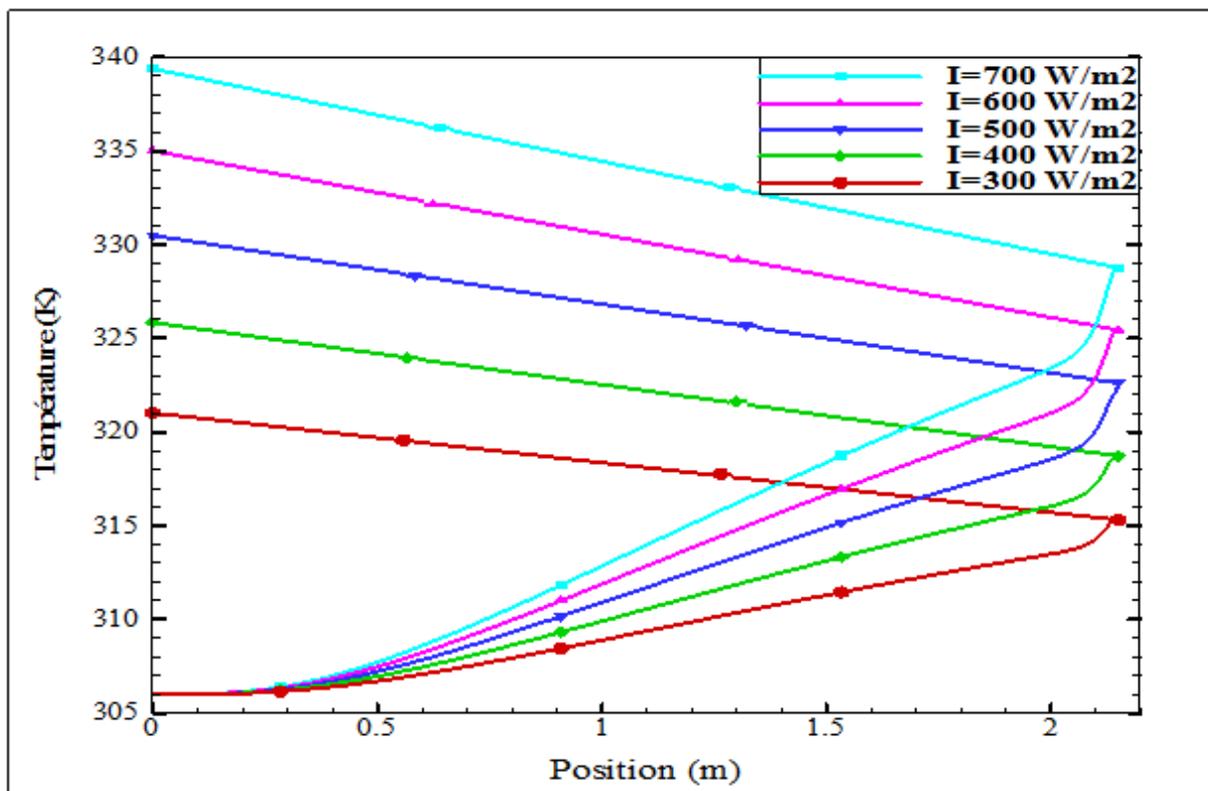


Figure VI.32 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans milieu poreux pour $G_f=0.008kg/s$ et différents rayonnement solaire.

Les figures VI.27, IV.28, VI.29, VI.30 et VI.31 montrent l'influence du rayonnement solaire sur les températures des composants du capteur solaire. Pour un rayonnement solaire de 300W/m^2 , la température maximale de l'absorbeur est de 333K , et celle du fluide à la sortie du capteur est de 321K . Avec l'augmentation du rayonnement solaire jusqu'à 700W/m^2 , la température maximale de l'absorbeur atteint 365K et celle du fluide à la sortie du capteur devient 340K . Cela montre qu'avec l'augmentation du rayonnement solaire les températures des composants du capteur solaire augmentent.

La figure VI.32 montre bien l'influence du rayonnement solaire sur la température du fluide dans les deux passages. On remarque que la température du fluide augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire. Quand l'absorbeur absorbe plus de chaleur avec l'élévation du rayonnement solaire sa température devient plus importante et elle va augmenter la température du fluide dans les deux canaux, supérieur et inférieur. Par conséquent, l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur solaire augmente. Le tableau suivant donne les valeurs des températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux en fonction du rayonnement solaire.

Rayonnement solaire (W/m^2)	Tab (K)	Tis (K)	Tvi (K)	Tf1 (K)	Tf2 (K)
300	334	316	308	315	321
400	342	319	309	319	326
500	350	322	311	323	331
600	358	325	312	326	335
700	366	328	313	329	340

Tableau VI.3 : L'influence du rayonnement solaire sur les températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux.

Le tableau VI.3 montre que l'augmentation de la température en fonction du rayonnement est assez linéaire dans toutes les températures. Elle est de l'ordre de 8°C pour l'absorbeur et de l'ordre de 3°C pour l'isolation et de l'ordre de 1°C pour le vitrage et de l'ordre de 4°C pour le fluide dans le canal supérieur et de l'ordre de 5°C pour le fluide dans le canal inférieur pour une augmentation du rayonnement solaire de 100W/m^2 .

VI.3.2.3.2 Comparaison avec milieu poreux

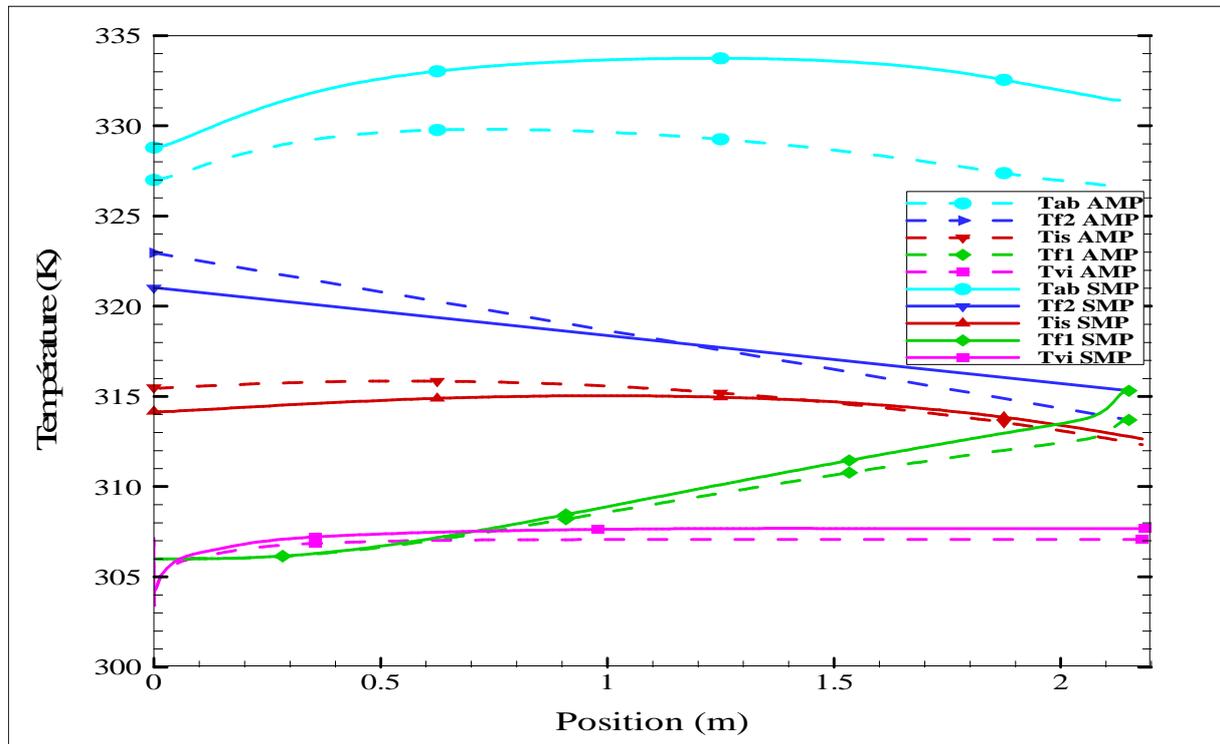


Figure VI.33 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=300W/m^2$ et $G_f=0.008Kg/s$.

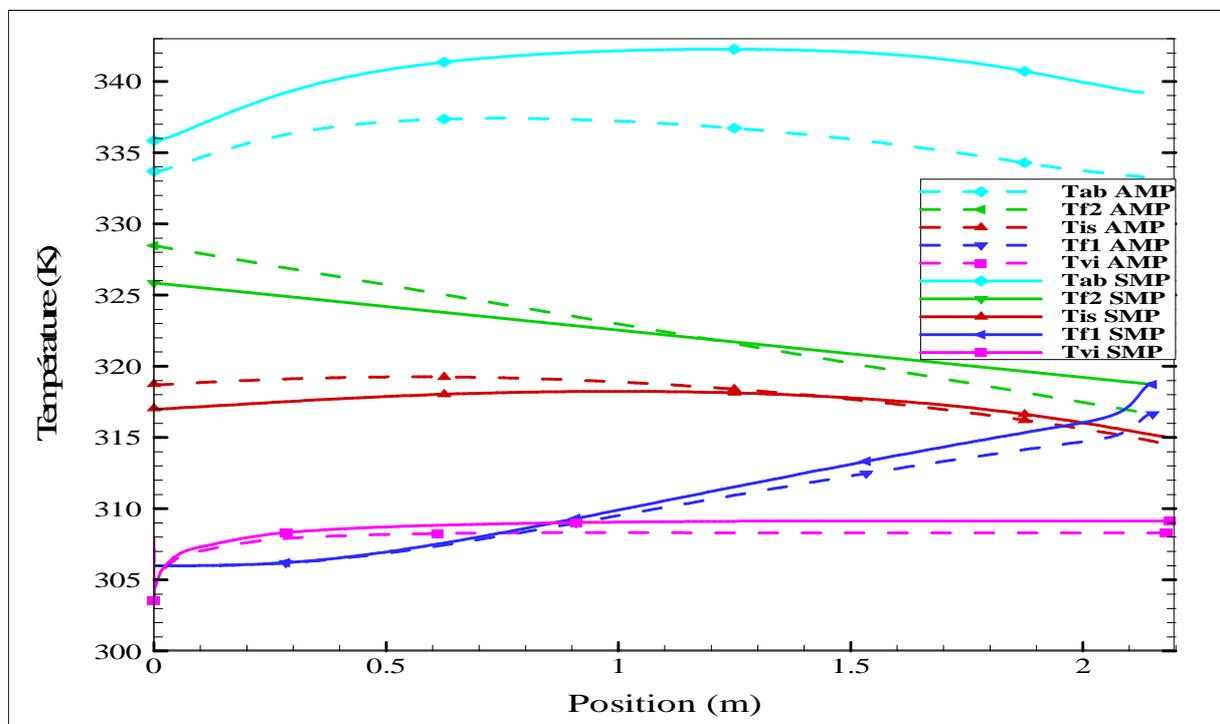


Figure VI.34 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=400W/m^2$ et $G_f=0.008Kg/s$.

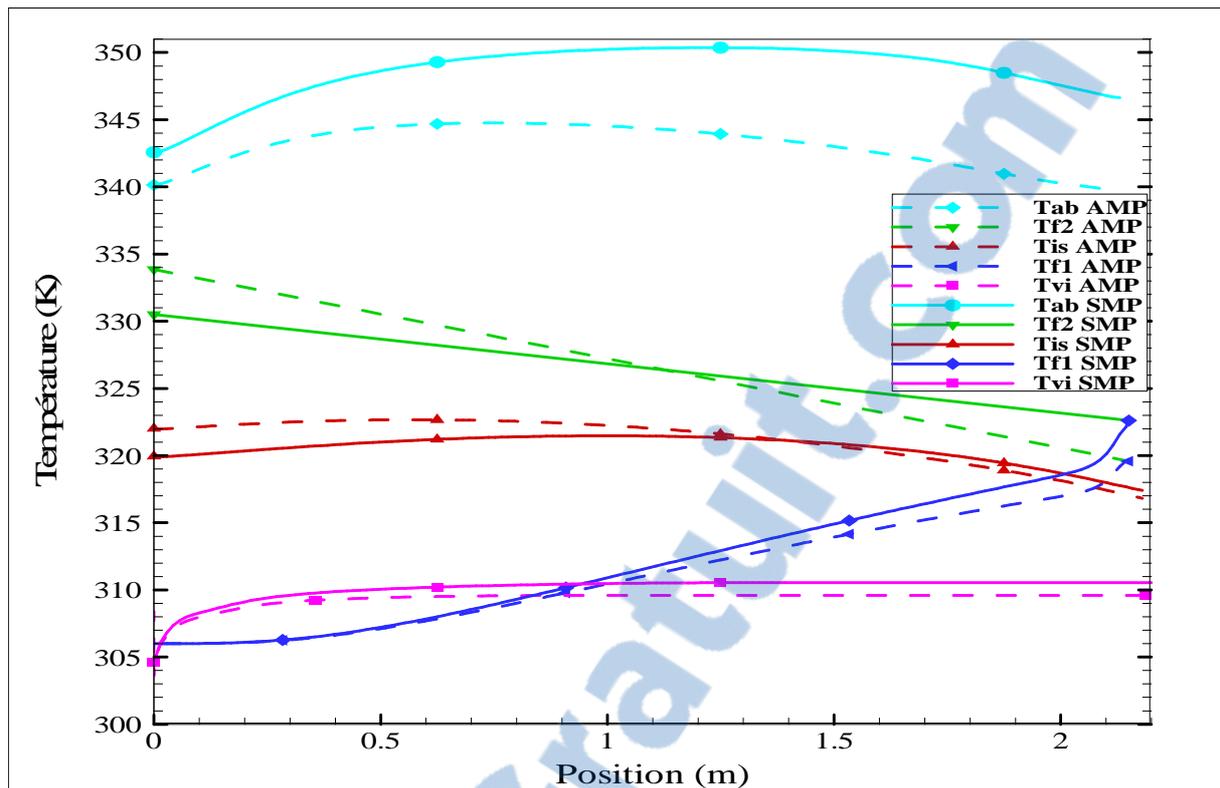


Figure VI.35 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

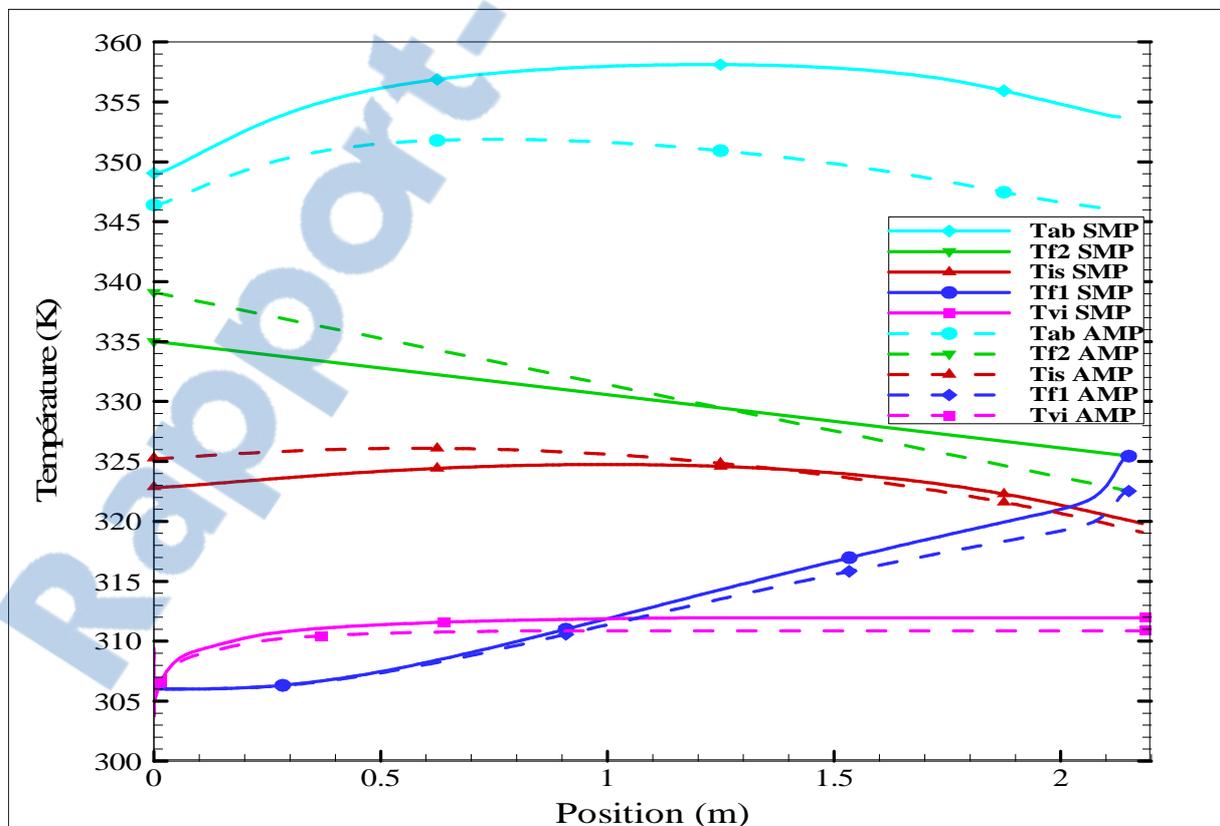


Figure VI.36 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=600W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

