

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Energétique

Sujet

Analyse de comportement thermique d'un capteur solaire
plan à air couplé avec un concentrateur parabolique composé
(CPC)

Présenté par : BOUHASSOUN Samiha

DJEDOU Sara

Soutenu publiquement, le 13 / 06 /2017, devant le jury composé de :

Mr. AZZI Ahmed	MCA. Univ. Tlemcen	Président
Mr. KORTI Abdel Ilah Nabil	Pr. Univ. Tlemcen	Examineur
Mme. SAIB Hind	MAA. Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. SAIM Rachid	Pr. Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. BENAMEUR Benamar	MAA. C.Univ. De Naama	Co-encadreur

Année universitaire : 2016-2017

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail : À mes parents, avec toute ma reconnaissance
et ma gratitude pour leurs sacrifices.*

À toutes ma famille

À tous mes enseignants chacun avec son nom

À tous mes amis



DJEDOUÏ Sara

Dédicaces

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leur soutien
Permanant durant toutes mes années d'études leurs sacrifices illimités,
leurs réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour
mon instruction et pour me voir réussir un jour*

*Sans oublier mon grand-père MOHAMMED
et ma grand-mère FATMA*

À mes frères Fetfi, Mohammed Islam et ma sœur Zohor

À ma famille mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines

À ma sœur de la vie, ma meilleur amie : Khadidja Belabed

À ma binôme : Sara

*À mes amies Farida, Hanéne, Nacera, Nadjet,
Assia, Meriem...*

À mes collègues Promo M2 GE 2017

BOUHASSOUN Samiha

Remerciements

Un grand merci à Dieu de nous avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et de savoir.

*On voudra saisir cette occasion pour remercier notre encadreur Mr. **SAIM Rachid** pour avoir accepté de diriger notre travail.*

*On remercie infiniment Monsieur **BENAMEUR Benamar** pour être toujours présents par ses conseils, ses encouragements et d'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de son expérience dans le domaine d'énergétique.*

On remercie vivement :

*Monsieur **AZZI Ahemd***

*Monsieur **Korti Abdel Ilah Nabil***

*Madame **SAIB Hind***

D'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à notre jury de soutenance.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouve ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Enfin, on ne pourrait terminer sans une pensée à l'ensemble de nos enseignants, l'expression de notre profonde gratitude.

Samiha & Sara

ملخص

تتمحور هذه المذكرة حول التحليل الزمني و الثابت لسلوك الملتقط الشمسي المستعمل في تسخين الهواء، مدمج مع مكثف مركب من قطعين مكافئين عاكسين، أخذين بعين الإعتبار المعطيات المناخية و الشمسية لمنطقة تلمسان.

تم إنجاز محاكات المجمع الشمسي مرفقا بالمكثف المركب و مقارنته بنموذجين آخرين من الملتقطات ذات الممر الواحد للهواء (ملتقط بسيط، و ملتقط مزود بتجويف مغلق). قمنا أيضا باستعمال طريقة الفوارق المنتهية من أجل تجزئة الحد الزمني و التحميلي للمعادلات التفاضلية. استعملنا أيضا خوارزمية نيوتن-رافسن من أجل حل أنظمة المعادلات الغير خطية لتوازنات الطاقة.

تم إنجاز برنامج رقمي بلغة الماطلاب مع التحقق من دقته بالمقارنة مع نتائج أخرى منشورة في بحث سابق. قمنا أيضا بتحليل الإضافة المقدمة من المكثف و إثباتها في شروط متغيرة في الزمن.

الكلمات المفتاحية: الفوارق المنتهية، خوارزمية نيوتن رفسون، الملتقطات الشمسية، مكثف مكافئ مركب، الثابت، المتغير في الزمن.

Abstract

The work of this thesis is about the analysis of steady/unsteady behaviour of flat plate solar air heater coupled with compound parabolic concentrator (CPC), considering solar data of Tlemcen. The collector with CPC was simulated and compared with two flat plate configurations (02) having one flow passage (simple collector, collector with closed cavity). The finite difference method was employed to discretize transient and convective terms. Newton-Raphson algorithm was used for the linearization of heat balance systems of equations.

A MATLAB code was written and validated in steady state conditions with precedent results of literature. The effect of CPC was analysed and demonstrated in unsteady state conditions.

Key words: flat plate solar air heaters, steady, unsteady, CPC, finite difference, Newton-Raphson algorithm.

Résumé

Le travail de ce mémoire porte sur l'analyse de comportement thermique de capteur solaire plan à air couplé avec concentrateur parabolique composé (CPC), en régime stationnaire et instationnaire en considérant le gisement solaire de Tlemcen. Le capteur avec CPC a été simulé et comparé avec deux configurations à un seul passage (02) (capteur simple et capteur avec cavité fermée). La méthode des différences finies a été utilisée pour discrétiser les termes temporels et les termes convectifs. La méthode de Newton-Raphson a été utilisée pour linéariser les systèmes d'équations des bilans des conservations.

Un programme en MATLAB a été élaboré et validé en régime stationnaire avec des résultats issus de la littérature. L'effet de CPC a été analysé et montré dans le cas de régime instationnaire.

Mots clés : capteurs solaires plans, stationnaire, instationnaire, CPC, différence finies, algorithme de Newton-Raphson.

Nomenclature

A	Surface	[m ²]
Ac	Surface du capteur	[m ²]
Ca	Facteur de concentration	
Cp	Chaleur spécifique	[J/kg K]
Dc	Rayonnement solaire diffus	[W/m ²]
Ds	rayonnement diffus par le sol	[W/m ²]
e	Epaisseur	[m]
F	Ligne focale	[m]
g	Epaisseur de l'écart	[m]
H	Rayonnement solaire globale	[W/m ²]
H_c	Hauteur du CPC	[m]
h	Coefficient de convection	[W/m ² k]
h_{nc}	Coefficient de convection naturelle	[W/m ² k]
hr	Coefficient de rayonnement	[W/m ² k]
k	Conductivité thermique	[W/m k]
L	Longueur de capteur	[m]
lp	Largeur de l'absorbeur	[m]
P	Coefficients de perte de l'écart	
Pr	Prandtl	
Rb	Facteur d'inclinaison	
Rd	Rayonnement solaire direct	[W/m ²]
Re	Reynolds	
S	Rayonnement solaire incident	[W/m ²]
Se	Section mouillée	[m ²]
T	Température	[°C]
t	Temps	[s]
t1	Distance entre vitrage et absorbeur	[m]
Ub	Coefficients de pertes vers l'arrière	
Ut	Coefficients de pertes vers l'avant	
Vw	Vitesse du vent	[m/s]
W	Largeur de capteur	[m]
Wc	Ouverture de CPC	[m]
Xb	Epaisseur d'isolation	[m]
<n>	Nombre moyen de réflexion	
{Tⁱ}	Vecteur des températures à l'itération i	
{T_{n+1}ⁱ}	Vecteur des températures à l'itération i à l'instant n+1	

$\{ \mathbf{F}(\mathbf{T}^i) \}$	Vecteur résiduel dans le cas stationnaire
$\{ \mathbf{F}(\mathbf{T}_{n+1}^i) \}$	Vecteur résiduel dans le cas instationnaire
$[\mathbf{J}_k(\mathbf{T}^i)]$	Matrice Jacobéenne dans le cas stationnaire
$[\mathbf{J}_k(\mathbf{T}_{n+1}^i)]$	Matrice Jacobéenne dans le cas instationnaire

Indice :

a	Ambiant
ab	Absorbeur
c	Cover pour CPC
e	Entrée
f	Fluide
p	Plaque
v	Vitre

Lettres Grecques :

η	Rendement thermique	
ρ	Masse volumique	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ε	Emissivité	
τ	Transmissivité	
α	Absorptivité	$[^\circ]$
Θ_c	Angle d'acceptance	
σ	Constante de Stephan Boltzmann	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$
ρ_m	Réfectivité de miroir	
$\bar{\rho}$	Réfectivité	
μ	Viscosité dynamique	$[\text{Kg}/\text{m s}]$

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Gisement solaire et phénomènes de conversion thermo-solaire

Table 1.1 Situation géographique de la ville de Tlemcen	19
Table 1.2 Données climatiques à Tlemcen	19

Chapitre 3 : Formulation mathématique de capteur solaire plan à air couplé avec CPC

Table 3.1 Expressions empiriques des éclairagements solaires	36
--------------------------------------------------------------	----

Chapitre 4 : Résultats, interprétions et discussions

Table 4.1 Propriétés optiques des composantes des capteurs [14]	49
Table 4.2 Données géométriques des capteurs [14]	49
Table 4.3 Comparaison des résultats pour $Re=4000$ (capteur 1).	51
Table 4.4: Comparaison de résultats pour $Re=40000$ (capteur 1).	51
Table 4.5 Comparaison de résultats pour $Re=4000$ (capteur 2).	53
Table 4.6 Comparaison de résultats pour $Re=40000$ (capteur 2).	53
Table 4.7 Comparaison entre des temperatures de fluide pour le capteur 2.	54
Table 4.8 Propriétés Thermo-physiques et radiatives des capteurs [14].	54
Table 4.9 Paramètres géométriques et optiques du CPC	55

Liste des figures

Chapitre 1 : Gisement solaire et phénomènes de conversion thermo-solaire

Figure 1.1 Structure du soleil	4
Figure 1.2 Relation terre-soleil	5
Figure 1.3 Composantes de rayonnement solaire	6
Figure 1.4(a) Angle Zénith, inclinaison, angle de l'azimut de la surface et angle de l'azimut solaire pour une surface inclinée [5]. (b) Vue en plan montrant l'angle de l'azimut solaire.	6
Figure 1.5 Plan incliné	8
Figure 1.6 Description de capteur solaire plan	9
Figure 1.7 Chauffe-eau solaire individuel avec chauffage d'appoint.	11
Figure 1.8 Schéma du chauffage par radiateurs conventionnels	12
Figure 1.9 Schéma du chauffage par ventilation à air	12
Figure 1.10 Schéma du chauffage par plancher chauffant	13
Figure 1.11 Schéma d'un double système de stockage	13
Figure 1.12 Caractéristiques géométriques de CPC	15
Figure 1.13 Capteur solaire à tube sous vide	17
Figure 14 Tube sous vide associé à un CPC	17
Figure 15 (a) Panneau solaire photovoltaïque avec miroir plan. (b) Cellules solaires avec miroirs paraboliques	18