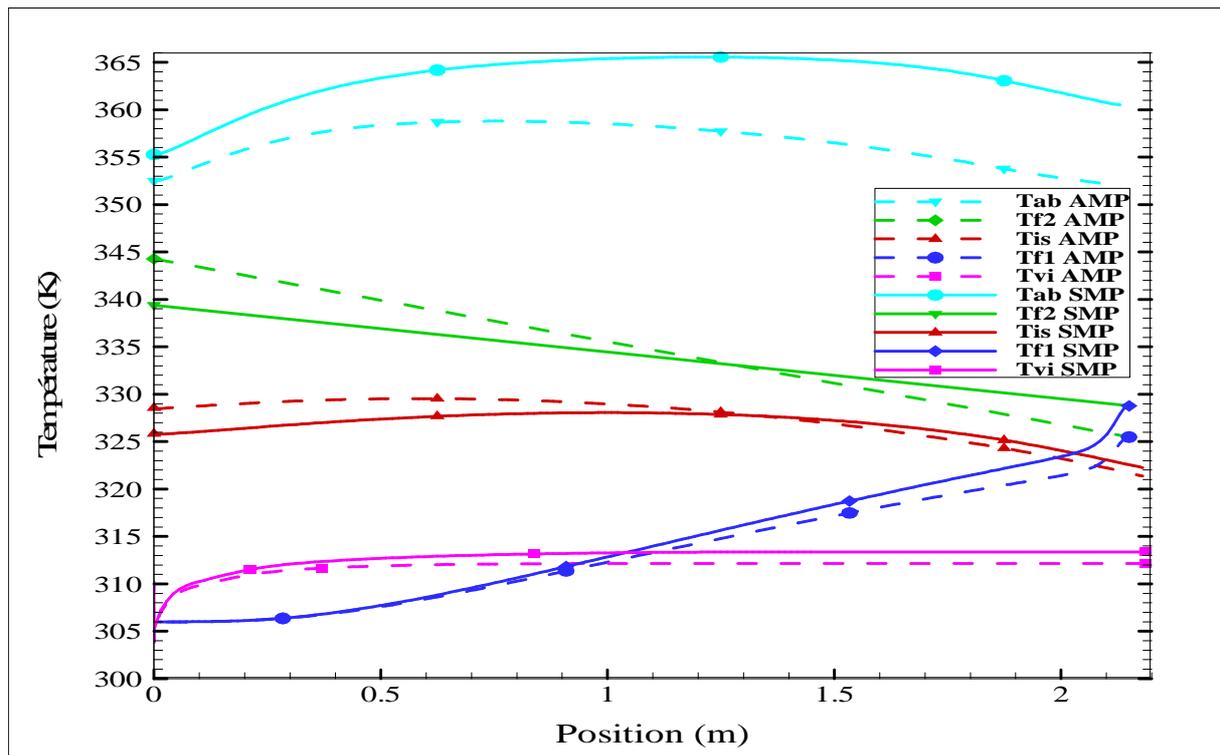


Figure VI.37 : Evolution des températures des composants du capteur sans et avec milieu poreux pour $I=700W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

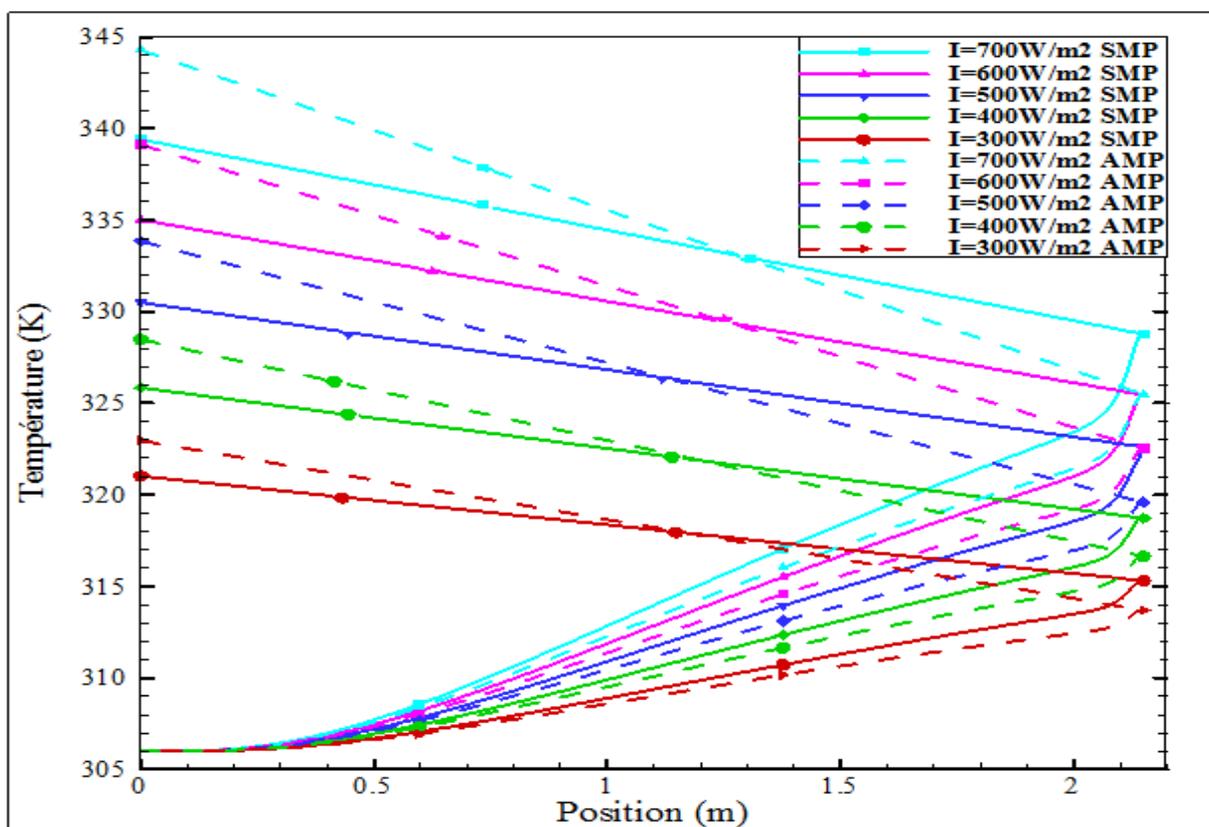


Figure VI.38 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur sans et avec milieu poreux pour $G_f = 0.008 kg/s$ et différents valeurs des rayonnements solaires.

Les figures VI.33, VI.34, VI.35, VI.36 et VI.37 montrent l'évolution de la température des composants du capteur solaire à double passe sans et avec milieu poreux pour un débit massique constant de 0.008Kg/s et différentes valeurs du rayonnement solaire. On remarque qu'avec l'addition du milieu poreux dans le canal inférieur du capteur solaire, les températures du vitrage, de l'isolation, de l'absorbeur et du fluide dans le canal supérieur diminuent par rapport au cas du capteur solaire sans milieu poreux. Cette diminution est due à l'influence du milieu poreux sur la température de l'absorbeur.

La figure VI.38 montre que la température de l'air à la sortie dans le cas du capteur solaire avec milieu poreux est plus élevée que celle dans le cas sans milieu poreux. Alors, on constate qu'avec l'augmentation du rayonnement solaire la température du fluide à la sortie du capteur solaire et l'écart de la température du fluide entre l'entrée et la sortie du capteur solaire dans les deux cas, avec et sans milieu poreux, augmentent.

Le tableau suivants donne les valeurs de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux en fonction du rayonnement solaire.

Rayonnement solaire (W/m ²)	Tf1 (K)	Tf1 (K)	Tf2 (K)	Tf2 (K)	DT (C)	DT (C)
	SMP	AMP	SMP	AMP	SMP	AMP
300	315	314	321	323	15	17
400	319	317	326	329	20	23
500	323	320	331	334	25	28
600	326	323	335	339	29	33
700	329	326	339	344	33	38

Tableau VI.4: L'influence du rayonnement solaire sur la température du fluide à l'entrés et à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

VI.3.2.4 Influence de la porosité sur la température du fluide dans les deux passages, supérieur et inférieur du capteur solaire

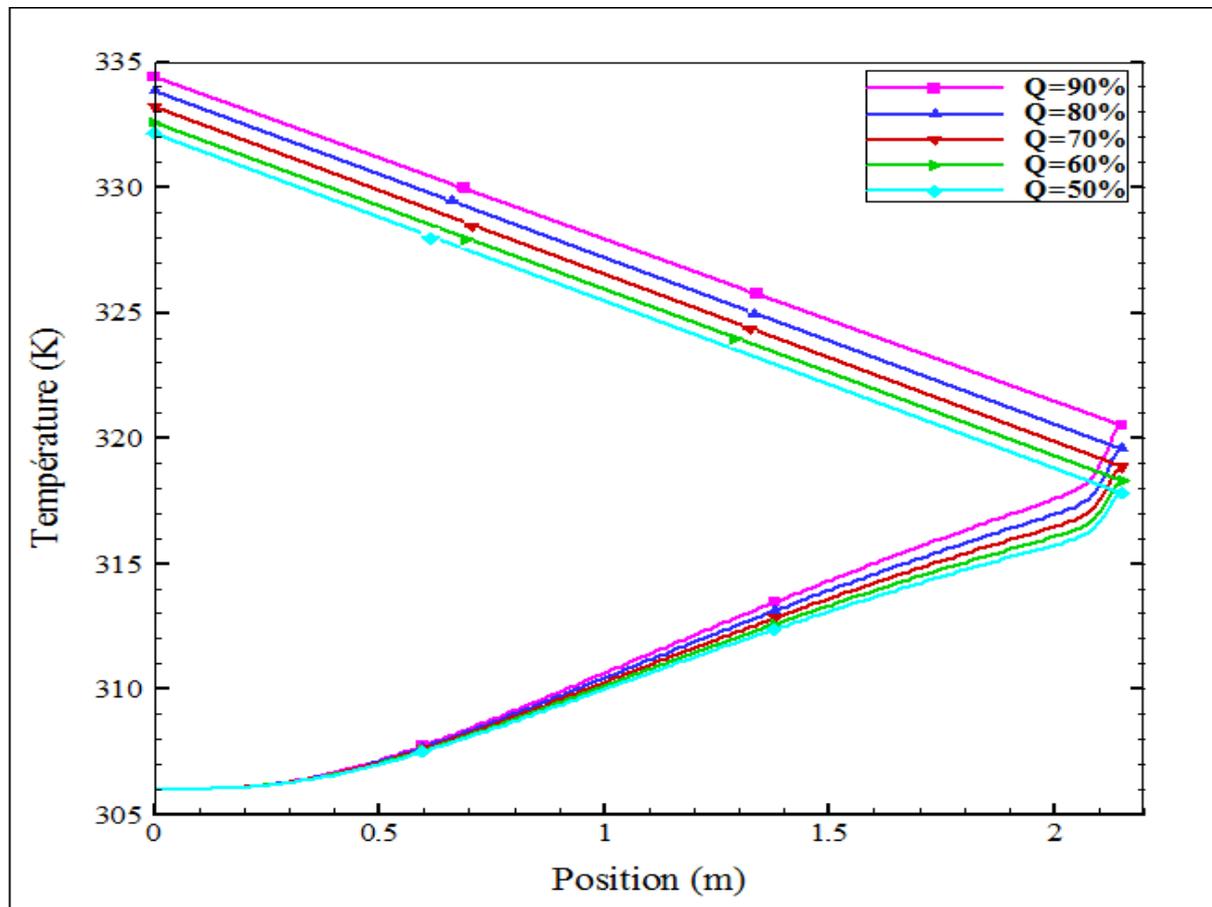


Figure VI.39 : L'influence de la porosité sur Tf1 et Tf2 du capteur solaire avec milieu poreux pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

La Figure VI.39 montre l'influence de la porosité sur la température du fluide dans les deux passages du capteur solaire (Tf1 et Tf2). On remarque que la température du fluide augmente avec l'augmentation de la porosité du milieu poreux. L'augmentation de la porosité permet d'augmenter la surface d'échange et le temps de séjour du fluide dans le canal inférieur qui offre au fluide plus de temps pour le transfert de chaleur avec l'absorbeur et le matériau poreux. Par conséquent, la température du fluide à la sortie augmente. Alors, on constate qu'il y a une relation proportionnelle entre la porosité du milieu poreux et l'efficacité thermique du capteur solaire.

VI.3.2.5 L'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique

VI 3.2.5.1 Sans milieu poreux

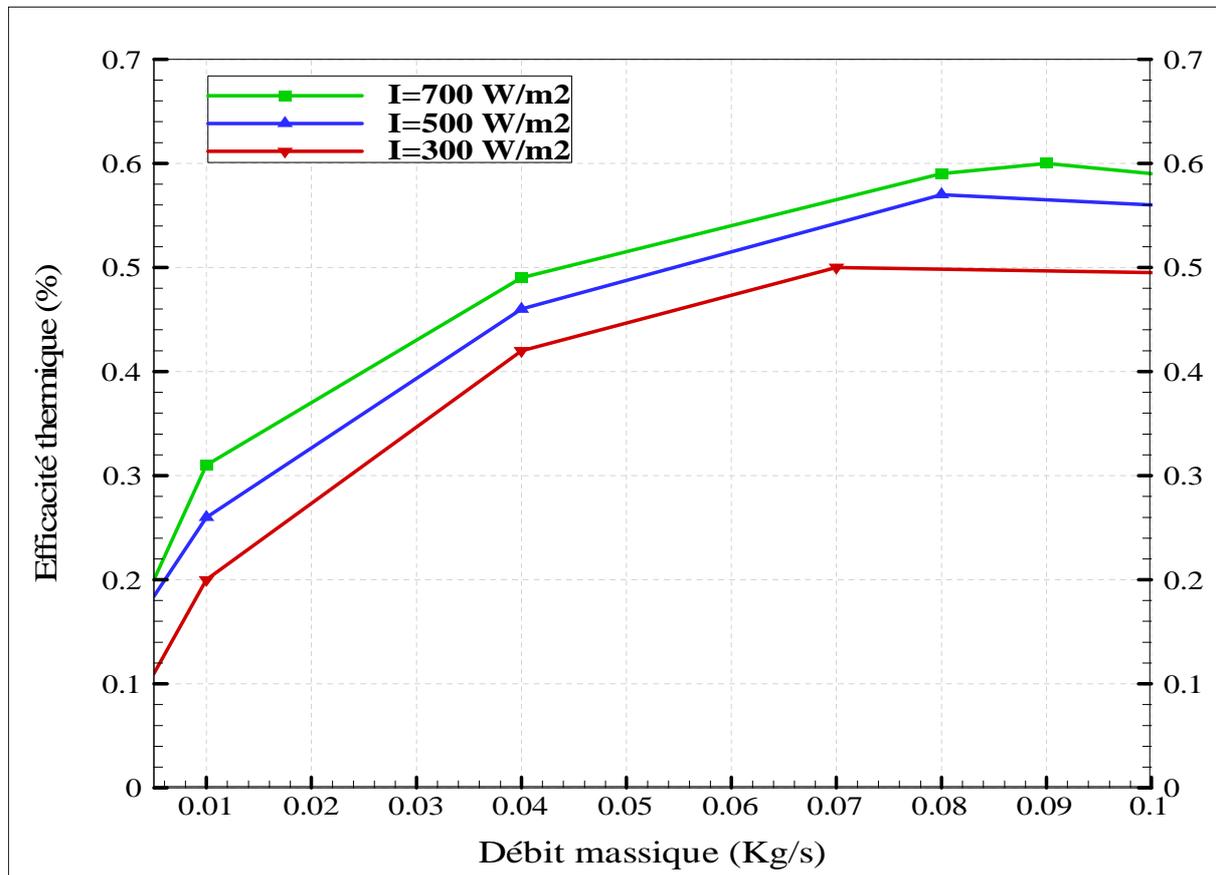


Figure VI.40 : L'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans milieu poreux.

La figure VI.40 montre la variation de l'efficacité thermique du capteur solaire sans milieu poreux en fonction de débit massique et du rayonnement solaire. On remarque que l'efficacité thermique varie avec la variation du rayonnement solaire, si en prend par exemple la valeur de l'efficacité thermique pour le même débit de 0,01 Kg/s et différents valeurs d'intensité, on trouve qu'elle est de 20% pour $I=300\text{W/m}^2$, et elle est de 26% pour $I=500\text{W/m}^2$, alors on constate qu'elle augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire. On remarque qu'avec l'augmentation du débit l'efficacité thermique augmente. Toutefois, l'augmentation de l'efficacité n'est pas constante et dépend du débit. Entre 0,01 et 0,04Kg/s, l'augmentation de l'efficacité est nettement moins que celle dans entre 0,005 et 0,01Kg/s. Alors, l'utilisation des faibles débits donne une meilleure efficacité.