Chapitre 2 : Recherche bibliographique

Figure 2.1 Capteur solaire plan à air avec vitrage	21
Figure 2.2 Capteur solaire plan sans vitrage	22
Figure 2.3. Capteur solaire plan à air d'un seul passe avec cavité	23
Figure 2.4 Capteur solaire plan à air de double passe avec un seul vitrage	23
Figure 5 Concentrateur parabolique composé (a) de type symétrique avec récepteur tubulaire. (b) de type asymétrique	24

Chapitre 3 : Formulation mathématique de capteur solaire plan à air couplé avec CPC

Figure 3.1 Types de capteurs solaires plans à air : (a) capteur solaire plan non vitré. (b) Capteur solaire plan a air avec cavité	27
Figure 3.2. Schema des échanges thermique des capteurs solaires plan. (a) capteur non vitre. (b) capteur avec cavité	28
Figure 3.3 circuits équivalents des capteurs (a) capteur non vitré (b) capteur vitré avec cavité	29
Figure 3.4 Capteur non vitré couplé avec CPC (a)CPC vitré. (b) CPC non vitré	29
Figure 3.5 Capteur vitré avec cavité couplé avec CPC (a) CPC vitré. (b) CPC non vitré	30
Figure 3.6 Circuit équivalents des capteurs couplés avec CPC	31
Figure 3.7 Organigramme pour le régime stationnaire	45
Figure 3.8 Organigramme pour le régime instationnaire	46
Figure 3.9 Organigramme de calcul de rayonnement solaire	47

Chapitre 4 : Résultats, discussions et interprétations

Figure 4.1 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=4000$ pour le capteur 1.	50
Figure 4.2 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=40000$ pour le capteur 1.	50
Figure 4.3 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=4000$ pour le capteur 2.	52
Figure 4.4 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=40000$ pour le capteur 2.	52
Figure 4.5 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (1) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (17 janvier).	55
Figure 4.6 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (1) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (21 juin).	56
Figure 4.7 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (2) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (17 Janvier).	56
Figure 4.8 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (2) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (21 juin).	57
Figure 4.9 Comportement journalier de la température de sortie durant la journée de 21 Juin pour $Ca=3$ (capteur 1)	58
Figure 4.10 Comportement journalier de la température de sortie durant la journée de 21 Juin pour $Ca=3$ (capteur 2)	58

Figure 4.11 Influence de coefficient de concentration sur la température de sortie du fluide pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	60
Figure 4.12 Influence de coefficient de concentration sur la température de sortie du fluide pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	60
Figure 4.13 Influence de coefficient de concentration sur les pertes thermiques globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00.	61
Figure 14 Influence de coefficient de concentration sur les pertes thermiques globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00.	61
Figure 15 Influence de coefficient de concentration sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	62
Figure 4.16 Influence de coefficient de concentration sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	62
Figure 4.17 Influence de coefficient de concentration sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	63
Figure 4.18 Influence de coefficient de concentration sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	63
Figure 4.19 Influence du débit sur la température de sortie du fluide pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	66
Figure 4.20 Influence du débit sur la température de sortie du fluide pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	66
Figure 4.21 Influence du débit sur les pertes globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	67
Figure 4.22 Influence du débit sur les pertes globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	67
Figure 4.23 Influence du débit sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	68
Figure 4.24 Influence du débit sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00	68
Figure 4.25 Influence du débit sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00	69
Figure 4.26 Influence du débit sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.	69
Figure 4.27 Influence de la profondeur sur le Nusselt moyen pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.	71
Figure 4.28 Influence de la profondeur sur le Nusselt moyen pour le capteur 2 le le 21 Juin à 12h:00.	72
Figure 4.29 Influence de la profondeur sur la température de sortie pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.	72

Figure 4.30 Influence de la profondeur sur la température de sortie pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.	73
Figure 4.31 Influence de la profondeur sur les pertes thermiques globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.	73
Figure 4.32 Influence de la profondeur sur les pertes thermiques globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.	74
Figure 4.33 Influence de la profondeur sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.	74
Figure 4.34 Influence de la profondeur sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.	75
Figure 4.35 Influence de la profondeur sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.	75
Figure 4.36 Influence de la profondeur sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.	76

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : Gisement solaire et phénomènes de conversion thermo-solaire

Introduction

1. <i>Le soleil</i>	3
1.1. <i>La constante solaire</i>	4
2. <i>Définition</i>	5
3. <i>Direction de rayonnement</i>	6
4. <i>Rayonnement solaire sur un plan incliné</i>	8
4.1. <i>L'angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné</i>	8
5. <i>Capteur solaire plan</i>	9
5.1. <i>Description du capteur solaire plan</i>	10
5.2. <i>Applications des capteurs solaires plans à air</i>	10
6. <i>Amélioration des performances des capteurs solaires plans</i>	14
6.1. <i>Capteur solaire à concentration</i>	14
6.2. <i>Coefficient de concentration géométrique</i>	15
6.3. <i>Géométrie de base</i>	16
7. <i>Application des CPC à des dispositifs solaires</i>	16
7.1. <i>Tube sous vide</i>	16
7.2. <i>Capteur Photovoltaïque</i>	18
8. <i>Potentiel solaire en Algérie</i>	19
<i>Conclusion</i>	20

Chapitre 2 : Recherche bibliographique

Introduction

1. <i>Capteur solaire plan à air avec vitrage</i>	22
2. <i>Capteur solaire plan à air sans vitrage</i>	23
3. <i>Capteur solaire plan à air d'un seul passe avec cavité</i>	24
4. <i>Capteur solaire plan à air de double passe avec un seul vitrage</i>	24
5. <i>Concentrateur parabolique composé</i>	25
<i>Conclusion</i>	27

Chapitre 3 : Formulation mathématique de capteur solaire plan à air couplé avec CPC

1. Modèles géométriques	28
2. Hypothèses simplificatrices	29
2.1. Schémas des échanges thermiques	29
2.1.1. Capteurs solaire plan sans CPC	29
2.1.2. Capteur solaire plan avec CPC	31
3. Bilan énergétique	33
3.1. Capteurs plans sans CPC	33
3.2. Capteurs plans avec CPC	33
4. Calcul des Coefficients de transfert de chaleur	34
5. Rendement thermique et Optique	38
6. Discrétisation	39
7. Méthode de résolution et linéarisation	43
8. Algorithme de calcul et organigrammes	45

Chapitre 4 : Résultats, discussions et interprétations

1. Validation de programmation	48
2. L'effet du CPC	53
3. Etude paramétrique	58
3.1. Influence de coefficient de concentration (C_a)	59
3.2. Influence du débit massique	64
3.3. Influence de profondeur de canal	70

Introduction générale

L'énergie solaire est l'énergie du Soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère.

Toutefois, sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants, pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires).

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. 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 et 35 TWh/an pour l'éolien. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec la hausse du prix du baril de pétrole, ce qui place les énergies renouvelables, au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable.

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le *solaire passif*, le *solaire photovoltaïque* et le *solaire thermique*.

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. Ce rayonnement se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.
- En usage indirect : la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, centrales thermo-solaires.

Les applications ayant trait à la conversion thermo-solaire peuvent être regroupées en deux catégories principales : les applications à hautes températures (les concentrateurs solaires et capteur solaire sous vide), et les applications à basses températures : (les capteurs plans comme destinés pour le chauffage, la réfrigération et le séchage ...etc.). [1]

Notre étude est concernée aux applications à basses températures, où les capteurs plans sont les plus utilisables.

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires.

Plusieurs travaux ont été menés pour améliorer les performances thermiques, principalement le rendement, la quantité de chaleur extraite par l'air depuis l'entrée du capteur jusqu'à la sortie, l'écart de température rapporté au rayonnement globale reçu...etc.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser le comportement thermique des capteurs solaires plans couplés avec un concentrateur parabolique composé (CPC), à base des bilans énergétiques en régime instationnaire, pour deux types des capteurs solaires plans à air : le capteur solaire plan sans vitrage, le capteur solaire plan à air d'un seul passage avec cavité fermée.

Pour réaliser ce travail, on a élaboré un programme dans un environnement MATLAB, la simulation a été validée dans le cas stationnaire sur différents cas tests et on a traité cette problématique en quatre chapitres essentiels.

Le premier chapitre présente des généralités sur les capteurs solaires plans, des notions fondamentales de rayonnement solaire, avec une présentation des équations pour le calcul des composantes des radiations solaires, avec des techniques d'amélioration de performance du capteur.

Le deuxième chapitre présente l'étude bibliographique qui nous a permis d'obtenir les modèles mathématiques des capteurs solaires plans.

Le troisième chapitre est réservé aux formulations mathématiques de comportement thermique stationnaire/instationnaire basées sur les bilans énergétiques pour les deux types de capteurs solaires plans à air soit en présence ou en absence d'un concentrateur parabolique composé (CPC). Une discrétisation des systèmes des équations non linéaire avec différence finie a été présentée ainsi que la solution par la méthode de Newton-Raphson, en expliquant le calcul par un algorithme général et des organigrammes pour distinguer le régime stationnaire et instationnaire.

Le quatrième chapitre est consacré pour les résultats du comportement thermique des deux capteurs : **capteur à un seul passage non vitré** et **capteur à un seul passage avec cavité fermée**, en présence d'un concentrateur parabolique composé (CPC), en régime instationnaire pour différents cas (CPC vitré, CPC non vitré). L'évolution journalière de la température de sortie de

chaque capteur pour différents cas, a été simulée et présentés pour montrer l'effet d'introduction de CPC, en régime instationnaire, pour deux journées types (21 juin et 17 janvier).