On remarque aussi qu'il y a présence d'un débit optimal donne une meilleure efficacité pour chaque rayonnement.

Le tableau suivant donne les valeurs de l'efficacité thermique pour toutes les valeurs du débit et du rayonnement solaire.

Rayonnement solaire (W/m ²)	Débit massique (Kg/s)	Efficacité thermique	Débit optimal (Kg/s)
300	0.005	0.11	0.07
	0.008	0.16	
	0.01	0.20	
	0.04	0.42	
	0.07	0.501	
	0.08	0.50	
	0.1	0.49	
500	0.005	0.188	0.08
	0.008	0.225	
	0.01	0.26	
	0.04	0.46	
	0.08	0.57	
	0.09	0.565	
	0.1	0.56	
700	0.005	0.20	0.09
	0.008	0.26	
	0.01	0.31	
	0.04	0.49	
	0.08	0.59	
	0.09	0.6	
	0.1	0.59	

Tableau VI.5 : L'influence du débit sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans milieu poreux.

VI.3.2.5.2 Avec milieu poreux

En ajoutent le milieu poreux dans le canal inferieur, et en tracent les valeurs de l'efficacité thermique de les deux cas, sans et avec milieu poreux.

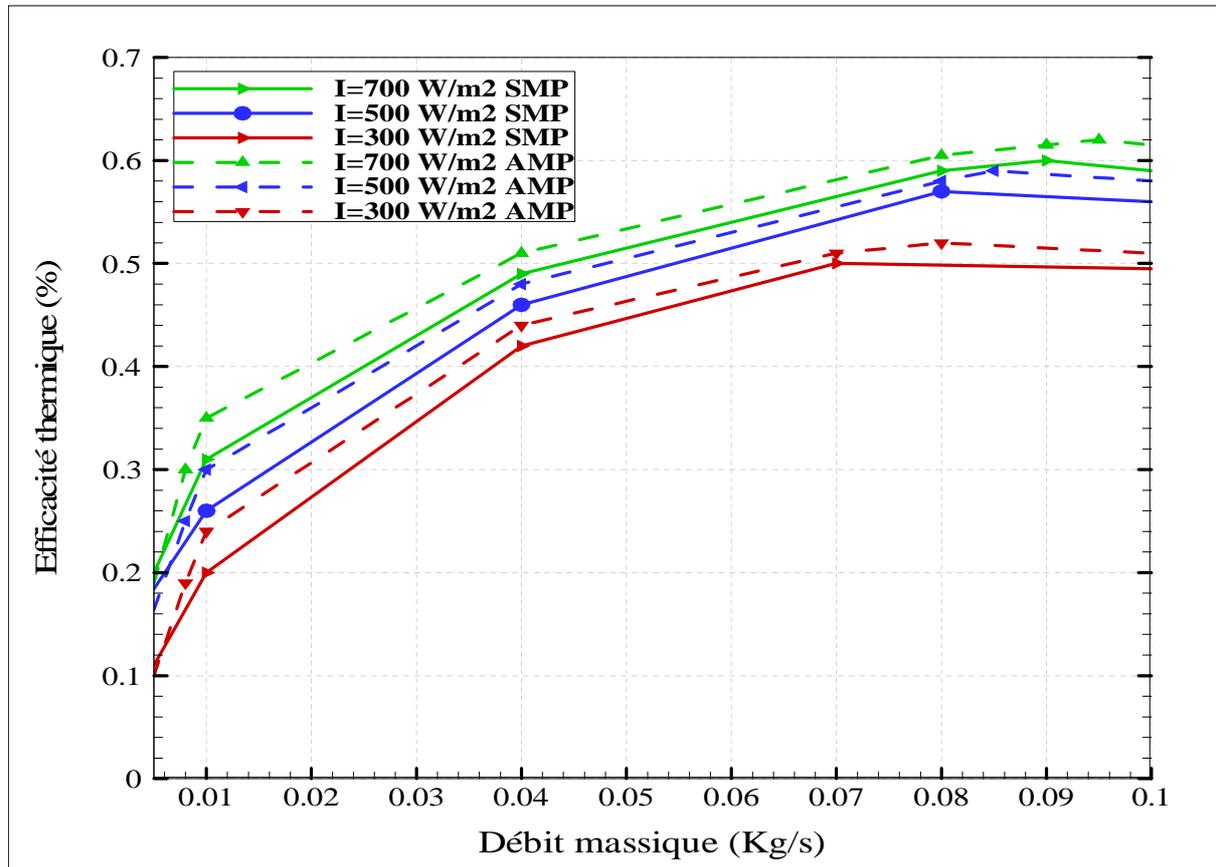


Figure VI.41 : L'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

La figure VI.41 montre l'influence du rayonnement solaire et du débit massique sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans et avec milieu poreux. On remarque pour les deux cas du capteur que l'efficacité thermique augmente avec l'augmentation du débit jusqu'à atteindre le débit optimal. De plus, avec milieu poreux l'efficacité est plus importante que sans milieu poreux, car l'efficacité thermique dépend de la température du fluide à la sortie, et nous avons vu précédemment qu'avec le milieu poreux la température du fluide à la sortie est plus grande par rapport à le cas sans milieu poreux. On remarque qu'après le débit optimal, la diminution de l'efficacité dans le cas sans milieu poreux est importante un peu par rapport au cas avec milieu poreux.

VI.3.2.6 L'influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur les températures des composants du capteur

VI.3.2.6.1 Sans milieu poreux

En augmentant l'épaisseur de l'absorbeur de 2 mm jusqu'à 4 mm, en traçant la température du fluide dans les deux conduites ainsi que les températures des autres composants du capteur solaire dans les deux cas, sans et avec milieu poreux.

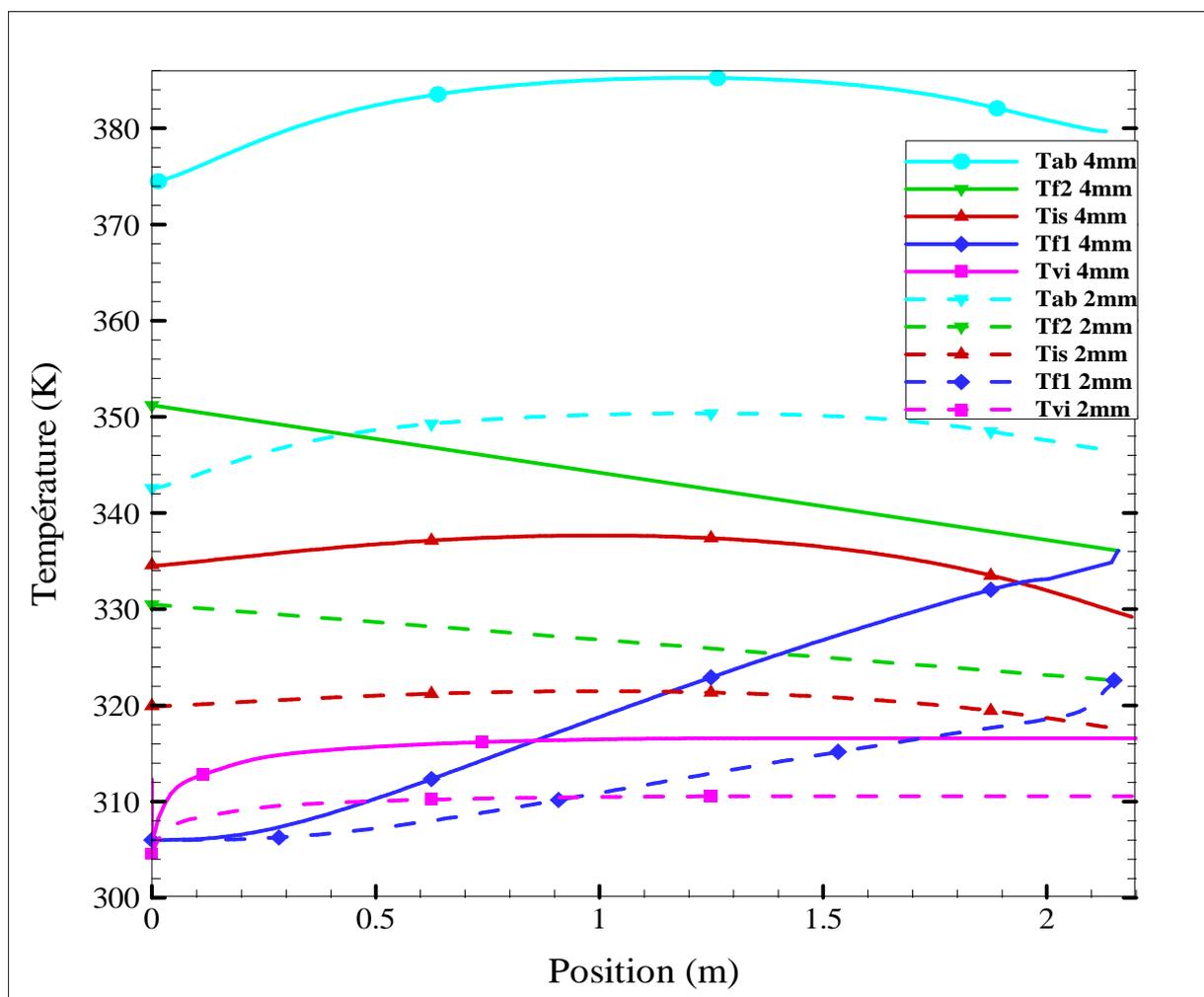


Figure VI.42 : L'évolution des températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas de l'épaisseur de l'absorbeur ($H_a=2$ et $H_a=4$ mm), pour $I=500W/m^2$ et $G_f=0.008$ kg/s.

La figure VI.42 montre l'influence de l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur sur la température du fluide dans les deux conduites et les températures des autres composantes du capteur solaire. On remarque que les températures des composantes du capteur ayant une épaisseur de l'absorbeur de 4mm sont plus élevées que celui dans le capteur ayant une épaisseur de l'absorbeur de 2mm. Alors, l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur entraîne l'augmentation des températures des composantes du capteur ainsi que la température du fluide dans les deux conduites. L'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur assure un meilleur stockage de chaleur et provoquant l'augmentation de la température de l'absorbeur qui augmente la température du fluide à la sortie du capteur solaire.

VI.3.2.6.2 Avec milieu poreux

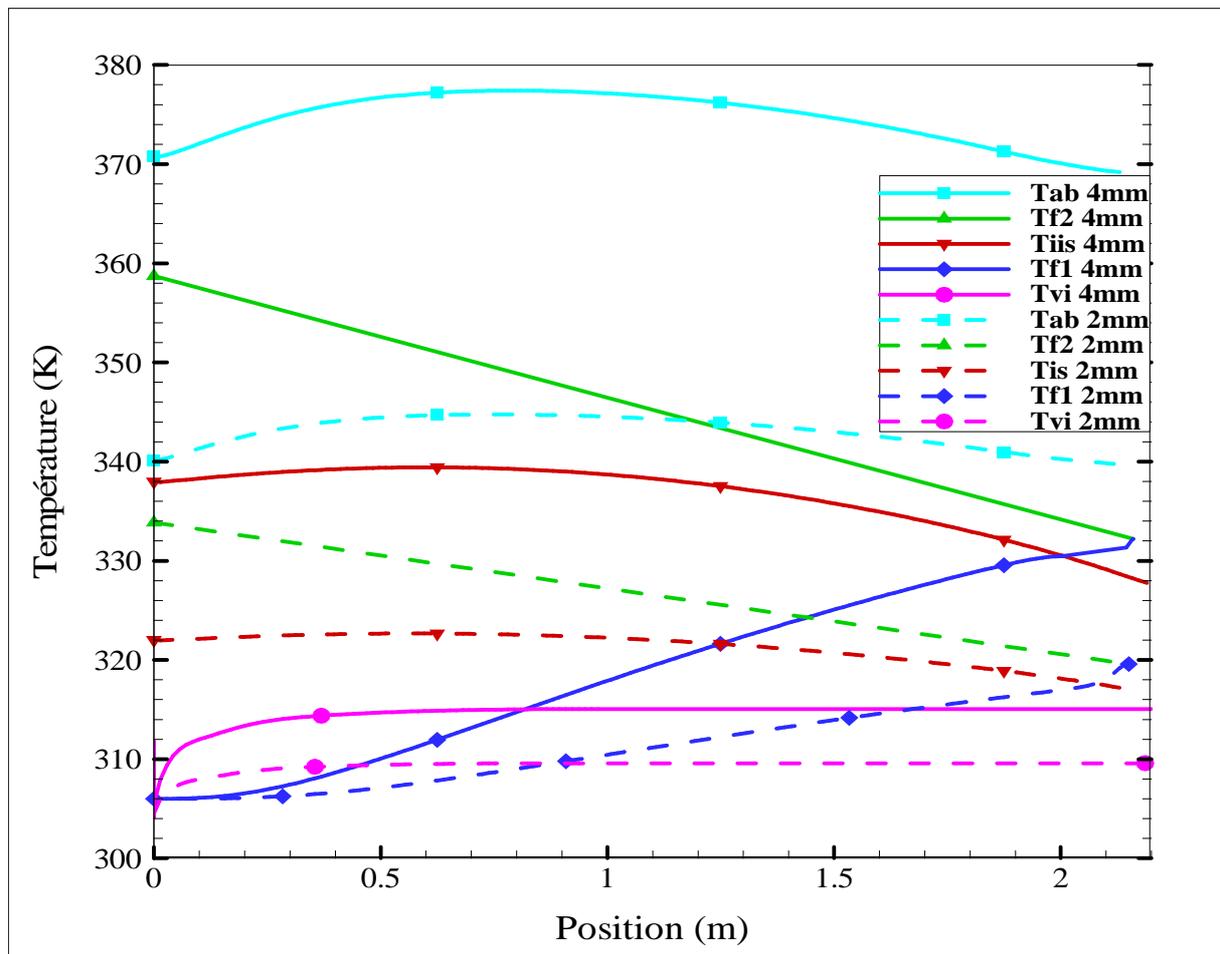


Figure VI.43 : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas de l'épaisseur de l'absorbeur ($H_a=2$ et $H_a=4$ mm), pour $I=500W/m^2$ et $G_f=0.008$ kg/s.

Les figures VI.43 montre l'influence de l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur sur les températures des composants du capteur solaire avec milieu poreux. On remarque que les températures des composants du capteur solaire ayant l'épaisseur de l'absorbeur de 4 mm sont plus élevées que ceux dans le capteur ayant l'épaisseur de l'absorbeur de 2 mm. Alors, par l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur, la quantité de la chaleur stockée dans l'absorbeur augment et par conséquent son température aussi augment ce qui influe positivement sur la température du fluide dans le canal inférieur spécialement avec la présence du milieu poreux. Finalement on constate que l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur a une grande influence sur l'efficacité thermique du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

VI.3.2.7 L'influence de la longueur de l'absorbeur sur les températures des composants du capteur solaire

En va diminuer la longueur de l'absorbeur de 2.13m jusqu'à 2m, et en tracent les températures des composants du capteur solaire dans les deux cas, sans et avec milieu poreux.

VI.3.2.7.1 Sans milieu poreux

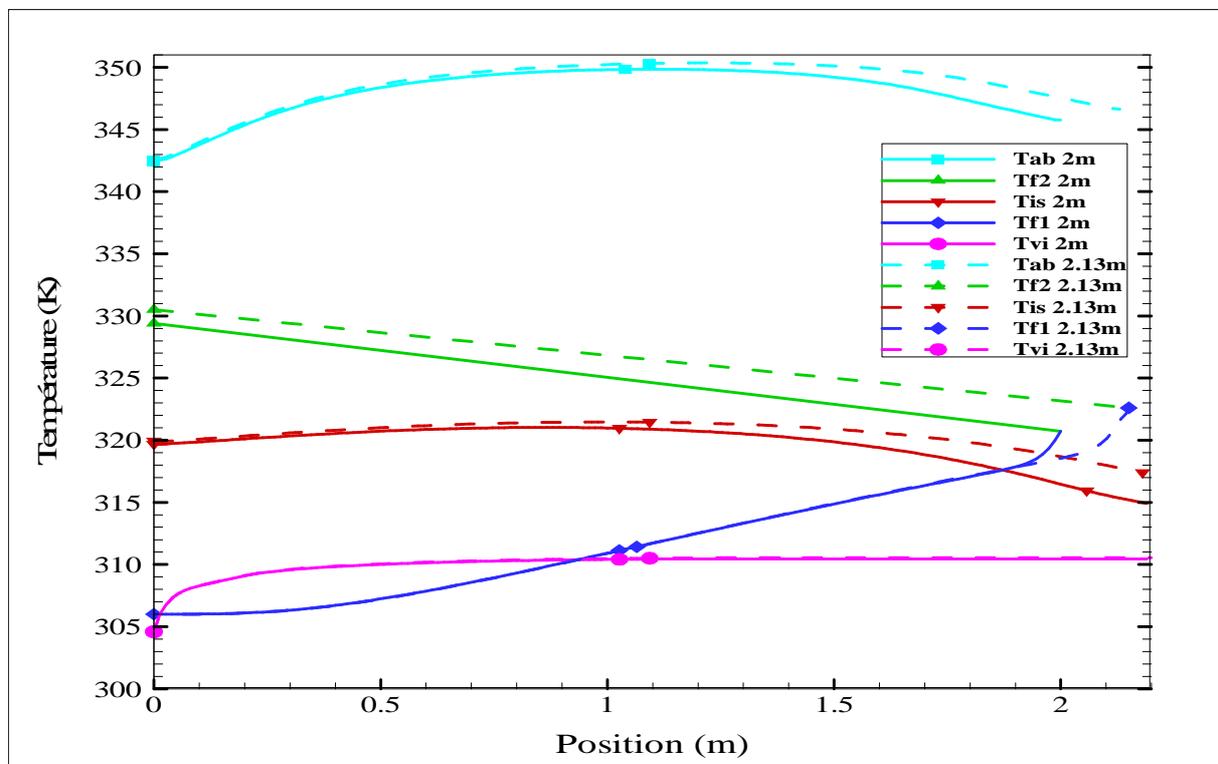


Figure VI.44 : L'évolution des températures des composants du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas de la longueur de l'absorbeur ($L_2=2$ et $L_2=2.13m$) pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

La figure VI.44 montre l'influence de la longueur de l'absorbeur sur les températures des composantes du capteur solaire sans milieu poreux. On remarque que la température du vitrage reste identique avec la diminution de la longueur de l'absorbeur, par contre, une petite diminution au niveau de la température de l'isolation est repérée. En effet, la chaleur de l'absorbeur, qui est la source thermique du capteur, est proportionnelle à la longueur de l'absorbeur. Sa diminution entraîne la diminution de la température de l'isolation à son extrémité. On remarque aussi la diminution de la température du fluide dans les deux conduites car le temps d'échauffement du fluide par l'absorbeur dans le premier cas ($L_2=2.13\text{m}$) est plus que celui dans le deuxième cas où ($L_2 = 2\text{m}$). On constate, que plus la longueur de l'absorbeur augmente plus la température du fluide dans les deux canaux du capteur solaire augmente.

VI.3.2.7.2 Avec milieu poreux

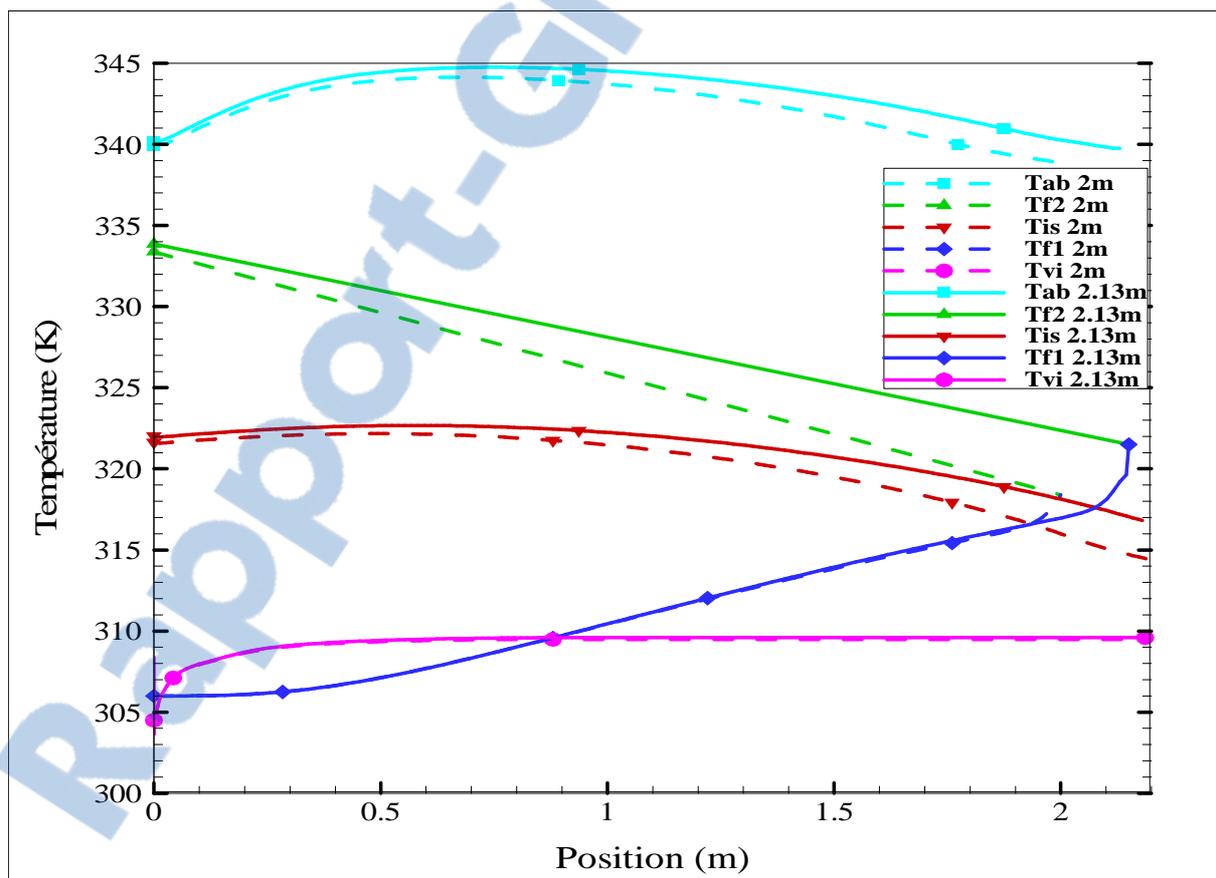


Figure VI.45 : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas de la longueur de l'absorbeur ($L_2 = 2$ et $L_2 = 2.13\text{m}$) pour $I=500\text{W/m}^2$ et $Gf = 0.008\text{ kg/s}$.

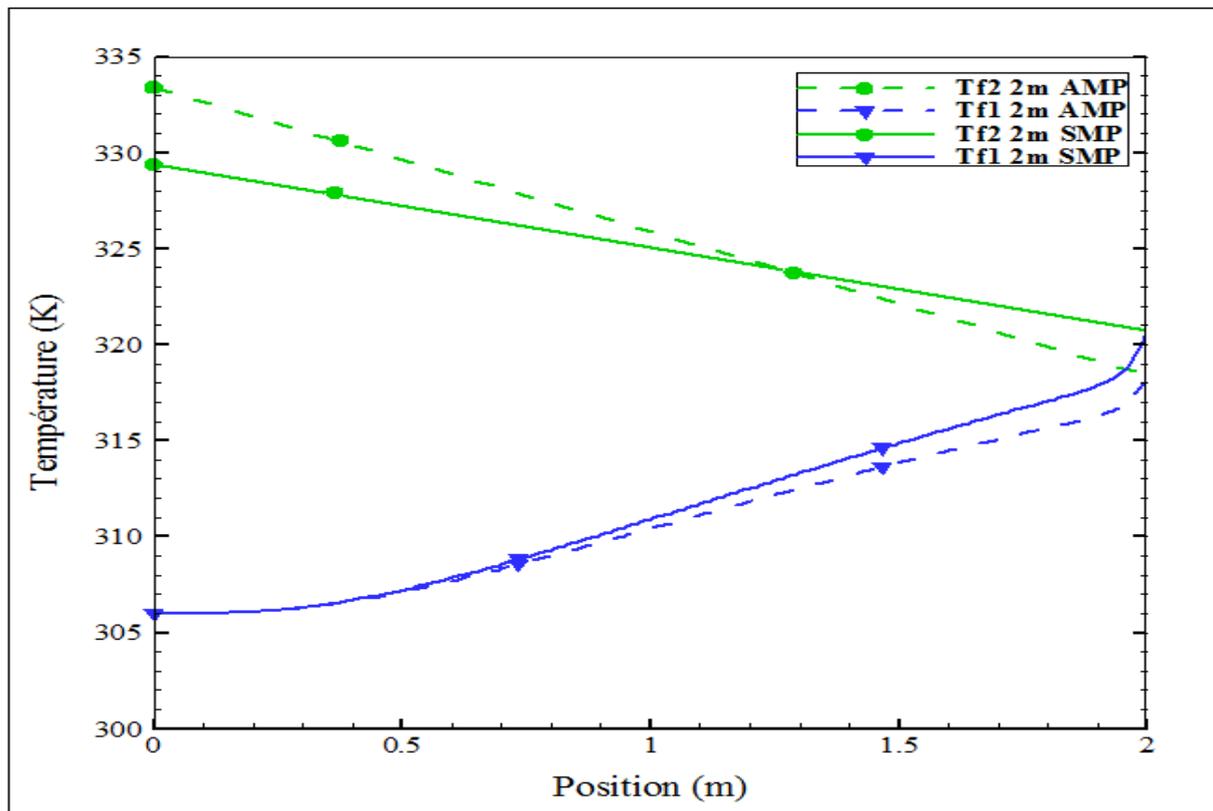


Figure VI.46 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur solaire sans et avec milieu poreux dans le cas de la longueur de l'absorbeur égale à 2m pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

La figure VI.45 montre l'influence de la variation de la longueur de l'absorbeur sur les températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux. On remarque la même chose que le cas précédente de sans milieu poreux. Avec la diminution de la longueur de l'absorbeur on remarque qu'il a une diminution au niveau de son température, de l'isolation et du fluide dans les deux conduites.

La figure VI.46 montre la comparaison entre la température du fluide dans les deux canaux du capteur solaire et dans les deux cas, sans et avec milieu poreux pour une longueur de l'absorbeur égale à 2m. La température du fluide dans le canal inférieur du capteur avec milieu poreux est plus élevée que celle dans le capteur sans milieu poreux, parce que le milieu poreux augment la surface d'échange et le temps de séjours du fluide dans le canal inférieur. On constat finalement que la longueur de l'absorbeur a une grande influence sur le rendement thermique du capteur solaires sans et avec milieu poreux, et que plus la longueur de l'absorbeur augment, plus la température du fluide dans les deux canaux augment.

VI.3.2.8 L'influence de la hauteur de la conduite inférieure sur la température du fluide à la sortie du capteur solaire

En augmentant la hauteur de la conduite inférieure du capteur solaire de 0.07m jusqu'à 0.1m, et en traçant l'évolution des températures des composantes du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

VI.3.2.8.1 Sans milieu poreux

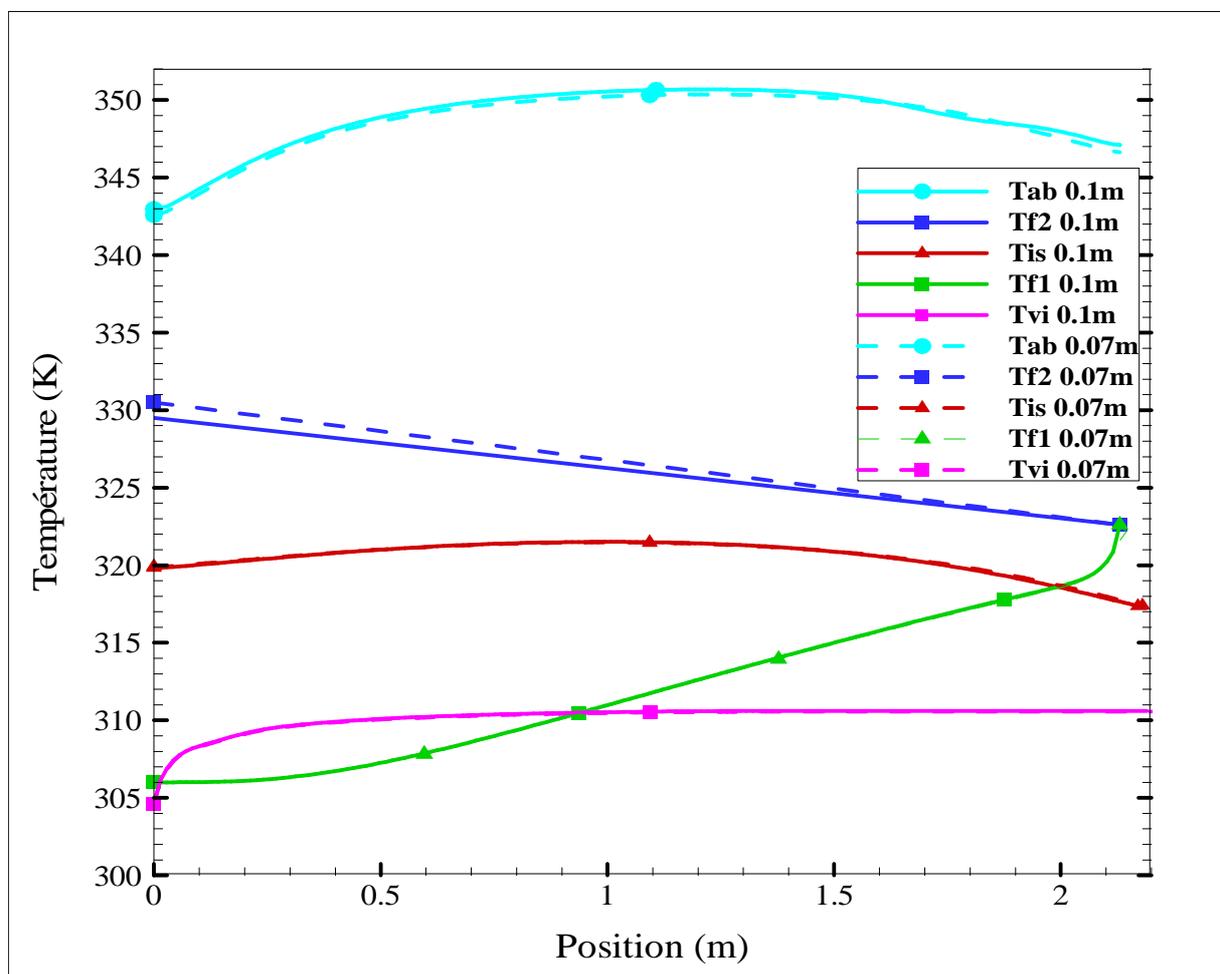


Figure VI.47 : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire sans milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m) pour $I=500W/m^2$ et $G_f = 0.008 kg/s$.

La figure VI.47 montre l'effet de la variation de la hauteur de la conduite inférieure du capteur solaire sans milieu poreux sur la température du fluide. On remarque que les températures des composantes du capteur sont restées identiques sauf la température du fluide dans la conduite inférieure où on remarque une petite diminution qui est due à l'augmentation de la hauteur de la conduite inférieure. Alors, avec l'augmentation de la hauteur de cette dernière, la veine du fluide s'élargi et l'absorbeur chauffe pas bien le fluide.