Une étude paramétrique a été effectuée, prenant en considération l'effet du : coefficient de concentration du CPC, débit massique et la profondeur du passage d'air sur les performances des deux capteurs 1 et 2 couplés avec un CPC soit vitré ou non vitré.

Chapitre 1 :

Gisement solaire et phénomènes de conversion

thermo-solaire

La structure et les caractéristiques du soleil déterminent la nature de l'énergie qu'elle rayonne dans l'espace. Le premier sujet majeur de ce chapitre concerne les caractéristiques de cette énergie et son intensité. Nous nous intéresserons principalement aux radiations dans une plage de longueur d'onde de 0,25 à 3,0 μm , la partie du rayonnement électromagnétique qui comprend la majeure partie de l'énergie rayonnée par le soleil. Le deuxième sujet majeur de ce chapitre est la géométrie solaire, c'est-à-dire la position du soleil dans le ciel, la direction dans laquelle le rayonnement direct est incident sur des surfaces d'orientations variées. La compréhension de la nature du rayonnement extraterrestre, les effets de l'orientation d'une surface de réception et le rayonnement théoriquement possible à la surface de la Terre est important pour comprendre et utiliser les données sur le rayonnement solaire.

1. Le soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse intensément chaude avec un diamètre de $1,39 \times 10^9$ m et est, en moyenne, à $1,5 \times 10^{11}$ m de la terre. Comme on le voit de la terre, le soleil tourne sur son axe environ une fois toutes les 4 semaines. Cependant, il ne tourne pas comme un corps solide ; L'équateur prend environ 27 jours et les régions polaires prennent environ 30 jours pour chaque rotation.

Le soleil a une température efficace de corps noir de 5777 K. La température dans les régions intérieures centrales est estimée de manière variée à 8×10^6 à 40×10^6 K et la densité est estimée à environ 100 fois celle de l'eau. Le soleil est, en effet, un réacteur de fusion continu avec ses gaz constitutifs comme «réceptif» retenu par les forces gravitationnelles. Plusieurs réactions de fusion ont été suggérées pour alimenter l'énergie rayonnée par le soleil. Celui considéré comme le plus important est un procédé dans lequel l'hydrogène (c'est-à-dire quatre protons) se combine pour former de l'hélium (c'est-à-dire un noyau d'hélium) ; La masse du noyau d'hélium est inférieure à celle des quatre protons, la masse ayant été perdue dans la réaction et convertie en énergie.

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à des températures de plusieurs millions de degrés doit être transférée vers la surface et être rayonnée dans l'espace. Une succession de processus radiatifs et convectifs se produisent avec l'émission, l'absorption et l'irradiation successives ; Le rayonnement dans le noyau du soleil se trouve dans les rayons X et les rayons gamma du spectre, les longueurs d'ondes du rayonnement augmentant à mesure que la température baisse à des distances radiales plus importantes.

Une structure schématique du soleil est illustrée à la figure 2.1 On estime que 90% de l'énergie est générée dans la région de 0 à 0,23R (où R est le rayon du soleil), qui contient 40% de la masse du soleil. À une distance de 0,7 R du centre, la température a chuté à environ 130 000 K et la densité est tombée à 70 kg / m^3 ; Ici, les processus de convection commencent à devenir importants et la zone de 0,7 à 1,0 R est connue sous le nom de zone convective. Dans cette zone, la température chute à environ 5000 K et la densité à environ 10^{-5} kg / m^3 . [3]

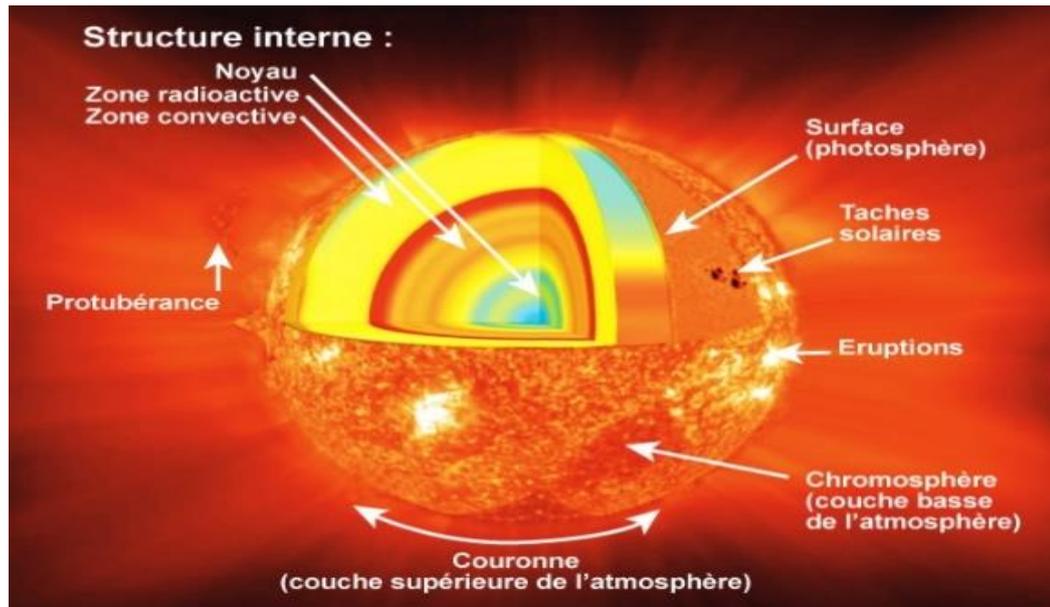


Figure 1.1 Structure du soleil [4]

1.1. La constante solaire

La constante solaire G_{sc} est l'énergie du soleil par unité de temps reçue sur une surface unitaire de surface perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement à la distance moyenne terre-soleil en dehors de l'atmosphère. [3]

Les études et les mesures ultérieures des fusées ont été résumées par **Johnson** [3] ; La valeur de **Abbot** [3] de la constante solaire de 1322 W / m^2 a été révisé par **Johnson** à 1395 W / m^2 .

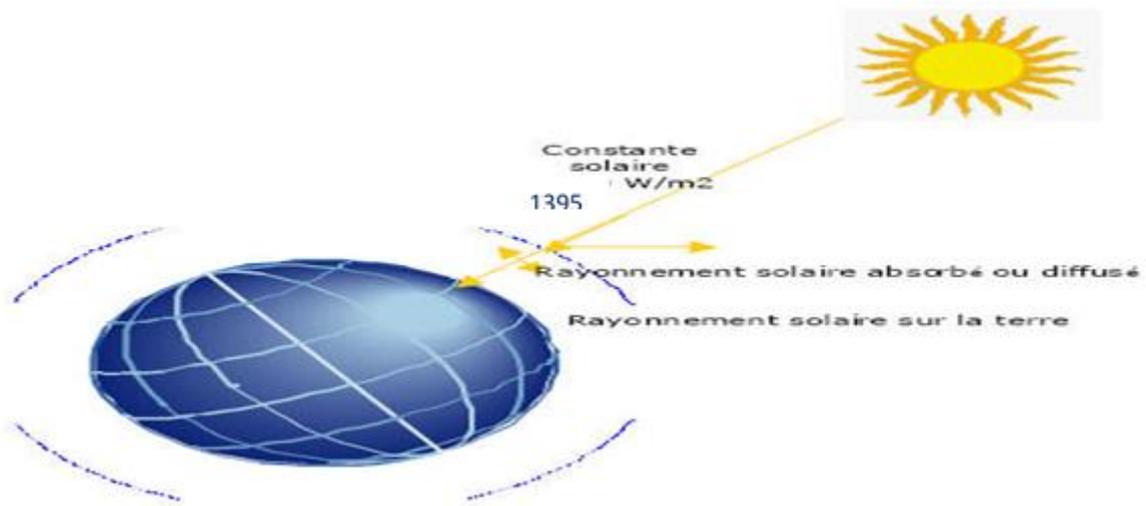


Figure 2 Relation terre-soleil [1]

2. Définition

Masse d'air m : le rapport de la masse d'atmosphère à travers laquelle le rayonnement direct passe à la masse qu'il traverserait si le soleil était au zénith (c'est-à-dire directement au-dessus). Ainsi, au niveau de la mer $m = 1$ lorsque le soleil est au zénith et $m = 2$ pour un angle zénith θ_z de 60° . Pour les angles zénithaux de 0° à 70° au niveau de la mer, à une approximation proche.

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

Pour des angles zénithaux plus élevés, l'effet de la courbure de la Terre devient significatif et doit être pris en compte.

Rayonnement direct : le rayonnement solaire reçu du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

Rayonnement diffus : le rayonnement solaire reçu du soleil après sa direction a été changé en se dispersant par l'atmosphère.

Rayonnement solaire total : la somme du faisceau et le rayonnement solaire diffus sur une surface. (Les mesures les plus courantes du rayonnement solaire sont des radiations totales sur une surface horizontale, souvent appelées rayonnements globaux sur la surface). Irradiation, W / m^2
La vitesse à laquelle l'énergie rayonnante est incidente sur une surface par unité de surface.