VI.3.2.8.2 Avec milieu poreux

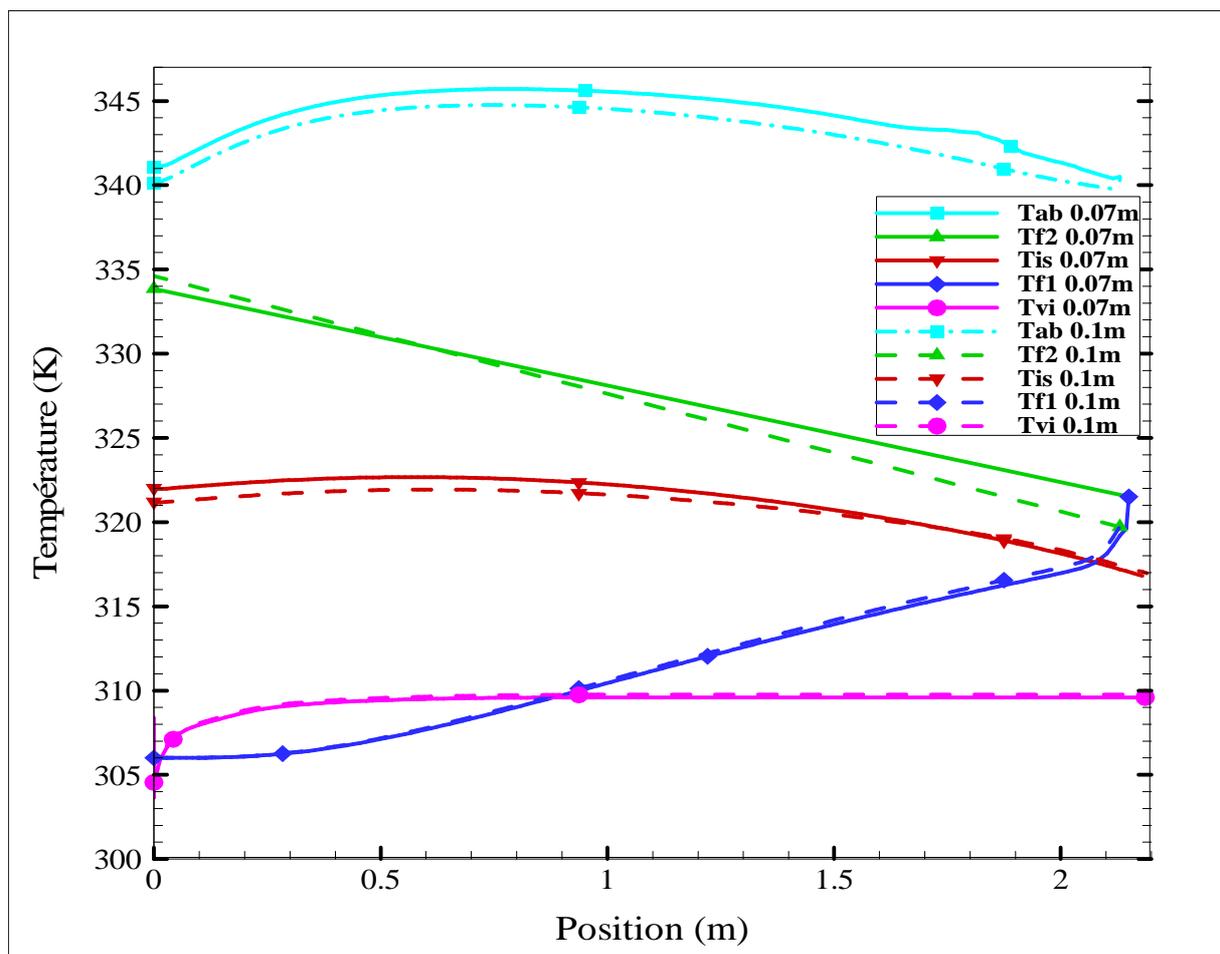


Figure VI.48 : L'évolution des températures des composantes du capteur solaire avec milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m) pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

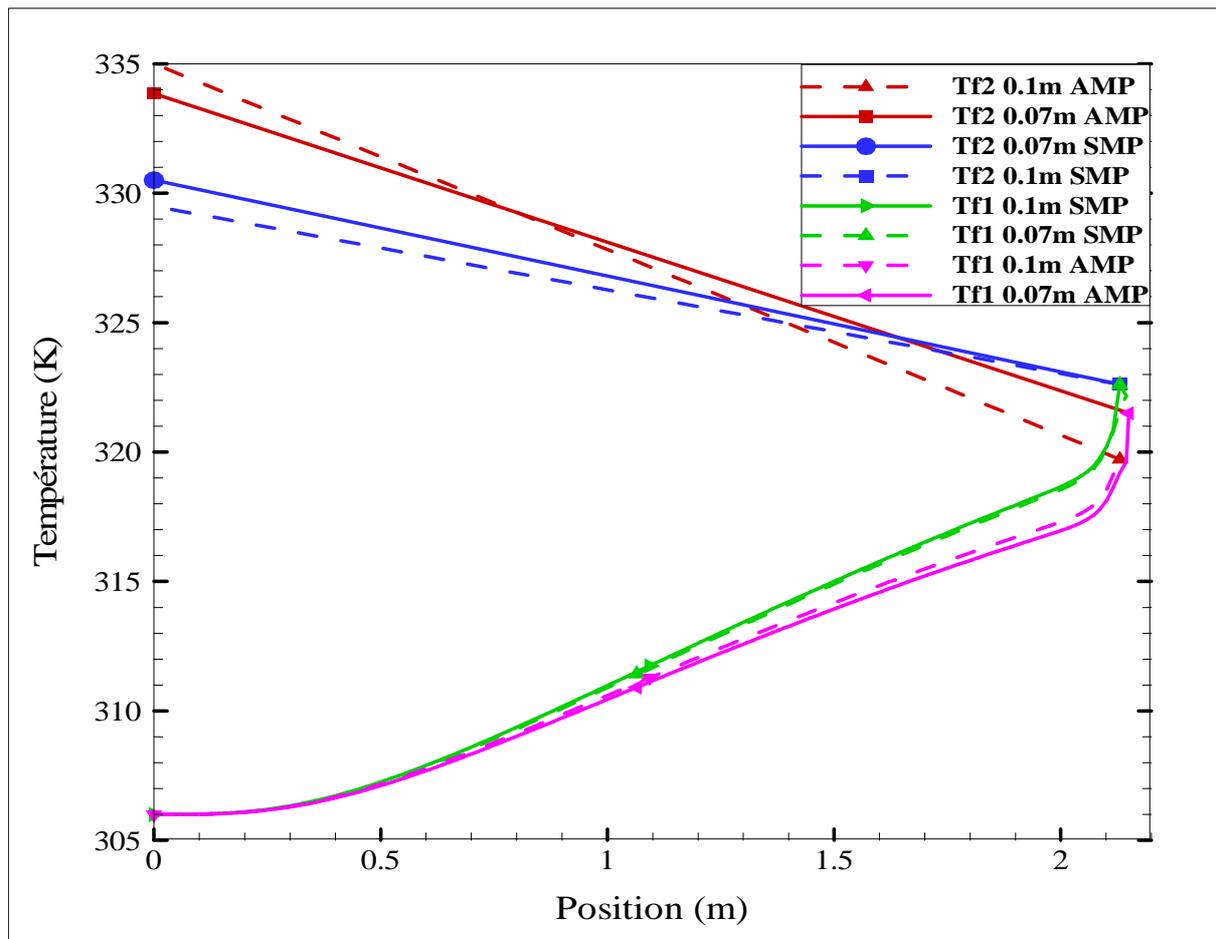


Figure VI.49 : Comparaison entre Tf1 et Tf2 du capteur solaire sans et avec milieu poreux dans les deux cas des différentes hauteurs de la conduite inférieure (0.07 et 0.1m) pour $I=500W/m^2$ et $Gf = 0.008 kg/s$.

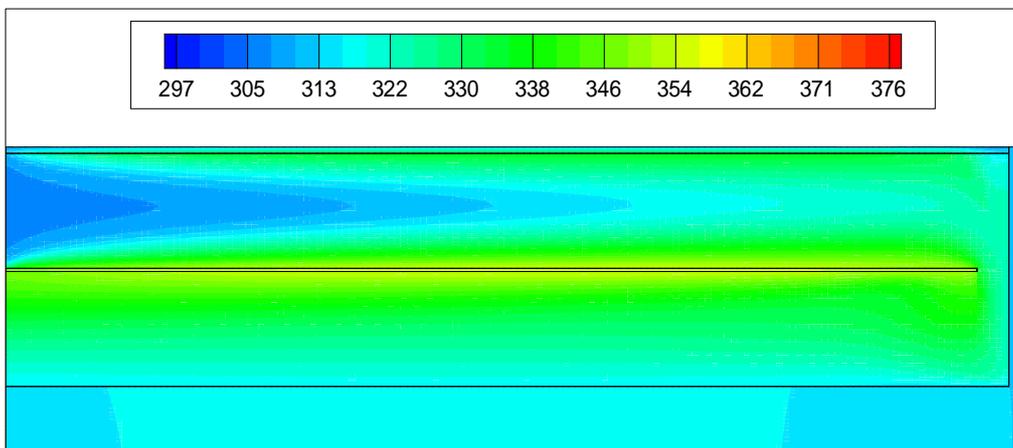
Les figures VI.48 et VI.49 montrent l'influence de l'augmentation de la hauteur de la conduite inférieure du capteur avec milieu poreux sur les températures des composantes du capteur. Contrairement au cas précédent du capteur sans milieu poreux, on remarque l'augmentation de la température du fluide à la sortie du capteur solaire qui est due à l'augmentation de la surface d'échange dans le canal inférieur créée par l'augmentation du milieu poreux.

VI.4 Cas instationnaire

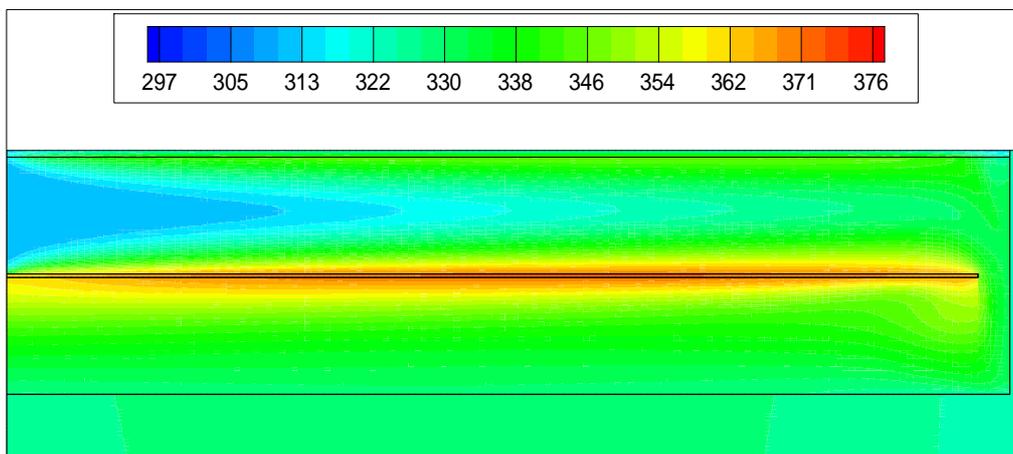
Cette partie est consacrée à l'étude du cas instationnaire du capteur solaire à double passe dans les deux cas, sans et avec milieu poreux, en traçant les contours des isothermes, ainsi que la température du fluide à la sortie du capteur solaire pour différentes heures: 09:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00 et 21:00.

VI.4.1 Sans milieu poreux

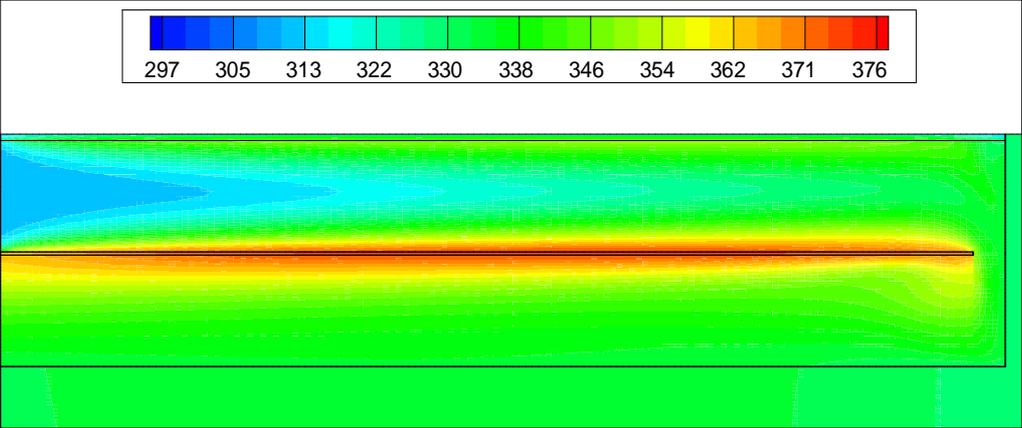
Traçons les isothermes du capteur solaire dans des différentes heures d'une même journée pour voir l'influence du rayonnement solaire sur l'efficacité thermique du capteur.



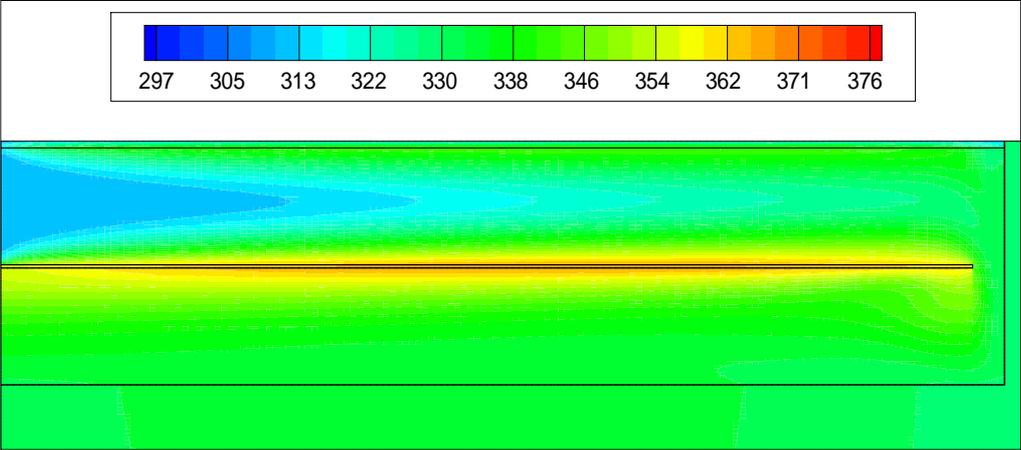
(a)



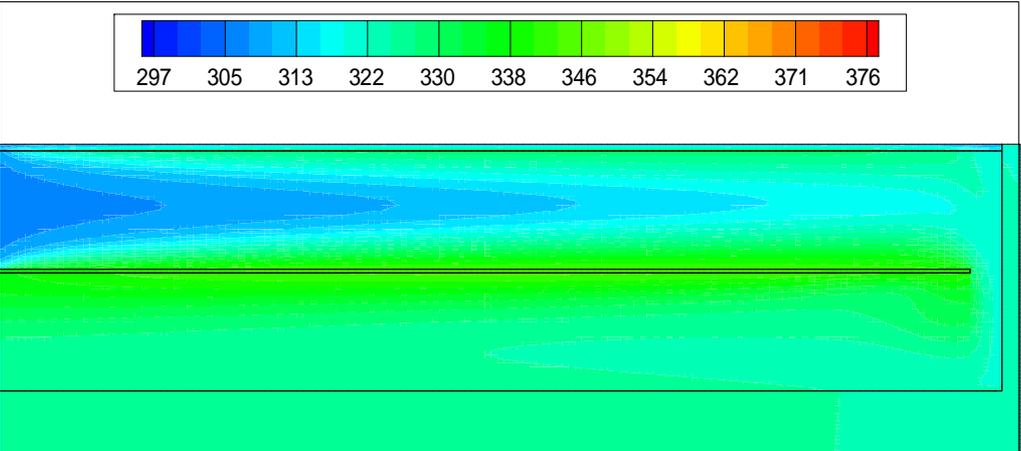
(b)



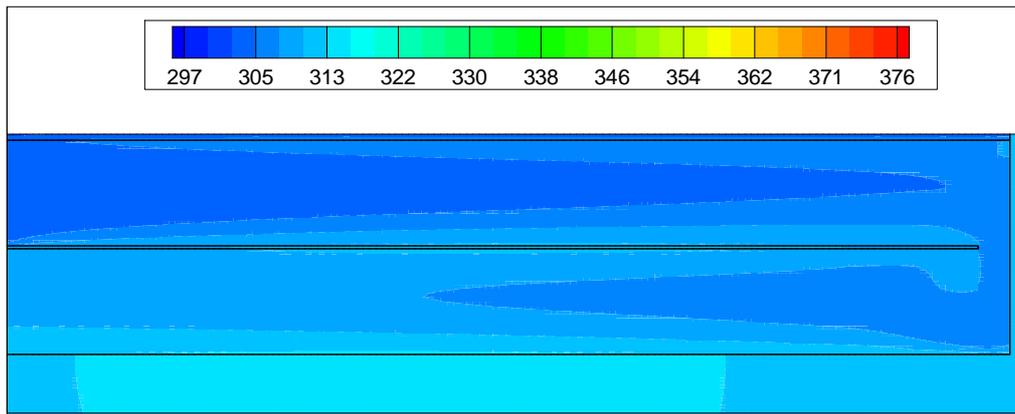
(c)



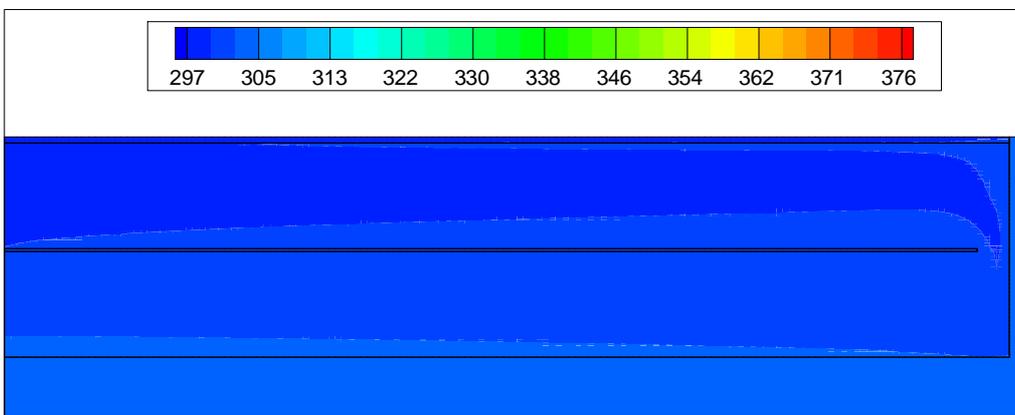
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure VI.50 : Evolution de la température (K) en fonction du temps pour le capteur solaire à double passe sans milieu poreux : (a) 09:00; (b) 11:00; (c) 13:00; (d) 15:00; (e) 17:00; (f) 19:00; (g) 21:00.

La figure VI.50 présente l'évolution des isothermes dans le capteur solaire à double passe sans milieu poreux pour différentes heures. Les isothermes montrent que durant toute la journée, la température de l'absorbeur est la plus importante au niveau du capteur solaire et qu'elle augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire et diminue avec sa diminution. A titre d'exemple, la température maximale de l'absorbeur à 09:00 est de l'ordre de 350K. Après, elle augmente jusqu'à 360K à 11:00, et elle atteint sa valeur maximale qui est de l'ordre de 370K à 13:00 où le rayonnement solaire devient plus important est maximal. Ensuite, elle va chuter à cause de la diminution du rayonnement solaire et diminue jusqu'à 342K à 19:00 pour devenir plus faible et égale à 310K avec le coucher de soleil.

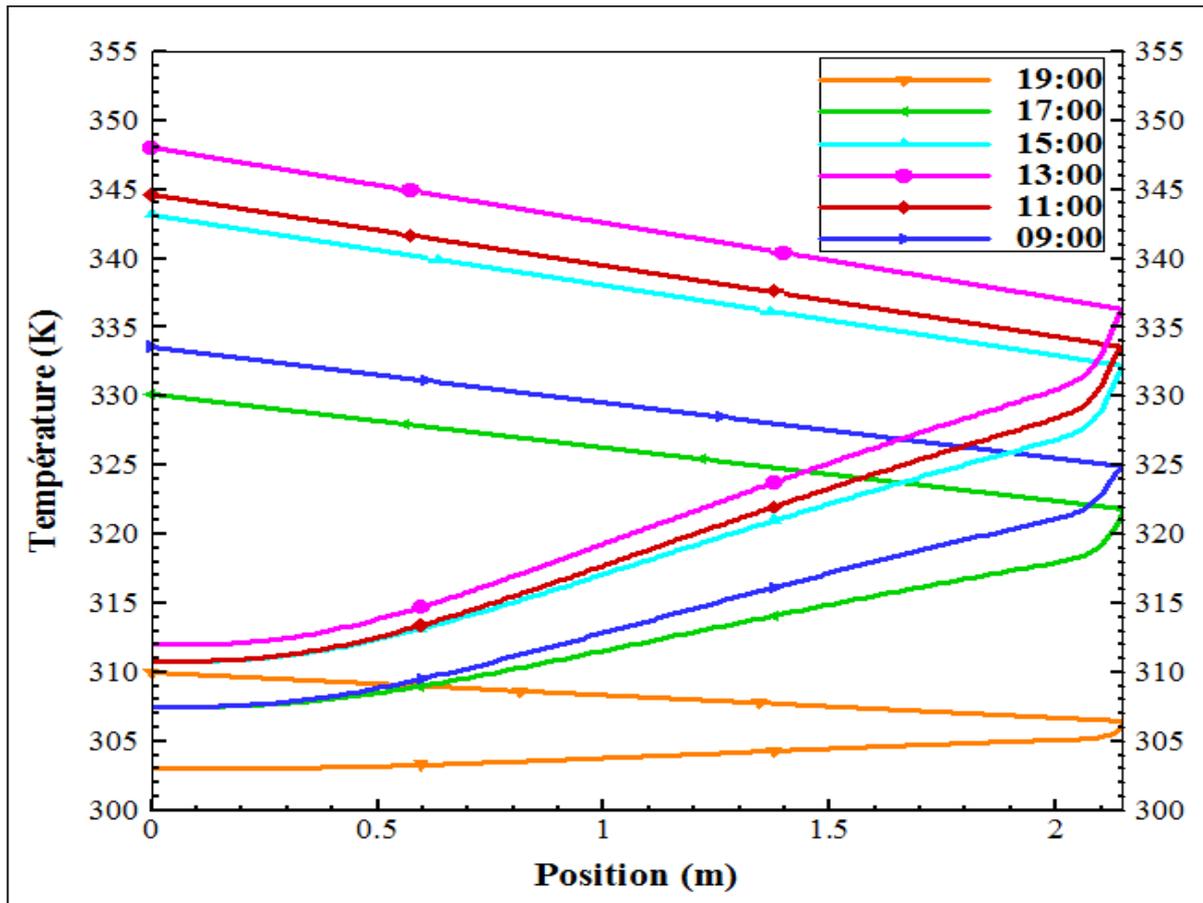


Figure : VI.51 : Evolution du Tf1 et Tf2 du capteur solaire à double passe sans milieu poreux.

La figure VI.51 présente l'évolution de la température du fluide dans le canal inférieur. L'air entre avec une température égale à la température ambiante et s'échauffe sous l'effet de l'absorbeur dans les deux canaux supérieur et inférieur. Il sort finalement avec une température qui dépend de la température de l'absorbeur. On remarque que la température du fluide à la sortie varie avec le passage du temps dans la journée et dépend principalement de la température de l'absorbeur qui dépend du rayonnement solaire. On remarque que la température du fluide à la sortie du capteur solaire à 09:00 est égale à 334K. Après, elle va augmenter sous l'effet de l'augmentation de la température de l'absorbeur pour atteindre sa valeur maximale qui est égal à 348K à 13:00 où la température de l'absorbeur atteint 370K. Ensuite, elle va diminuer jusqu'à 310K à 19:00 où la température de l'absorbeur chute et devient 342K. On constate que l'efficacité thermique du capteur solaire est atteinte sa valeur maximale à 13:00 est devient moins importante avant et après midi avec la décroissance du rayonnement solaire.

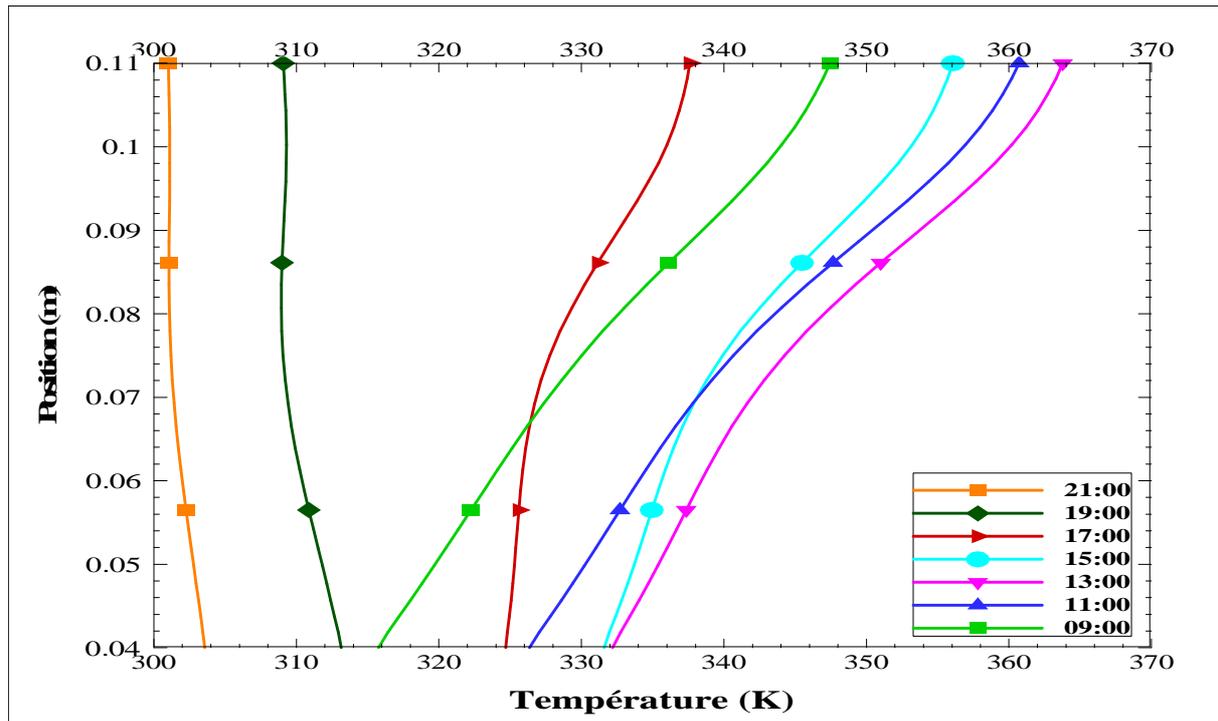
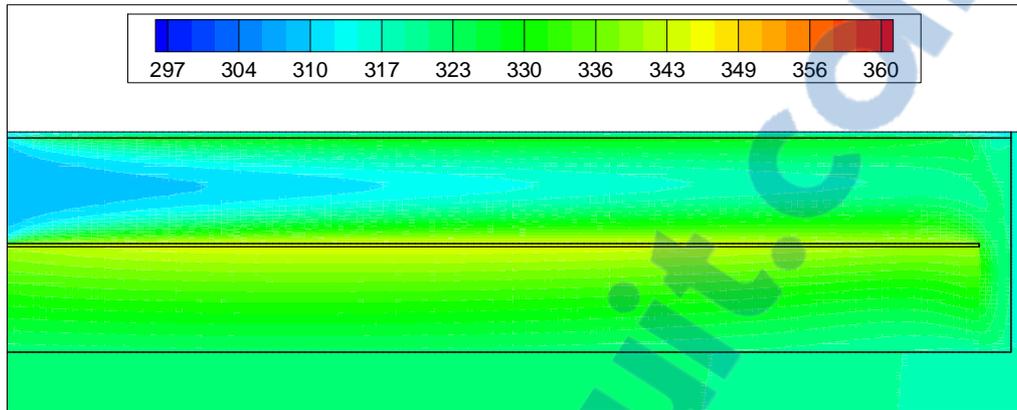


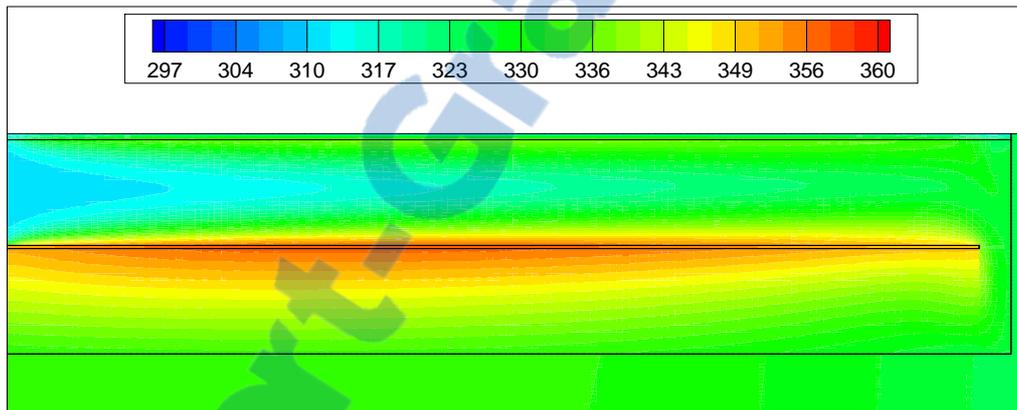
Figure VI.52: Evolution de la température du fluide à la sortie du capteur solaire sans milieu poreux.

La figure VI.52 montre que la température du fluide dans le canal inférieur n'est pas homogène et qu'elle est plus importante au voisinage de l'absorbeur et diminue lorsqu'on s'éloigne de l'absorbeur. A titre d'exemple à 09:00, la température du fluide au voisinage de l'absorbeur est égale à 348K, et elle est de 316K au voisinage de l'isolation, c'est-à-dire que la différence de la température entre le haut et le bas est plus grande et peut atteindre 32°C. La même remarque concerne les températures à 11:00 et à 13:00, cette différence se traduit par la grande influence de l'absorbeur sur la température du fluide car c'est lui qui alimente le fluide. Cependant, la température de l'isolation est encore plus faible et entrain d'augmenter. Après 13:00, on remarque que la forme de la pente change et devient moins importante, à titre d'exemple à 15:00, la température du fluide au voisinage de l'absorbeur est égale à 356K, et elle est de 332K au voisinage de l'isolation, avec une différence de température égale à 24°C qui devient 12°C à 17:00. Après à 19:00, on remarque que la température du fluide au voisinage de l'isolation devient plus grande que celle au voisinage de l'absorbeur. Alors le changement observé sur la forme de la pente se traduit par la diminution progressive au niveau de la température de l'absorbeur parallèlement à la diminution progressive du rayonnement solaire après 13:00 d'un côté, et d'un autre côté, l'influence de l'isolation sur l'échauffement du fluide, car c'est lui qui devient alimenter le fluide après la diminution de la température de l'absorbeur.

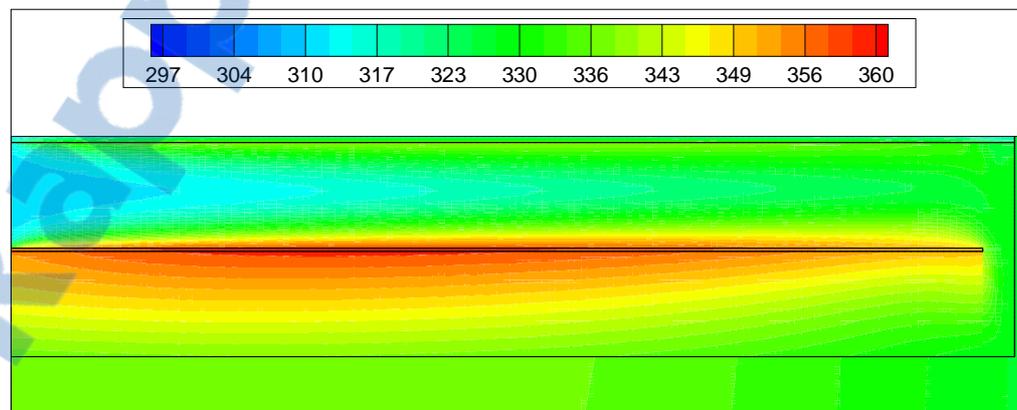
VI.4.2 Avec milieu poreux



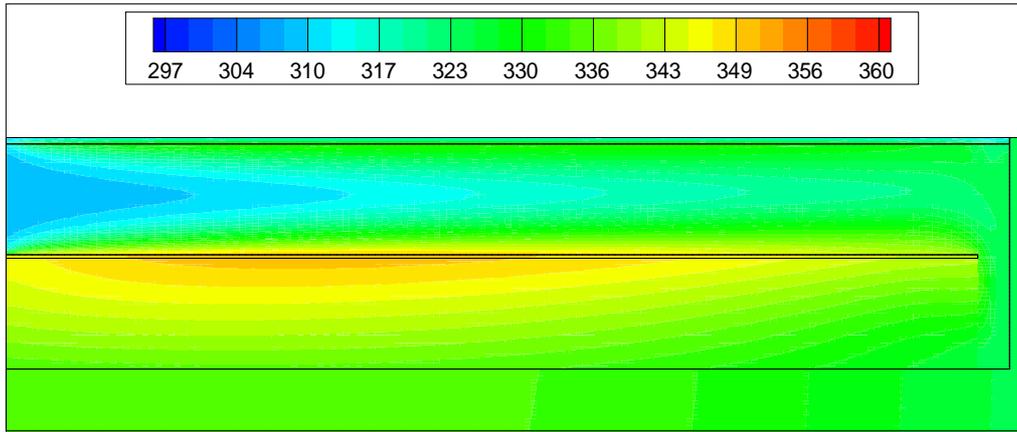
(a)



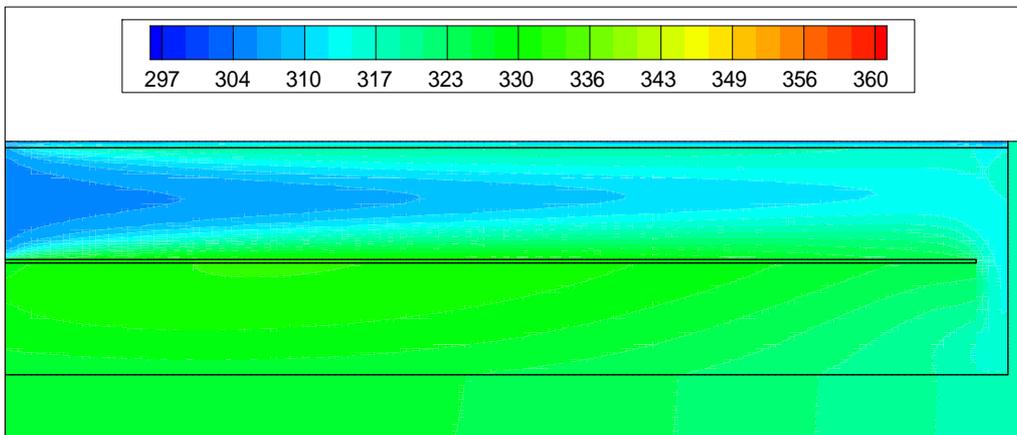
(b)