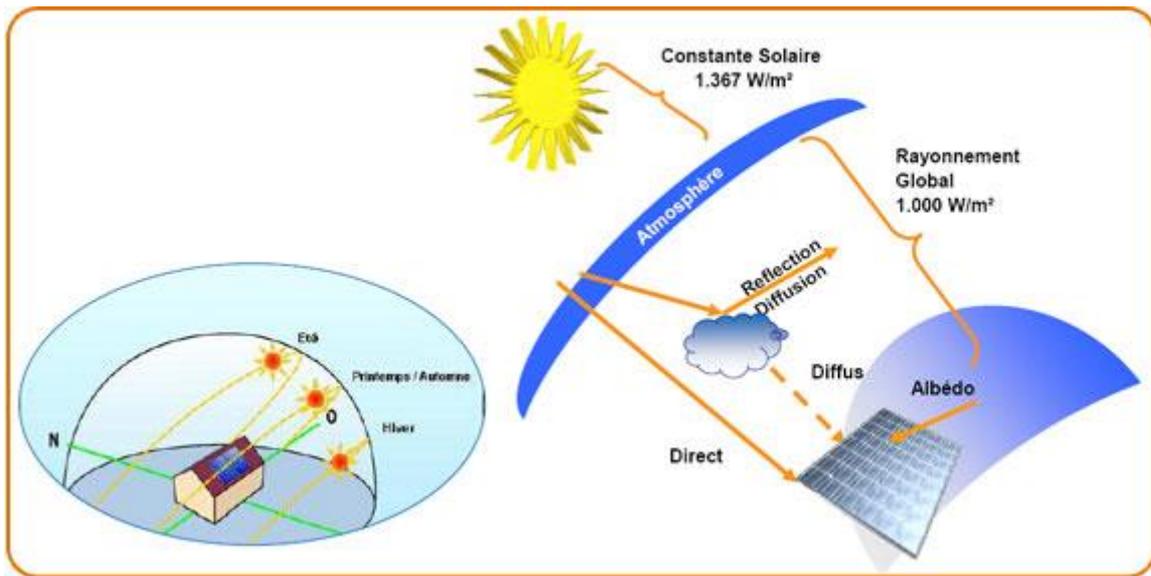


Figure 1.3 Composantes de rayonnement solaire [1]

Temps solaire : Temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel avec le midi solaire, le moment où le soleil croise le méridien de l'observateur. [3]

3. Direction de rayonnement

Les relations géométriques entre un plan d'une orientation particulière par rapport à la terre à tout moment (si ce plan est fixé ou en mouvement par rapport à la Terre) et le rayonnement solaire direct entrant, c'est-à-dire la position du soleil par rapport à ce plan, Peut être décrit en plusieurs angles (**Benford et Bock**) [3]. Certains des angles sont indiqués à la figure 1.3. Les angles et un ensemble de conventions de signes cohérentes sont les suivants : [3]

ϕ **Latitude :** l'emplacement angulaire au nord ou au sud de l'équateur, au nord positif $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

La déclinaison : la position angulaire du soleil au midi solaire (c'est-à-dire lorsque le soleil se trouve sur le méridien local) par rapport au plan de l'équateur, positif au nord $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

γ **L'Azimut :** l'écart de la projection sur un plan horizontal de la normale à la surface à partir du méridien local, avec zéro pour le sud, l'Est négatif et l'Ouest positif, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

β **Angle d'inclinaison :** L'angle entre le plan de la surface en question et l'horizontale ; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

ω **Angle Horaire** : Le déplacement angulaire du soleil à l'est ou à l'ouest du méridien local en raison de la rotation de la terre sur son axe à 15° par heure ; Matin négatif, après-midi positif.

θ **Angle d'incidence** : l'angle entre le rayonnement direct sur une surface et la normale à cette surface.

Des angles supplémentaires sont définis qui décrivent la position du soleil dans le ciel :

θ_z **Angle Zénith** : l'angle entre la verticale et la ligne au soleil, c'est-à-dire l'angle d'incidence du rayonnement direct sur une surface horizontale.

α_s **La hauteur du soleil** : l'angle entre l'horizontale et la ligne au soleil, c'est-à-dire le complément de l'angle zénith.

γ_s **Angle d'azimut solaire** : déplacement angulaire du sud de la projection du rayonnement du faisceau sur le plan horizontal, illustré à la figure 3. Les déplacements à l'Est du sud sont négatifs et l'Ouest du sud est positif.

δ **La déclinaison** δ peut être trouvée à partir de l'équation approximative de Cooper (1969)

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

Avec n est le numéro du jour de l'année (1^{er} janvier=1).

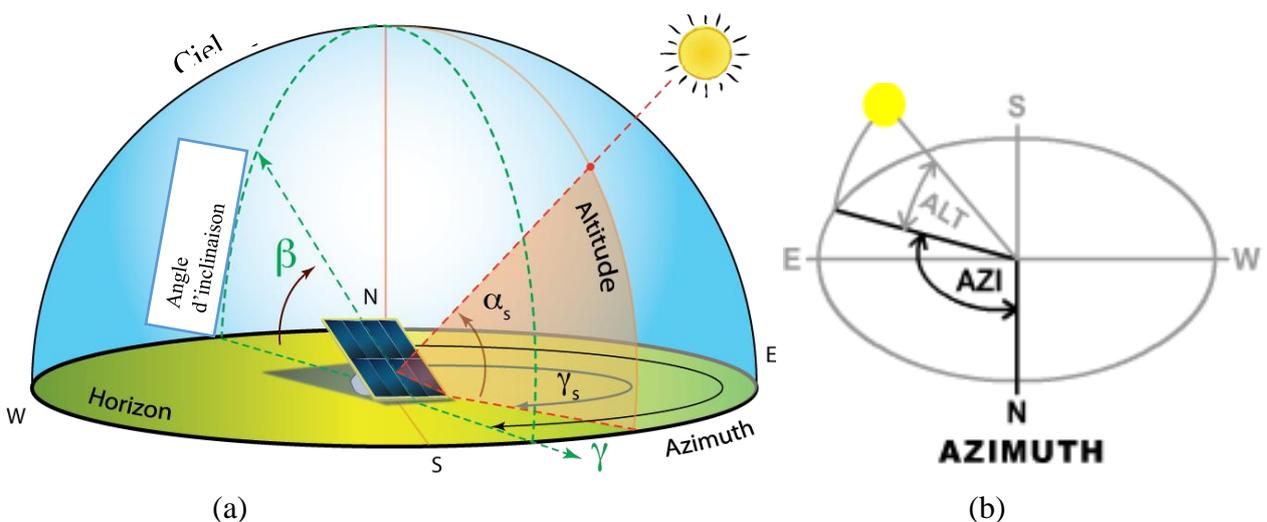


Figure 1.4(a) Angle Zénith, inclinaison, angle de l'azimut de la surface et angle de l'azimut solaire pour une surface inclinée [5]. (b) Vue en plan montrant l'angle de l'azimut solaire. [1]

4. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Généralement, sous diverses conditions les capteurs solaires sont installés suivant une inclinaison et une orientation fixes. Cette dernière est choisie vers le sud ou le nord, suivant la situation géographique du site considéré par rapport à l'équateur. Ceci étant, pour que les capteurs puissent absorber le maximum d'énergie au voisinage de midi, temps solaire vrai (TSV), là où la hauteur du soleil est au zénith et les valeurs de l'éclairement solaire sont maximales. Par ailleurs, pour pouvoir répondre aux besoins énergétiques et optimiser le rendement global du système, le champ de capteurs doit d'une part avoir une surface suffisante et d'autre part des caractéristiques thermomécaniques devant être les meilleurs possibles ainsi de capter le maximum d'énergie solaire durant la journée. Les paramètres permettant de satisfaire cette dernière condition sont l'inclinaison et l'orientation du champ de capteurs. Une des meilleures solutions proposées, c'est d'orienter le champ de capteurs vers le sud (hémisphère nord) et d'incliner sa structure suivant un angle optimale pré calculé pour le site considéré. Par conséquent, les concepteurs de système ont besoin des données de l'ensoleillement solaire sur les surfaces inclinées ; mesurées ou estimées les données de l'éclairement solaire, cependant, sont la plupart du temps disponibles sur les surfaces normales ou sur les surfaces horizontales. Par conséquent, on a un besoin de convertir ces données sur les surfaces inclinées. [6]

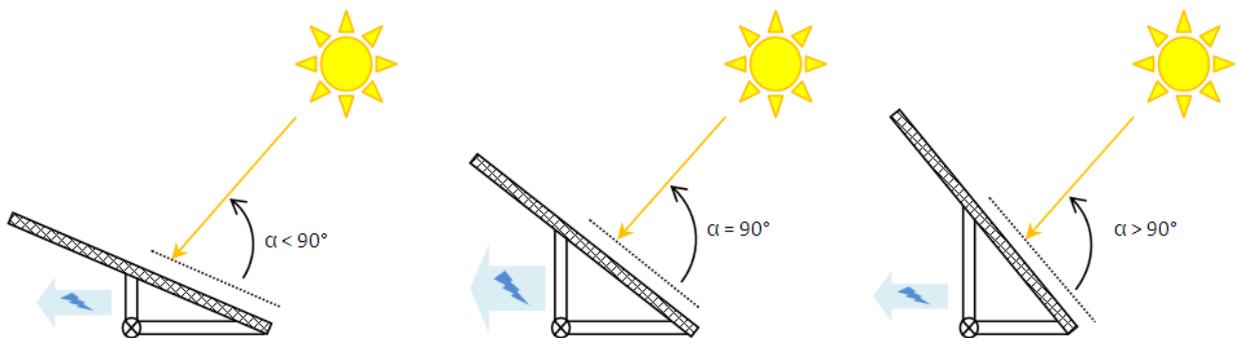


Figure 1.5 Plan incliné [1]

4.1. L'angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné

L'angle d'incidence θ est l'angle formé entre la direction du soleil et la normale à la surface inclinée du capteur. L'angle d'incidence θ a un effet primordial et une incidence directe sur la quantité d'ensoleillement reçue sur la surface collectrice. Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayonnement incident et la normale du plan incliné en coordonnées

horizontale du lieu, cet angle dépend des paramètres de la position du soleil et de l'angle d'inclinaison du capteur. Il est défini par [6] :

$$\cos \theta = \cos \beta \sin \alpha_s - \sin \beta \cos \alpha_s \cos(\alpha - \gamma_s)$$

Les angles α , β , α_s et γ_s sont respectivement l'azimut du capteur, l'angle d'inclinaison, l'azimut du soleil et sa hauteur dans le ciel par rapport au plan horizontal du lieu.

5. Capteur solaire plan

Un collecteur solaire est un échangeur de chaleur spécial qui transforme l'énergie radiante solaire en chaleur. Un collecteur solaire diffère à plusieurs égards des échangeurs de chaleur plus conventionnels. Ces derniers effectuent habituellement un échange fluide-fluide avec des taux de transfert de chaleur élevés et avec un rayonnement comme facteur sans importance. Dans le collecteur solaire, le transfert d'énergie provient d'une source éloignée d'énergie rayonnante vers un fluide. Le flux de rayonnement incident est, au mieux, d'environ $1100 \text{ W} / \text{m}^2$ (sans concentration optique), et il est variable. La plage de longueur d'onde est de $0,3$ à $3 \mu\text{m}$, ce qui est considérablement plus court que celui du rayonnement émis par la plupart des surfaces absorbantes. Ainsi, l'analyse des collecteurs solaires présente des problèmes uniques de flux d'énergie faible et variable et l'importance relativement importante du rayonnement.

Les capteurs solaire plan peuvent être conçus pour des applications nécessitant une livraison d'énergie à des températures modérées, jusqu'à peut-être 100°C au-dessus de la température ambiante. Ils utilisent le rayonnement solaire et le rayonnement solaire diffus, ne nécessitent pas de suivi du soleil et nécessitent peu de maintenance.

L'importance des capteurs solaires plans dans les procédés thermiques est telle que leur performance thermique est traitée avec beaucoup de détails. Ceci est fait pour développer une compréhension de la façon dont le composant fonctionne. Dans de nombreux cas pratiques de calculs de conception, les équations pour la performance des collecteurs sont réduites à des formes relativement simples [3].

5.1. Description du capteur solaire plan

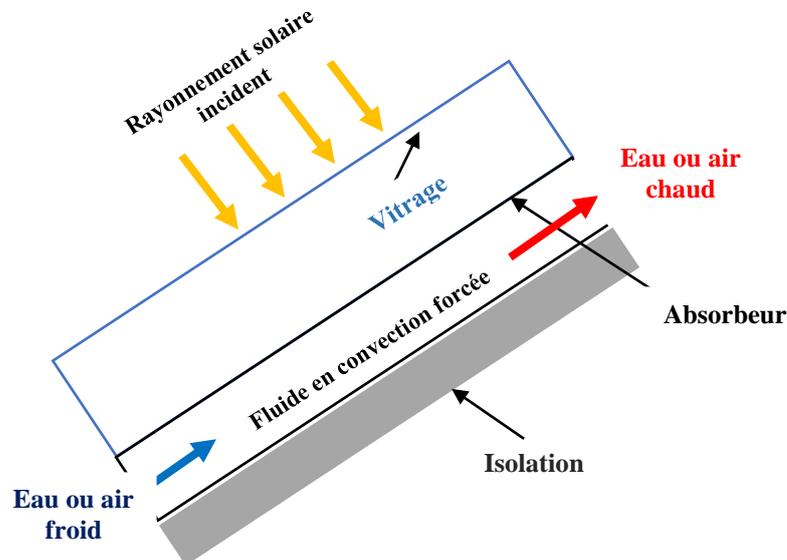


Figure 1.6 Description de capteur solaire plan

Les parties importantes d'un collecteur solaire plan typique, comme le montre la figure [1.6] sont **la surface absorbante** d'énergie solaire «noire» avec des moyens pour transférer l'énergie absorbée vers un fluide, **enveloppes transparentes** au rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur solaire qui réduisent les pertes de convection et de rayonnement dans l'atmosphère et l'isolation arrière pour réduire les pertes de conduction.

Les collecteurs plans sont presque toujours montés dans une position stationnaire (p. Ex., En tant que partie intégrante d'une paroi ou structure de toit) avec une orientation optimisée pour l'emplacement particulier en question pour l'année de fonctionnement du dispositif solaire. [3]

5.2. Applications des capteurs solaires plans à air

- **Chauffages de l'eau sanitaire**

Le chauffage de l'eau sanitaire est l'une des technologies solaires les plus accessibles aux particuliers. Le principe est simple : des capteurs thermiques transforment le rayonnement lumineux en chaleur. Le fluide caloporteur circule dans les capteurs thermiques et transporte la chaleur jusqu'à l'eau sanitaire stockée dans un ballon. [7]

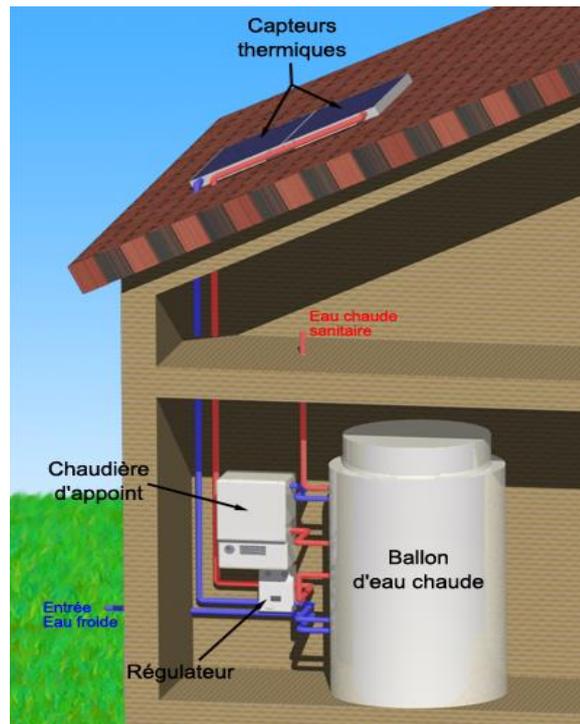


Figure 1.7 Chauffe-eau solaire individuel avec chauffage d'appoint. [7]

- **Chauffage des locaux**

Le chauffage de locaux à partir de capteurs solaires n'est pas encore très développé même si l'évolution des normes d'isolation des bâtiments peut rendre cette technologie plus attractive. Le principal frein est que l'on a principalement besoin de chauffage en hiver, période durant laquelle l'ensoleillement est réduit. Il existe trois manières de chauffer un local par l'énergie solaire thermique : par des radiateurs conventionnels, par une ventilation à air chaud ou par un plancher chauffant. [7]

Le chauffage par radiateurs conventionnels fonctionne très similairement à un chauffage d'eau sanitaire.

Des capteurs thermiques transforment le rayonnement lumineux en chaleur, le fluide caloporteur circule dans les capteurs thermiques et transporte la chaleur jusqu'à l'eau de chauffage stockée dans un ballon. Ensuite l'eau chaude circule à l'intérieur de radiateurs conventionnels. [7]

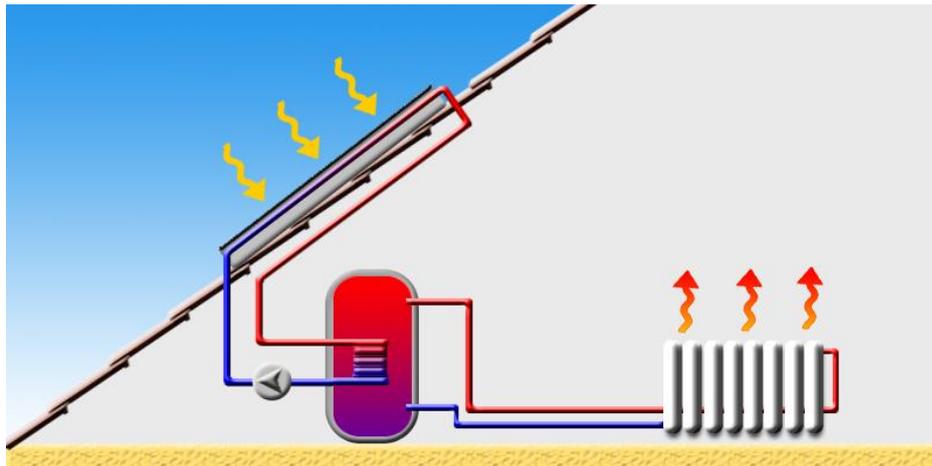


Figure 1.8 Schéma du chauffage par radiateurs conventionnels [7]

Le chauffage par ventilation à air utilise directement l'air au lieu de passer par un fluide caloporteur liquide.

Un système de ventilation aspire l'air extérieur à travers des capteurs thermiques perforés. L'air chaud est ensuite stocké à l'intérieur d'une masse importante de matériaux solides comme des galets, avant d'être restitué dans le local. [7]

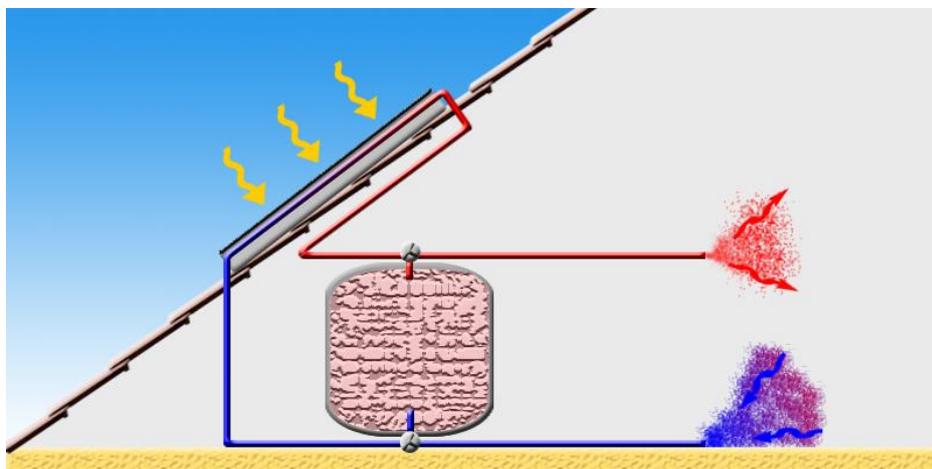


Figure 1.9 Schéma du chauffage par ventilation à air [7]

Le chauffage par plancher chauffant fonctionne de la même manière qu'un chauffage par radiateurs conventionnels à la différence qu'un circuit intégré dans le plancher remplace les radiateurs. Ce système a le principal avantage de fonctionner à une température plus faible. [7]