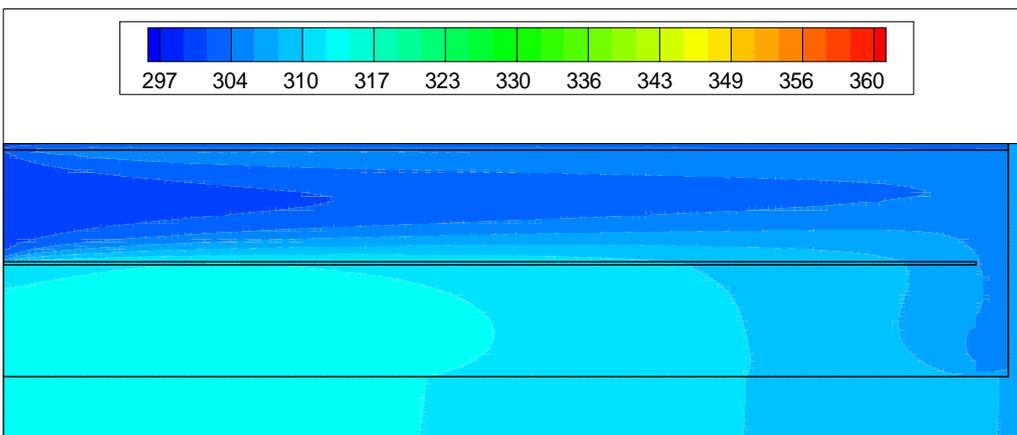
(c)



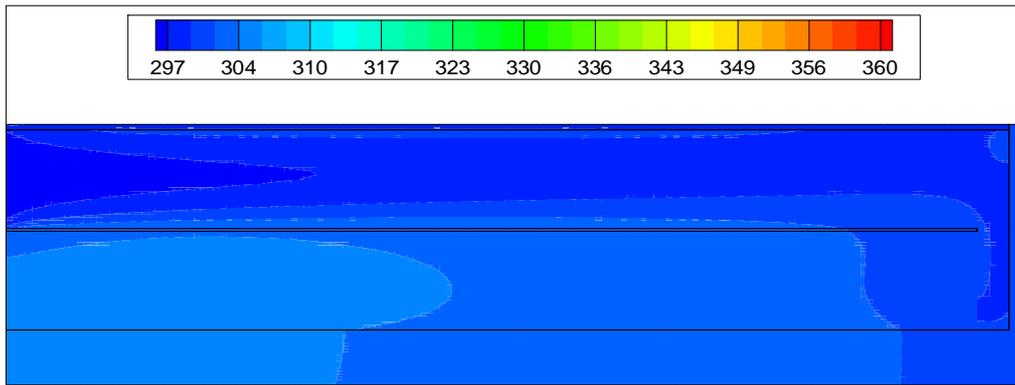
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure VI.53 : Evolution de la température (K) en fonction du temps pour le capteur solaire à double passe avec milieu poreux : (a) 09:00; (b) 11:00; (c) 13:00; (d) 15:00; (e) 17:00; (f) 19:00; (g) 21:00.

La figure VI.53 présente les isothermes du capteur solaire avec milieu poreux, On remarque le même comportement thermique que le cas sans milieu poreux sauf que la température de l'absorbeur dans ce cas est plus faible sous l'effet du milieu poreux. Par conséquent, une augmentation est observée au niveau de la température du fluide dans le deuxième canal. A titre d'exemple, la température maximale observée au niveau de l'absorbeur à 13:00 est de 370K pour le capteur sans milieu poreux et elle est de 355K pour le capteur avec milieu poreux.

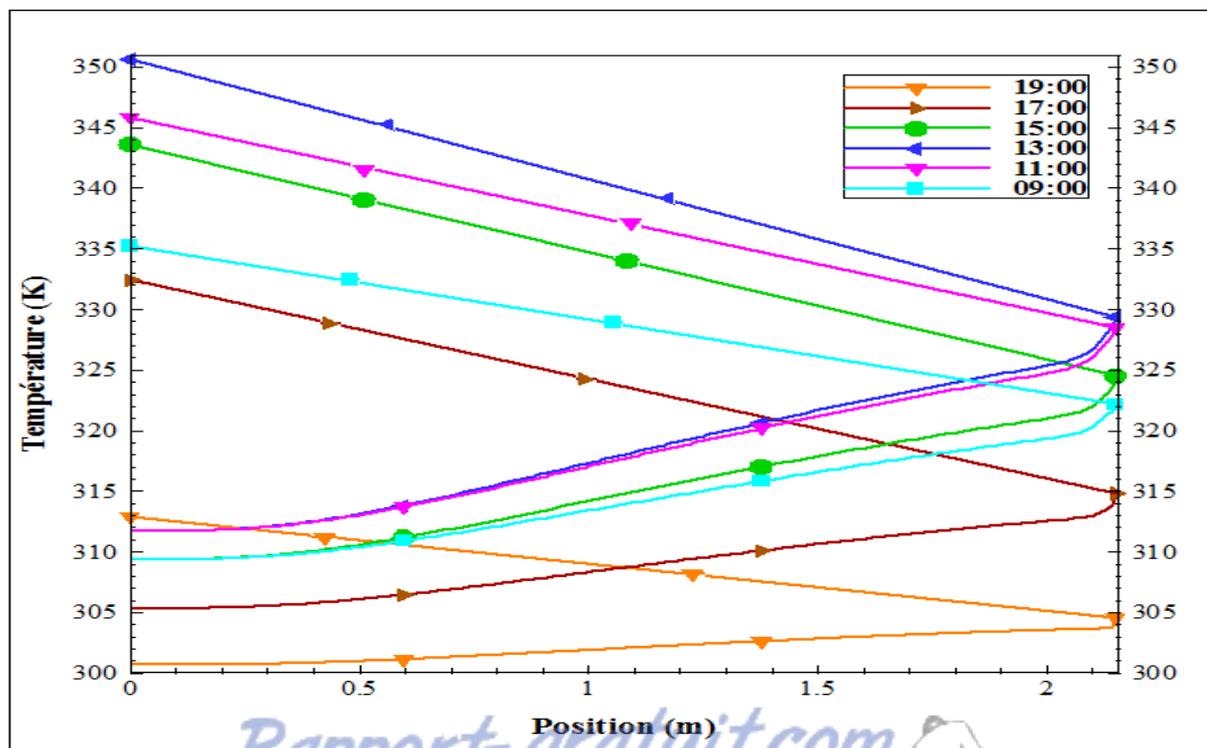


Figure : VI.54 : Evolution du Tf1 et Tf2 du capteur solaire avec milieu poreux.

La figure VI.54 présente l'évolution de la température du fluide du capteur solaire avec milieu poreux. On remarque que la température du fluide atteint la valeur maximale à 13:00, et qui dépend de l'intensité du rayonnement solaire. On remarque aussi que la température du fluide à la sortie dans ce cas est plus élevée que celui dans le cas du capteur solaire sans milieu poreux, et cette augmentation remarquée au niveau de la température du fluide à la sortie est due à l'influence du milieu poreux. A titre d'exemple la température du fluide à la sortie du capteur sans milieu poreux à 13:00 est de 348K, et elle est de 351K pour le cas du capteur avec milieu poreux

VI.4.3 Comparaison entre les deux cas

Traçons l'évolution instationnaire de la température du fluide au centre de la sortie du capteur solaire dans les deux cas, avec et sans milieu poreux dans un seul graphe.

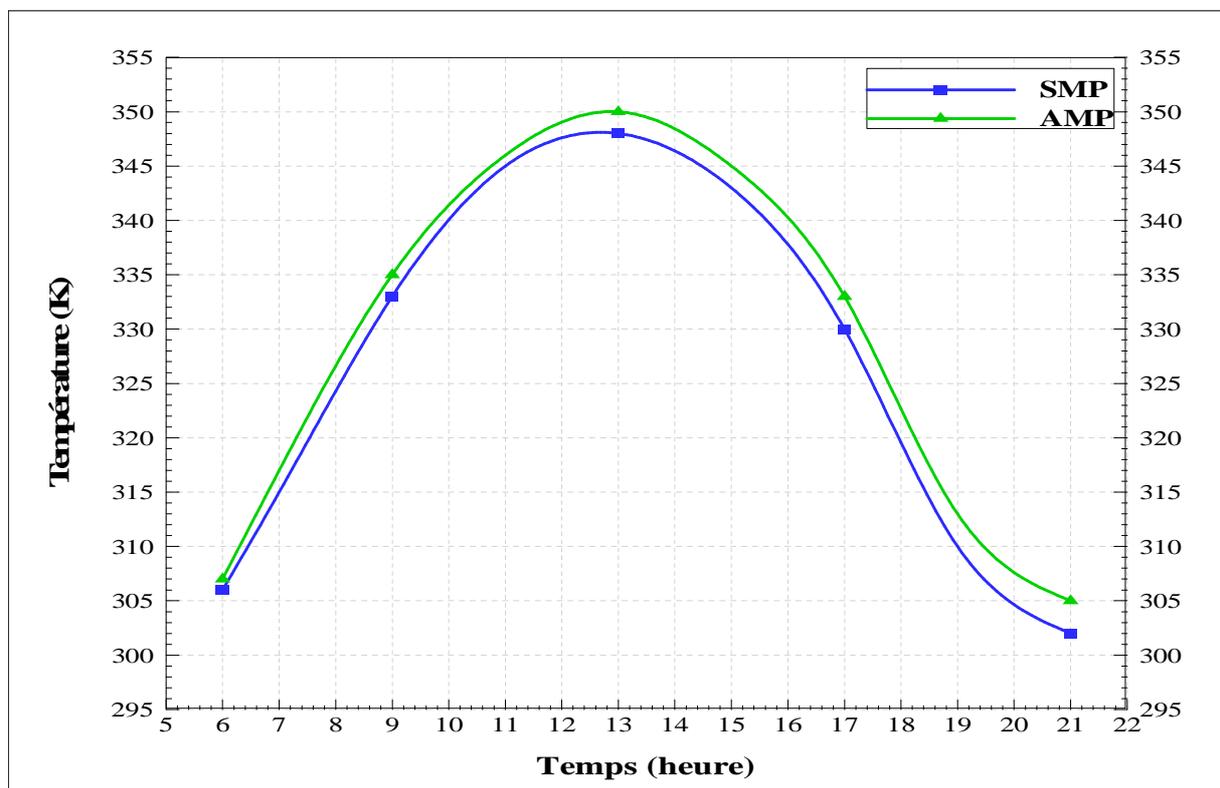


Figure VI.55 : Evolution instationnaire de la température du fluide au centre de la sortie du capteur solaire avec et sans milieu poreux.

La figure VI.55 présente une comparaison entre les deux cas du capteur solaire sans et avec milieu poreux. On remarque que la température du fluide à la sortie dans le cas du capteur solaire avec milieu poreux est plus grande que celle dans le cas du capteur solaire sans milieu poreux, et cette augmentation de la température montre l'influence du milieu poreux sur l'efficacité thermique du capteur solaire. On remarque que la température du fluide augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire jusqu'à atteindre la valeur maximale à 13:00, après elle va diminuer avec sa diminution.

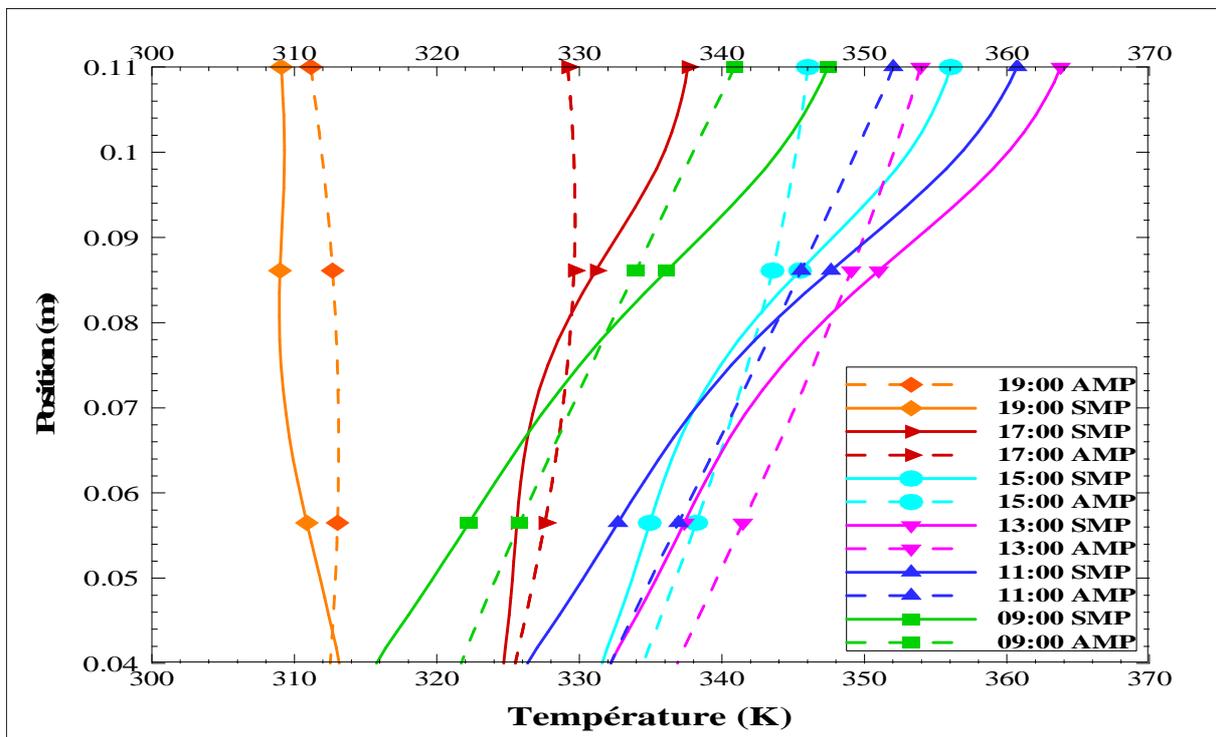


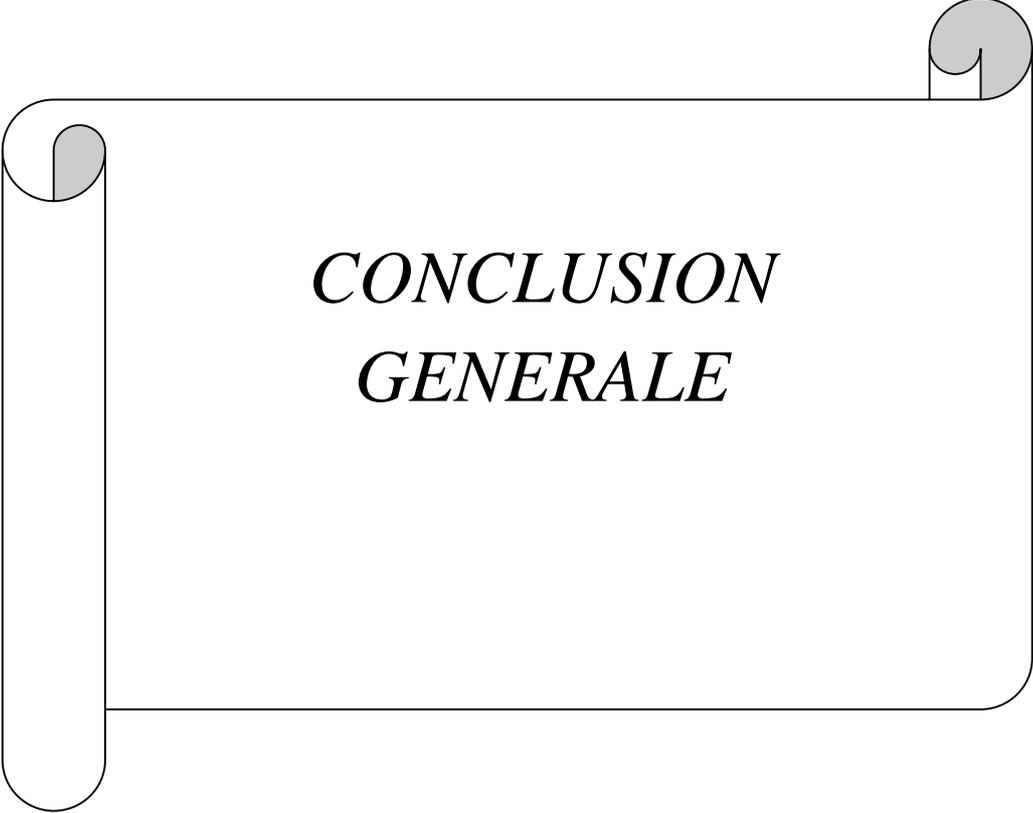
Figure VI.56: Comparaison entre la température du fluide à la sortie du capteur solaire sans et avec milieu poreux.