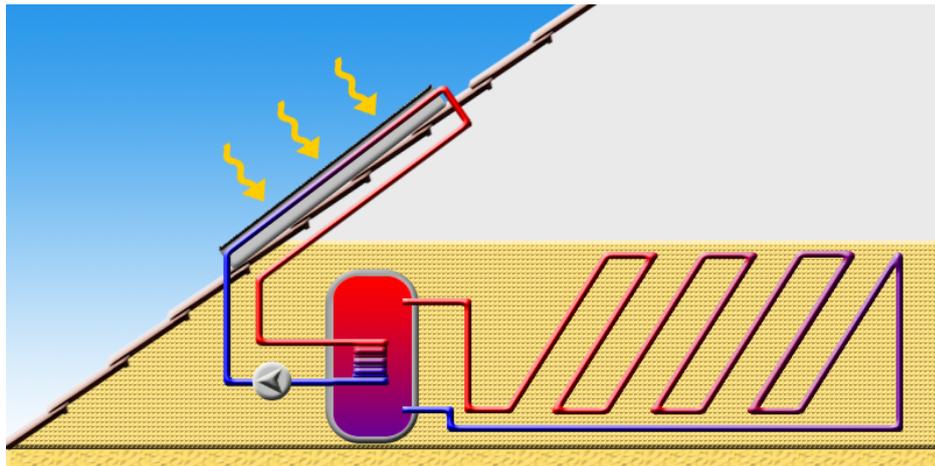


Figure 1.10 Schéma du chauffage par plancher chauffant [7]

- **Systèmes combinés eau chaude + chauffage**

Les systèmes combinés eau chaude + chauffage ont l'avantage d'utiliser les mêmes types de capteurs thermiques. Un fluide caloporteur est chauffé dans ces capteurs puis transmet la chaleur jusqu'au système de stockage. La grande différence entre l'eau utilisée pour l'eau chaude et celle pour le chauffage est qu'elles n'ont pas la même température. Il existe deux grandes solutions à ce problème : le double système de stockage et le système de stockage combiné. [7]

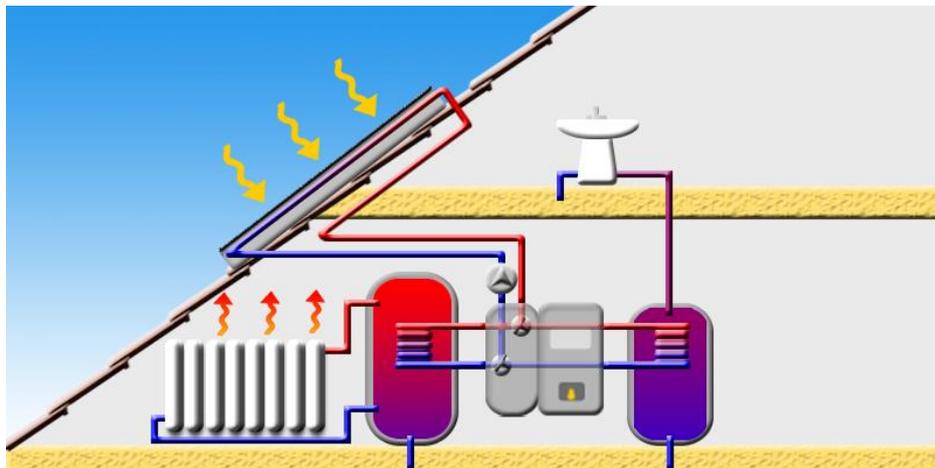


Figure 1.11 Schéma d'un double système de stockage [7]

- **Le séchage**

Utiliser le chauffage solaire pour le séchage des présente plusieurs avantages, En réduisant la vitesse à laquelle l'air passe à travers un capteur solaire à l'intérieur d'un bâtiment, l'air absorbe plus de chaleur, ce qui entraîne une plus grande température intérieure. Il est possible d'augmenter la température intérieure à un point tel que le capteur solaire peut être utilisé pour le séchage. La chaleur solaire est souvent préférée pour le séchage des récoltes parce que ce type de chauffage ne brûle, ni n'endommage les récoltes sensibles, ce qui est souvent le cas lorsqu'on utilise de la vapeur ou lorsque l'on brûle un combustible.

Utiliser l'énergie solaire pour le séchage des récoltes est idéal dans le cas du thé, du café, des fruits, des fèves, du riz, des épices, du caoutchouc, du cacao et du bois. [8]

6. Amélioration des performances des capteurs solaires plans

L'amélioration des performances thermiques des capteurs solaires plans, repose sur plusieurs techniques, parmi elles on cite le choix judicieux c'est la concentration.

La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour les dispositifs à capteurs sans concentration. En réduisant la surface du capteur solaire, le prix du dispositif diminue.

6.1. Capteur solaire à concentration

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture.

Un capteur cylindro-parabolique est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Image

Un capteur paraboloïde est un capteur à concentration utilisant un réflecteur en forme de paraboloïde de révolution.

Un capteur CPC (Compound Parabolic Concentrator) est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques". Les réflecteurs CPC ont une géométrie qui permet au rayonnement solaire direct et diffus d'atteindre l'absorbeur.

Un **héliostat** est un instrument comportant un miroir plan ou légèrement concave qui permet de réfléchir les rayons du Soleil dans une direction fixe malgré le mouvement diurne.

Un **four solaire** est un dispositif dont l'élément essentiel est un miroir concave de grand diamètre qui concentre le rayonnement solaire et permet d'obtenir des températures très élevées au foyer.[9]

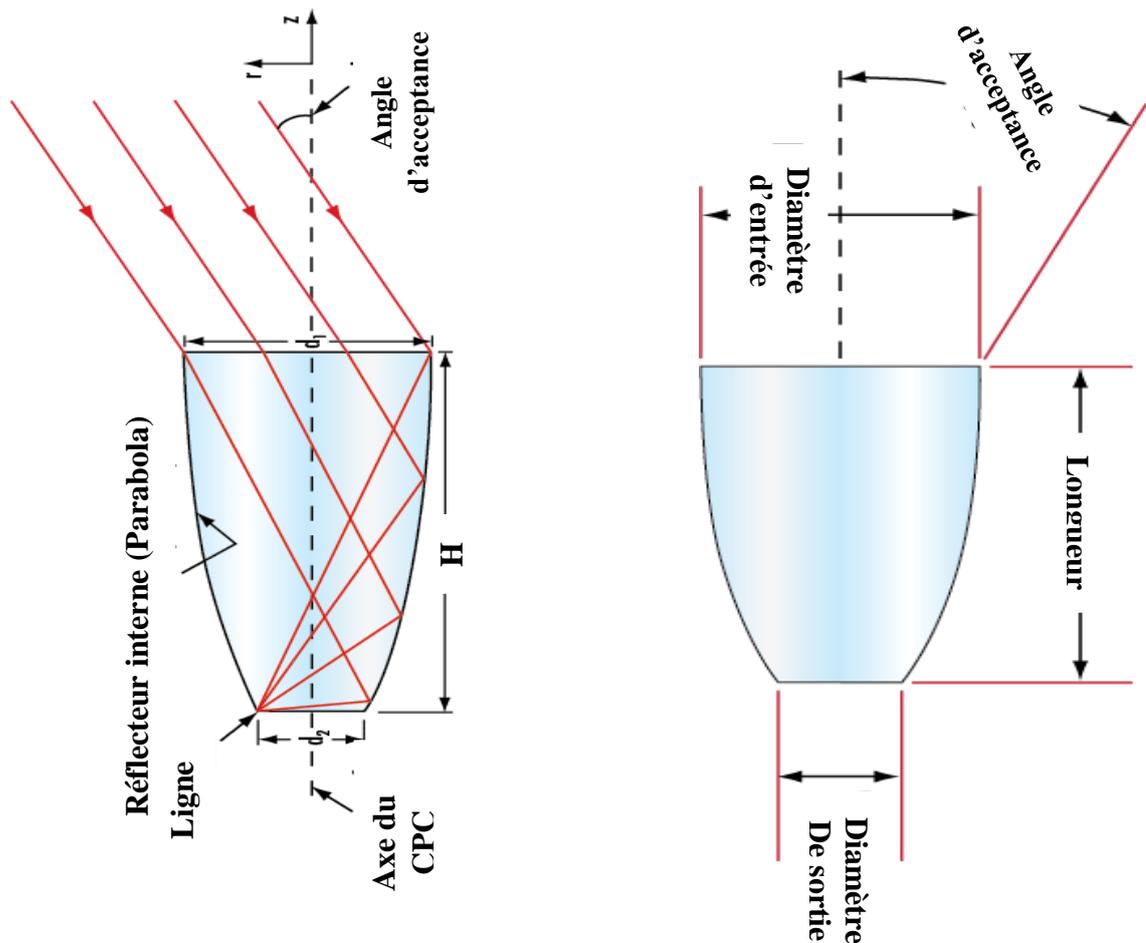


Figure 1.12 Caractéristiques géométriques de CPC

6.2. Coefficient de concentration géométrique

Le taux de concentration géométrique du CPC est défini comme le rapport des largeurs de l'ouverture sur l'absorbeur.

$$Ca = \frac{d1}{d2} = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (1.1)$$

6.3. Géométrie de base

Pour tracer la forme développée du CPC à absorbeur plan, on a besoin de deux paramètres, la largeur de l'absorbeur ($l = AB$) et l'angle θ_c . On peut alors déduire l'ouverture ($W_c = CD$)

$$W_c = \frac{l}{\sin \theta_c} \quad (1.2)$$

Ainsi que la hauteur H du CPC

$$H_c = A \frac{\left(1 + \frac{1}{\sin \theta_c}\right)}{2 \tan \theta_c} \quad (1.3)$$

La ligne focale de la parabole s'exprime par : $F = \frac{A}{2}(1 + \sin \theta_c)$ (1.4)

7. Application des CPC à des dispositifs solaires

7.1. Tube sous vide

Un tube sous vide est un type de tube utilisé dans les capteurs solaires thermiques. Cette technologie, développée initialement par l'université de Sydney en Australie à partir de 1975, fût industrialisée initialement au Japon puis son développement s'en trouva fortement amplifié par une externalisation de la production vers la Chine.

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube, il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour piéger le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.



Figure 1.13 Capteur solaire à tube sous vide [10]

Pour être efficace, le vide doit être poussé $< 10^{-3}$ Pa. Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique et il faut le changer pour préserver la performance de l'ensemble du capteur. Afin de visualiser cette éventualité, les tubes sont munis d'un témoin (getter) en baryum, qui dépose une couche métallisée sur l'intérieur du tube pendant la fabrication. Cette couche argentée de baryum devient blanche en contact avec l'air et ainsi sert de témoin à la perte de vide.

Ils sont complétés par des réflecteurs concentrateurs paraboliques composés (CPC) permettant de capter le rayonnement solaire diffus et optimiser ainsi l'absorption de l'énergie gratuite disponible.[10]

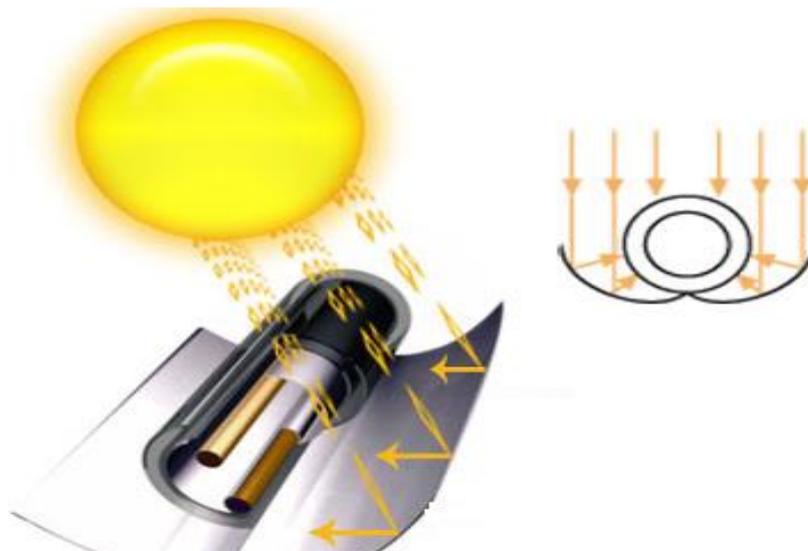


Figure 14 Tube sous vide associé à un CPC [10]

7.2. Capteur Photovoltaïque

Le solaire photovoltaïque à concentration (CPV) est une technologie qui concentre rayonnement solaire sur de petites cellules très efficaces afin de réduire la surface active de conversion photovoltaïque, ainsi les matériaux semi-conducteurs sont remplacés par des éléments optiques bien moins coûteux. [10]



(a)



(b)

Figure 1.15 (a) Panneau solaire photovoltaïque avec miroir plan. (b) Cellules solaires avec miroirs paraboliques [10]

Pour obtenir la concentration, on peut utiliser le CPC comme concentrateur solaire, sinon plusieurs types de concentration sont possibles, les lentilles de Fresnel, les miroirs paraboliques ou les miroirs plans. Mais le dispositif doit être muni d'un système de poursuite solaire. Cette technologie peut offrir une meilleure capacité de conversion. [8]

8. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique, le tableau suivant indique les données climatiques pour la région de Tlemcen et sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays.

Tlemcen est située au nord-ouest de l'Algérie, à 520 km au sud-ouest d'Alger, à 140 km au sud-ouest d'Oran et, frontalière du Maroc, à 76 km à l'est de la ville marocaine d'Oujda. Tlemcen, érigée dans l'arrière-pays, est distante de 40 km de la mer Méditerranée. [11]

Les coordonnées géographiques de la ville de Tlemcen sont :

Latitude	Longitude	Altitude
34.89°	-1.32°	800 m

Table 1.1 Situation géographique de la ville de Tlemcen [11]

mois	jan.	fév.	mar.	avr.	mai	juin	juil.	aout	sep.	oct.	nov.	déc.	année
Température minimale moyenne (°c)	5	7	8	10	12	16	19	20	18	13	10	7	12
Température moyenne (°c)	10	12	13	15	18	22	25	26	24	19	15	12	17
Température maximale moyenne (°c)	15	16	18	20	23	27	31	32	30	24	20	16	23

Table 1.2 Données climatiques à Tlemcen [11]

Chapitre 2 :

Recherche bibliographique

L'énergie solaire reçue sur la Terre en une année équivaut environ à 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité sur la même période ! Or, malgré ses faibles caractéristiques thermo physiques, l'air peut facilement être utilisé comme fluide caloporteur, dans un système insolateur, vitré ou non. Il est donc capable de contribuer directement au chauffage partiel des locaux, au préchauffage des systèmes de ventilation ou encore au séchage de nombreux produits agro-alimentaires. L'habitation bioclimatique exploite et favorise l'accumulation de la chaleur solaire dans des masses solides ou liquides et utilise la thermo circulation naturelle ou forcée de l'air. Des capteurs aérothermiques vitrés (disposés sur la façade sud de préférence) peuvent réchauffer l'air extérieur pour l'insuffler ou élever la température ambiante des pièces d'habitation. Le Canada, chef de file dans la technologie du chauffage à air chaud, a inventé un système de capteur perforé non vitré, qui couvre les façades de nombreux bâtiments, et ce avec une durée de vie très longue en raison du peu d'entretien que nécessite ce procédé (procédé Solarwall). [12]

L'investissement est conséquent, mais rentable sur le long terme et adapté à l'évolution des ressources énergétiques des années à venir. Souvent, L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique très important, notamment l'énergie solaire. Le gisement solaire en Algérie est le plus important au niveau mondial, surtout dans le grand sud.

Nous pensons qu'avec le chauffage solaire à air chaud, il y a matière à réduire considérablement la facture du chauffage des particuliers.

Plusieurs types de capteurs plans à air ont été construits et testés à travers le monde, l'objectif principal étant de capter le maximum d'énergie solaire à un minimum de cout. Pour cela, des grands travaux sont aujourd'hui explorées.

Dans ce chapitre, Une analyse bibliographique des travaux publiés sur les capteurs solaires plans à air et leurs différents modèles mathématiques a été effectuée, en analysant principalement les processus de transfert de chaleur des capteurs, les différentes configurations et ses conditions théoriques.

1. Capteur solaire plan à air avec vitrage

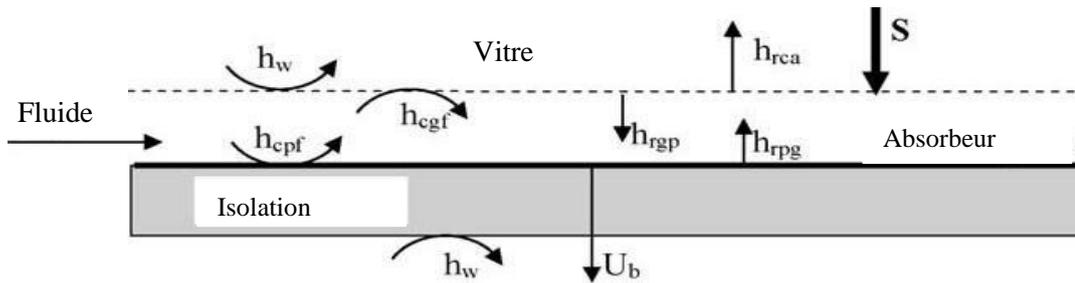


Figure 2.1 Capteur solaire plan à air avec vitrage [13]

Cette conception se compose d'un seul canal avec un seul écoulement d'air entre la vitre et la plaque d'absorbeur. De nombreux auteurs ont étudié la performance thermique de cette conception.

Garg et al [13] a développé le modèle transitoire de transfert de chaleur d'un capteur solaire à air vitré à un seul passage. Ce modèle transitoire a inclus les effets de capacitance thermique et les pertes par conduction.

Les données de rayonnement solaire et la température ambiante ont été représentées par une série de Fourier.

Cette conception de capteur solaire à air a été également étudiée par **ONG** [14] en utilisant des circuits électriques équivalents. Le modèle mathématique proposé par **Naphon et Kongtragool** [13] est semblable à celui d'**ONG** [14].

Mohamad [13] a également étudié cette conception de capteur où les équations proposées par cet auteur sont semblables à celles de **Naphon et Kongtragool** [13], où il a modélisé la vitre par une équation qui ne contenait pas le terme d'échange radiatif entre la vitre et l'ambiance. L'objectif principal de cet auteur était de minimiser les pertes de chaleur en avant de vitrage du collecteur et de maximiser l'extraction de chaleur de l'absorbeur.

Dans le but de déterminer la géométrie optimale du canal d'écoulement de ce collecteur solaire vitré (figure 2.1), **Hegazy** [13] a proposé un nouveau modèle mathématique. Ce modèle était basé sur les hypothèses suivantes :

- i. Le canal d'écoulement était hydrauliquement lisse.
- ii. Il n'y avait pas de fuite d'air vers ou depuis le capteur.
- iii. Les effets de la capacité thermique de la vitre en verre, de l'air fermé, de l'absorbeur et de la plaque inférieure étaient négligeables.

- iv. Les températures des plaques de verre, d'absorbeur et de fond ne variaient que le long de la direction x du flux d'air.
- v. Le capteur solaire plan à air se composait d'un nombre d'éléments afin que les températures des surfaces de l'élément soient uniformes, tandis que celle du flux d'air intérieur varie linéairement sur sa petite longueur.

Aboul-Enein et al. [13] ont analysé ce dispositif de capteur solaire à air avec et sans stockage thermique. Les équations du bilan énergétique de la vitre en verre et pour la plaque sont similaires à celles proposées dans le modèle mathématique de **Hegazy** [13].