La figure VI.56 montre une comparaison entre la température du fluide dans les deux cas du capteur solaire. On remarque que la partie supérieure du canal est plus chaude que la partie inférieure dans le cas sans milieu poreux ce qui montre que l'influence de l'absorbeur est beaucoup plus sur ses côtés. Par contre, avec l'addition du milieu poreux, on remarque que la température du fluide devient plus homogène surtout après 13:00. Cette homogénéité de température montre l'influence du milieu poreux qui favorise le transfert de chaleur de l'absorbeur vers le bas. Après 13:00, on remarque que la pente de la température dans le cas avec milieu poreux est moins importante que celle dans le cas sans milieu poreux mais elle

n'est pas totalement homogène car la température de l'absorbeur est encore plus grande que celle du milieu poreux. À titre d'exemple la température du fluide à 15:00 est de 346K en haut du canal, et elle est de 334K en bas. Après deux heures, elle devient 329K en haut et de 326K en bas, ce qui montre que la température du milieu poreux diminue avec une façon très lente que celle de l'absorbeur. A 19:00, la température du fluide devient 311K en haut et elle est de 312K en bas et elle atteint 313K au milieu du canal, ce qui montre que le milieu poreux c'est lui qui alimente le fluide avec la diminution de la température de l'absorbeur.

VI.5 Conclusion

Les résultats trouvés dans ce chapitre montrent que le milieu poreux a une grande influence sur l'augmentation de l'efficacité thermique du capteur solaire, car l'addition du milieu poreux permet d'augmenter la température du fluide à la sortie par l'augmentation de la surface d'échange thermique. Les démentions géométriques et le débit massique ont aussi influent sur l'efficacité thermique du capteur solaire. L'augmentation du rayonnement solaire augmente la température de l'absorbeur, ce dernier qui provoque l'augmentation de la température du fluide.



*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité thermique du capteur solaire à air à double passe avec et sans milieu poreux. La simulation numérique du système aboutie à la détermination de l'évolution des températures des différents composants du capteur solaire et le profil de la vitesse axiale dans des différentes section du canal, ainsi que l'influence de certains paramètres sur son efficacité thermique. Cette étude à été réalisée à l'aide du code der calcul fluent basée sur la méthode des volumes finis.

Le capteur solaire a été étudié dans deux cas, sans et avec milieu poreux pour faire une comparaison entre les températures du fluide à la sortie (dans le deuxième canal) et montrer ainsi l'influence du milieu poreux sur l'efficacité thermique du capteur solaire.

Les équations qui régissent l'écoulement d'un fluide sont les équations de la conservation de la quantité du mouvement, de la conservation de masse (continuité), et d'énergie, sont résolues par la méthode des volumes finis.

Des modifications ont été faites au niveau de la longueur et l'épaisseur de l'absorbeur ainsi que la hauteur du canal inférieur pour voir l'influence de ces dimensions géométriques sur l'efficacité thermique du capteur solaire.

Les profils et la distribution de la température totale dans le capteur ont été obtenus pour tous les composants du capteur. L'évolution de la vitesse axiale, le coefficient de frottement et la distribution de la température sont traités le long du capteur et pour différents valeurs de débit massique et du rayonnement solaire.

Les résultats obtenus montrent l'influence du débit massique et du rayonnement solaire sur l'efficacité thermique du capteur solaire. L'augmentation du rayonnement solaire va augmenter la température de l'absorbeur et par conséquent une élévation au niveau de la température du fluide dans les deux canaux. L'augmentation du débit massique va diminuer le temps de séjour du fluide à l'intérieur du capteur qui donne un mauvais échauffement du fluide. Par contre, avec des faibles valeurs du débit le fluide aura suffisamment de temps pour un bon échauffement.

Les dimensions géométriques influent aussi sur l'efficacité thermique du capteur solaire. L'augmentation de la longueur et de l'épaisseur de l'absorbeur permet d'augmenter la chaleur absorbée par ce dernier qui entraîne l'augmentation de la température du fluide.

L'addition du milieu poreux dans le canal inférieur du capteur solaire permet d'augmenter la surface d'échange entre le fluide et le matériau poreux qui provoque l'augmentation de la température du fluide à la sortie du capteur. Quand la porosité augmente, l'efficacité thermique augmente aussi, alors, avec l'addition du milieu poreux on peut gagner plus d'énergie thermique.

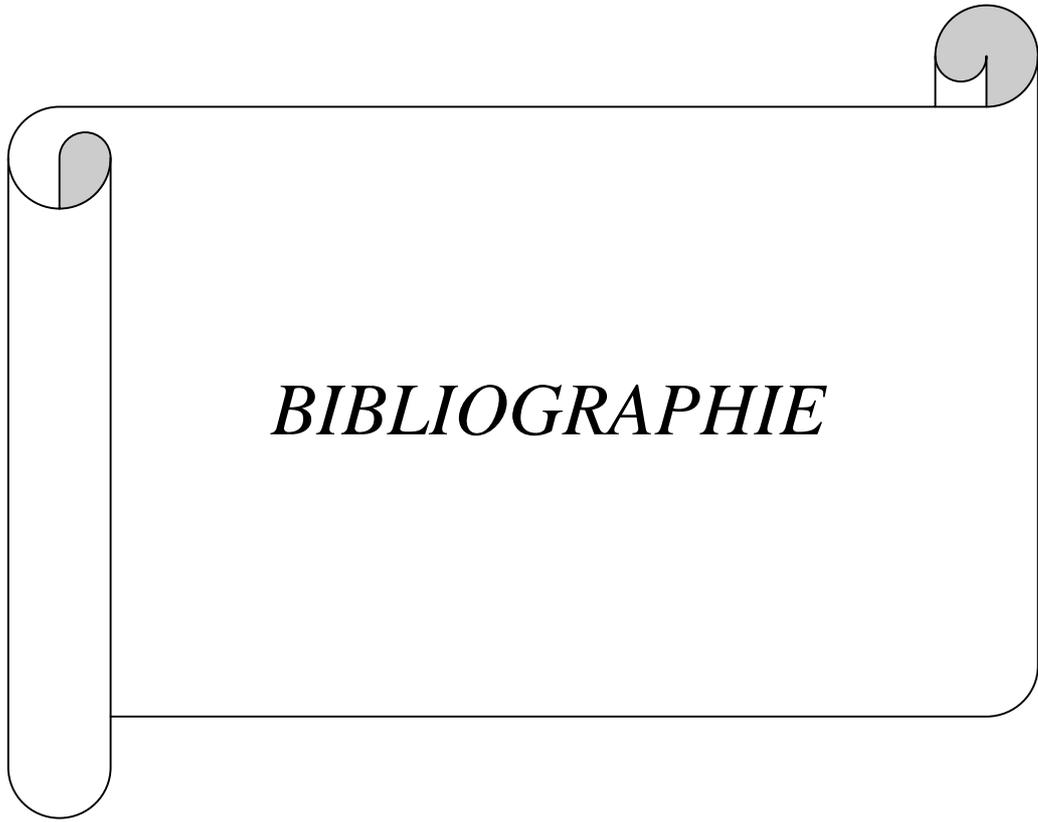
Une augmentation de la vitesse dans la région de retour (entrée du canal inférieur) du capteur est observée entraînant des zones de recirculation qui résulte du changement brusque du sens de l'écoulement.

Les zones les plus chaudes sont localisées au voisinage de l'absorbeur car il absorbe la grande partie du rayonnement solaire grâce à son bon coefficient d'absorption.

L'utilisation des valeurs de débit importantes et donc de forte vitesses qui augmente nettement le coefficient du frottement et améliore le taux du transfert thermique surtout dans la partie de retour du capteur.

Enfin, en perspective, cette étude peut être étendue en s'intéressant à :

- Etudier le problème en (3D);
- Faire varier l'inclinaison du capteur pour voir son effet sur les résultats ;
- Insertion des ailettes et des chicane dans le premier passage afin d'améliorer le transfert thermique ;
- Etudier le capteur pour différentes conditions climatiques ;
- L'utilisation des différents types des matériaux poreux pour voir qui est le meilleur type qui donne la bonne efficacité thermique.



BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- [01] **H.M. Yeh and T.T. Lin.** “The effect of collectors aspect ratio on the collectors efficiency of flat-plate solar air”. *Energy*, 20 (1995), pp. 1041-1047.
- [02] **N. Nijegorodov, P.K. Jain and K.R.S. Devan.** “A graphical method of measuring the performance characteristics of solar collectors”. *Renewable Energy*, 7 (1996), pp. 23- 31.
- [03] **A. A. Mohamad.** “High efficiency solar air heater”. *Solar Energy*, 60 (1997), pp. 71-76.
- [04] **A. Benkhelifa.** “ Optimisation d’un Capteur Solaire Plan “. *Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique*, (1998), pp. 13-18.
- [05] **F. Mokhtari et D. Semmar.** “Etude Expérimentale d’un Capteur Solaire à Air ”. *Rev. Energ. Ren. : Valorisation* (1999) 243-246
- [06] **N.T. Ahmad.** “Agricultural solar air collector made from low cost plastic packing film”. *Renewable Energy*, 23 (2001), pp. 663–671.
- [07] **A.A. Zaïd, A. Moulla, M.S. Hantala et J.Y. Desmons.** “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.
- [08] **A. Kürklü, A. zmerzi, S. Bilgin.** “Thermal performance of a water-phase change material solar collector”. *Renewable Energy*, 26 (2002) 391–399.
- [09] **A. Abene, V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued.** “Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape”. *Journal of Food Engineering*, 65 (2004), pp. 15–22.
- [10] **M.N. Bargacha, R. Tadilia, A.S. Dahmanb, M. Boukallouchc.** “Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco”. *Renewable Energy*, 29 (2004), pp. 1073–1083.
- [11] **N. Moumimi, S.Y. Ali, A. Moumimi, J.Y. Desmons.** “Energy analysis of a solar air collector with rows of fins”. *Renewable Energy*, 29 (2004), pp. 2053–2064.
- [12] **S.Y. Ali.** “Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing”. *Renewable Energy*, 30 (2005), pp. 271–280.
- [13] **T. Koyuncu.** “Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications”. *Renewable Energy*, 31 (2006), pp. 1073–1088.
- [14] **H. Gunerhan, A. Hepbasli.** “Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications”. *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 779–783.

- [15] **M. M. Hassan, Y. Beliveau.** “Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis”. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 1069–1078.
- [16] **F. Ben Yelles, B. Benabadi, B. Benyoucef, Z. Ziani.** “Comparaison entre un capteur a aérogel de silice et d’autres capteurs plans ». 13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007.
- [17] **S. Oudjedi1, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui et A. Belhamri.** “Etude paramétrique d’un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2)”. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS’08 Alger* (2008) 255 – 266.
- [18] **O. Turgut, N. Onur.** “Three dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface”. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (2008), doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.017.
- [19] **A. Labed, N. Moumni, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moumni.** “Etude théorique et expérimentale des performances d’un capteur solaire plan à air muni d’une nouvelle forme de rugosité artificielle”. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4* (2009) 551 – 561.
- [20] **A. Zerrouki, B. Tedjiza et N. Said.** “Modélisation des Pertes Thermiques dans un Capteur Solaire à Air à deux Passes”. *Rev. Energ. Ren. Vol. 5(2002)49-58*.
- [21] **K. Sopian, Supranto, W.R.W. Daud, M.Y. Othman, V.B. Yatimc.** “Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media”. *Renewable Energy* 18 (1999) 557±564.
- [22] **E. A. Musa, K. Sopian and S. Abdullah.** “Heat Transfer Analysis and Pressure Drop Correlations for the Double-Pass Solar Collector with Porous Media”. *Journal of Energy & Environment* 3 (2004) 15 – 24.
- [23] **D. Jain, R.K. Jain.** “Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application”. *Journal of Food Engineering* 65(2004) 497–509.
- [24] **Mohd, Yusof Hj, Othman, B. Yatim, K. Sopian, Mohd. N.A. Bakar.** “Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins”. *Renewable Energy* 30 (2005) 2005–2017.
- [25] **X.Q. Zhai, Y.J. Dai, R.Z. Wang.** “Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors”. *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 741- 757.

- [26] **P. Naphon.** « Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater ». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32, pp.140–150, 2005.
- [27] **P. Naphon.** « On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins ». *Renewable Energy* 30, pp.1345–1357, 2005.
- [28] **Mohd. Y.Othman, B.Yatim, K. Sopian, N.A. Bakar.** “Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector”. *Desalination* 209 (2007) 43-49.
- [29] **M.R.I. Ramadan, A.A. El-Sebaii, S. A. Enein, E. El-Bialy.** « Thermal performance of a packed bed double-pass solar air heater ». *Energy* 32, pp. 1524–1535, 2007.
- [30] **C. Lertsatitthanakorn, N. Khasee, S. Atthajariyakul, S. Soponronnarit, A. Therdyothin b. Ryosuke, O. Suzuki.** “Performance analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector”. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1105– 1109.
- [31] **C.D. Ho, H.M. Yeh, T.W. Cheng, T.C. Chen, R.C. Wang.** “The influences of recycle on performance of baffled double-pass flat-plate solar air heaters with internal fins attached”. *Applied Energy* 86 (2009) 1470–1478.
- [32] **A. Fudholi, M.H. Ruslan, M.Y. Othman, M. Yahya, Supranto, A. Zaharim, and K. Sopian.** “Collector Efficiency of the Double-Pass Solar Air Collectors with Fins”. *Selekted Topics in System Science and Simulation in Engineering.*
- [33] **K. Sopian, M.A. Alghoul, E.M. Alfegi, M.Y. Sulaiman, E.A. Musa.** “Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media”. *Renewable Energy* 34 (2009) 640–645.
- [34] **A. Fudholi, M.H. Ruslan, L.C. HAW, S. Mat, M.Y. Othman, A. Zaharim & K. Sopian.** “Performance of Finned Double-Pass Solar Air Collector”. *Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology.* 978-1-61804-065-7
- [35] **A.P. Omojaro, L.B.Y. Aldabbagh.** “Experimental performance of single and double pass solar air heater with fins and steel wire mesh as absorber”. *Applied Energy* 87 (2010) 3759–3765.
- [36] **B.M. Ramani, A. Gupta, R. Kumar.** “Performance of a double pass solar air collector”. *Solar Energy* 84 (2010) 1929–1937.
- [37] **R. Kumar, M. A. Rosen.** “Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins”. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 1402e1410.
- [38] **C.D. Ho, H.M. Yeh, T.C. Chen.** “Collector efficiency of upward-type double-pass solar air heaters with fins attached”. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 49–56.

- [39] **A. Fudholi, K. Sopian, M.H Ruslan, M.Y. Othman and M. Yahya.** “Thermal Efficiency of Double Pass Solar Collector with Longitudinal Fins Absorbers”. American Journal of Applied Sciences 8 (3): 254-260, 2011 ISSN 1546-9239.
- [40] **A.A. El-Sebaili, S.A. Enein, M.R.I. Ramadan, S.M. Shalaby, B.M. Moharram.** “Thermal performance investigation of double pass-finned plate solar air heater”. Applied Energy 88 (2011) 1727–1739.
- [41] **S. Chamoli, R.Chauhan, N.S. Thakur, J.S.Saini.** “A review of the performance of double pass solar air heater”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 481-492.
- [42] **P. Kumar.** “Effect of Differential Mass Flow Rate on the Thermal Performance of Double Duct Packed Bed Solar Air Heaters”. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012.
- [43] **C.D. Ho, H. Chang, R.C. Wang, C.Sh. Lin.** “Performance improvement of a double-pass solar air heater with fins and baffles under recycling operation”. Applied Energy 100 (2012) 155–163.
- [44] **S.S. Krishnananth, K.K. Murugavel.** “Experimental study on double pass solar air heater with thermal energy storage”. Journal of King Saud University-Engineering Sciences (2012).
- [45] **Site internet:** www.EnergieSolaire.com. 05/01/2013.
- [46] **K. Salima.** “Etude théorique et numérique des systèmes couplés : distillateur plan-captur et distillateur hot box-captur”. Thèse de magister (2009) 03-15.
- [47] **B. Mourad.** “Contribution a l’étude, la simulation et l’analyse des pompes à chaleur assistées par l’énergie solaire”. Thèse de magister (2008) 05-24.
- [48] **S. Souad.** “Effet des paramètres opérationnels sur les performances d’un capteur solaire plan”. Thèse de magister (2010) 05-19.
- [49] **A. Dalila.** “Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives”. Thèse de magister (2010) 17-39.
- [50] **K.J. Russell.** “Are Good Electrical Insulators Also Good Thermal Insulators? A Study of Thermal Conductivity”. California State Science Fair”. Project Summary (2006). Ap 02/06
- [51] **Site Web:** www.eie43.fr. 03/03/2013
- [52] **S. Medvedev, S. Khomik, H. Olivier, B. Gelfand.** “Effectiveness of Protective Covers in Case of a Detonation Wave Reflection”. Institute of Chemical Physics, RAS, Moscow, Russia (2003) pp 1-4.
- [53] **W. Chen, W. Liu.** “Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber”. Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1251–1258.