2. Capteur solaire plan à air sans vitrage

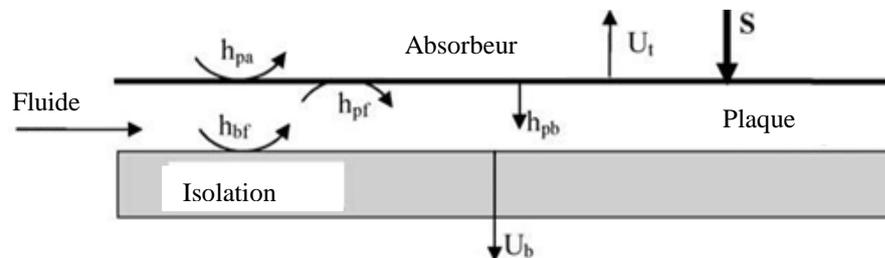


Figure 2.2 Capteur solaire plan sans vitrage [13]

Cette conception consiste à un seul canal pour l'écoulement d'air entre l'absorbeur et les plaques de fond avec isolation. **Choudhury et al** [13] ont étudié la performance thermique de ce modèle.

La performance thermique de cette conception a été également prédite par **ONG** [14]. Le modèle mathématique proposé par cet auteur est semblable à celui de Choudhury et al. [13] avec un petit changement. Dans ce modèle mathématique, le collecteur solaire a été supposé suffisamment court pour lequel les hypothèses étaient valides.

Njomo [11] et **Njomo et Daguene** [13] ont étudié le transfert de chaleur dans la conception ci-dessus. Avec des hypothèses générales dans la modélisation du transfert de chaleur.

3. Capteur solaire plan à air d'un seul passage avec cavité fermée

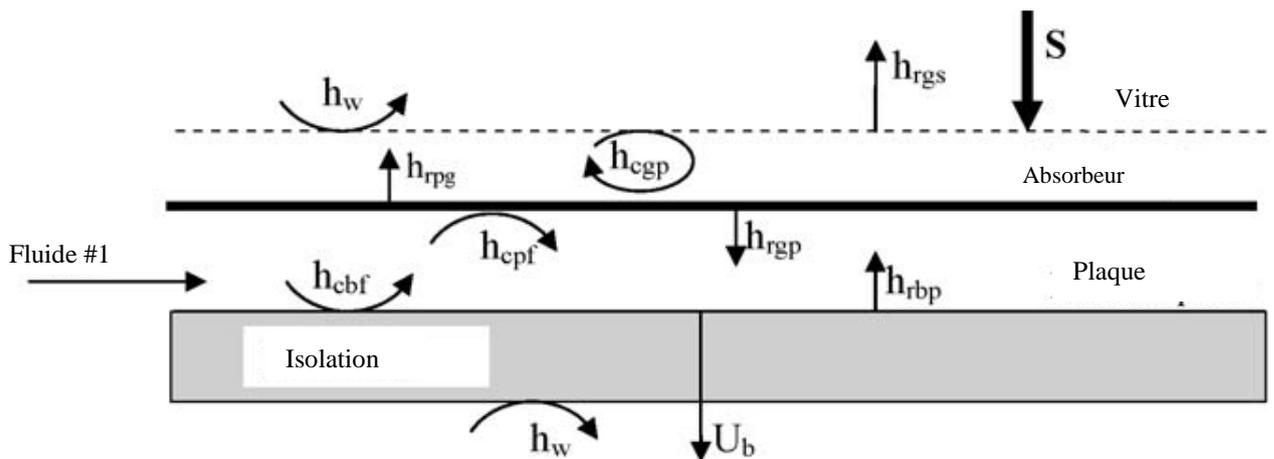


Figure 2.3. Capteur solaire plan à air d'un seul passage avec cavité fermée [13]

Dans cette conception, la plaque d'absorption est placée directement derrière le vitrage transparent avec une couche d'air statique le séparant du vitrage (fig.2.3). L'air à chauffer circule entre la surface intérieure de l'absorbeur et la couche d'isolation. Le transfert de chaleur dans cette conception a été étudié par **Choudhury et al** [13]

Pour comparer l'analyse paramétrique théorique du collecteur solaire d'air avec et sans vitrage dans le passage d'écoulement au-dessus de la plaque inférieure, **Choudhury et al.** [13] ont étudié cette conception.

Ce modèle a été également étudié expérimentalement et théoriquement par **Al-Kamil et Al-Ghareeb** [13]. Ils ont étudié l'effet du rayonnement solaire sur ce capteur solaire.

4. Capteur solaire plan à air de double passe avec un seul vitrage

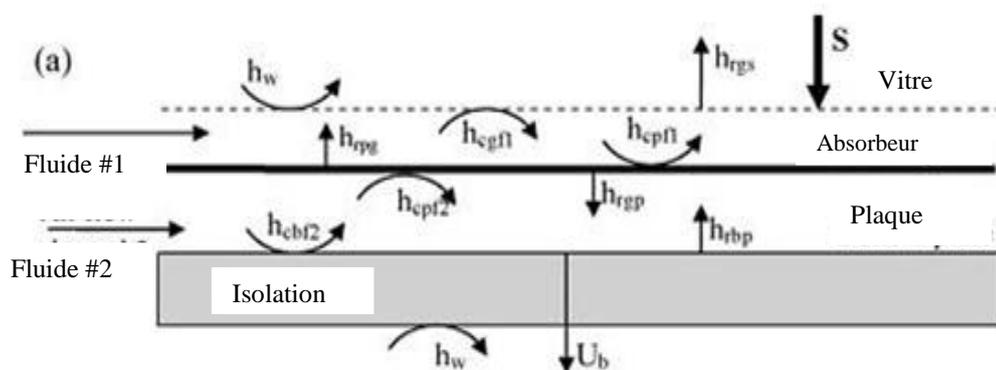


Figure 2.4 Capteur solaire plan à air de double passe avec un seul vitrage [13]

La configuration du capteur solaire plan considérée est illustrée à la Figure 2.4. Il se compose d'une vitre, double canal avec doubles flux d'air entre la vitre et l'absorbeur et entre l'absorbeur et la plaque inférieure. De nombreux articles ont étudié cette conception ; **Jha et al** [13] ont obtenu les équations différentielles aux dérivées partielles du bilan énergétique, qui régissent le comportement du système, en considérant la conversation d'énergie à chaque composante du système séparément.

Un autre modèle mathématique pour cette conception solaire à air avec film plastique, a été proposé par **Jannot et Coulibaly** [13]. Ils ont étudié théoriquement l'évolution des flux radiatifs à l'intérieur du collecteur.

5. Concentrateur parabolique composé

Le CPC, suggérée de manière indépendante par **Hinterberger** et **Winston** des États-Unis, est un concentrateur idéal non-imageant.



(a)



(b)

Figure 2.5 Concentrateur parabolique composé (a) de type symétrique avec récepteur tubulaire. (b) de type asymétrique[16]

Depuis l'invention de concentrateurs paraboliques (CPC) en 1974, de nombreux articles ont été publiés sur la littérature traitant d'une large série de conception et d'analyse. Certains d'entre eux sont documentés dans **Hsieh et al.** [15].

Cependant, après un examen approfondi de ces documents révèle que la grande majorité d'entre eux sont consacrés à l'analyse optique, géométrique et thermique du concentrateur parabolique composé avec un absorbeur tubulaire.

Parmi les travaux de recherches qui ont été entamées dans cette perspective, tel que le travail de **Harmim et al** [16] ont développé la cuisson solaire en milieu saharien. Un nouveau prototype a été construit par des moyens simples et des matériaux disponibles, il s'agit d'un cuiseur solaire de type boîte doté d'un Concentrateur Parabolique Composé (CPC) non-symétrique.

Il se compose d'une boîte isolée équipée d'un revêtement vertical double vitrage sur un côté et d'une plaque d'absorption verticale disposée juste derrière le vitrage. Le réflecteur est fixé sur le côté transparente de la boîte. La plaque d'absorbeur et le vitrage forment un canal vertical, s'ouvrent en haut et en bas, et sont fermés sur les côtés. Les deux ouvertures permettent la circulation de l'air intérieur.

Ainsi qu'un Un modèle mathématique des processus de transfert de chaleur impliqués dans cette cuisinière solaire, contenant une casserole chargée d'eau et déposé sur le plancher de la boîte a été développé et les effets de divers paramètres tels que le rayonnement solaire, la charge d'eau et les nuages sur le comportement dynamique de la cuisinière sont étudiés.

Un modèle mathématique pour calculer les performances thermiques d'un capteur solaire à air avec un concentrateur parabolique composé tronqué ayant un absorbeur unilatéral plat est présenté par **Réné Tchinda** [17], il a élaboré un code de calcul qui utilise une procédure de solution itérative pour résoudre les équations d'énergie régissant et pour estimer les paramètres de performance du collecteur. Les effets du débit massique de l'air, de la vitesse du vent et de la longueur du collecteur sur la performance du capteur.

Réné Tchinda, Nguijoï Ngos [18] ont développé les équations mathématiques pour étudier les processus thermiques dans un collecteur CPC avec un absorbeur plat. Les résultats prévus ont été également comparés aux résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.

Pramuang et Exell [19] ont rapporté les résultats d'une étude expérimentale dans laquelle la méthode de **Chungpaibulpatana et Exell** [19] est utilisée pour déterminer les paramètres de collecteur solaire à récepteur plan avec un CPC pour chauffer l'air au lieu de l'eau.

Chapitre 3 :

Formulation mathématique de capteur solaire plan à air couplé avec un CPC

Dans ce chapitre, on va modéliser le comportement thermique instationnaire à base des bilans énergétiques pour des capteurs solaires plans : vitré et non-vitré, couplés avec un CPC : vitré et non vitré ; avec une discrétisation des systèmes d'équations différentielles aux dérivés partielles, non linéaire, par la des différences finis. Les systèmes d'équations seront linéariser par la méthode de Newton-Raphson.

1. Modèles géométriques

Dans ce travail, on va étudier l'influence du CPC sur deux types (2) de capteurs solaires plans à air : un capteur non vitré et un capteur vitré avec cavité, les deux sont couplés avec un CPC vitré et non vitré, où ils sont présentés dans la Fig.3.1.

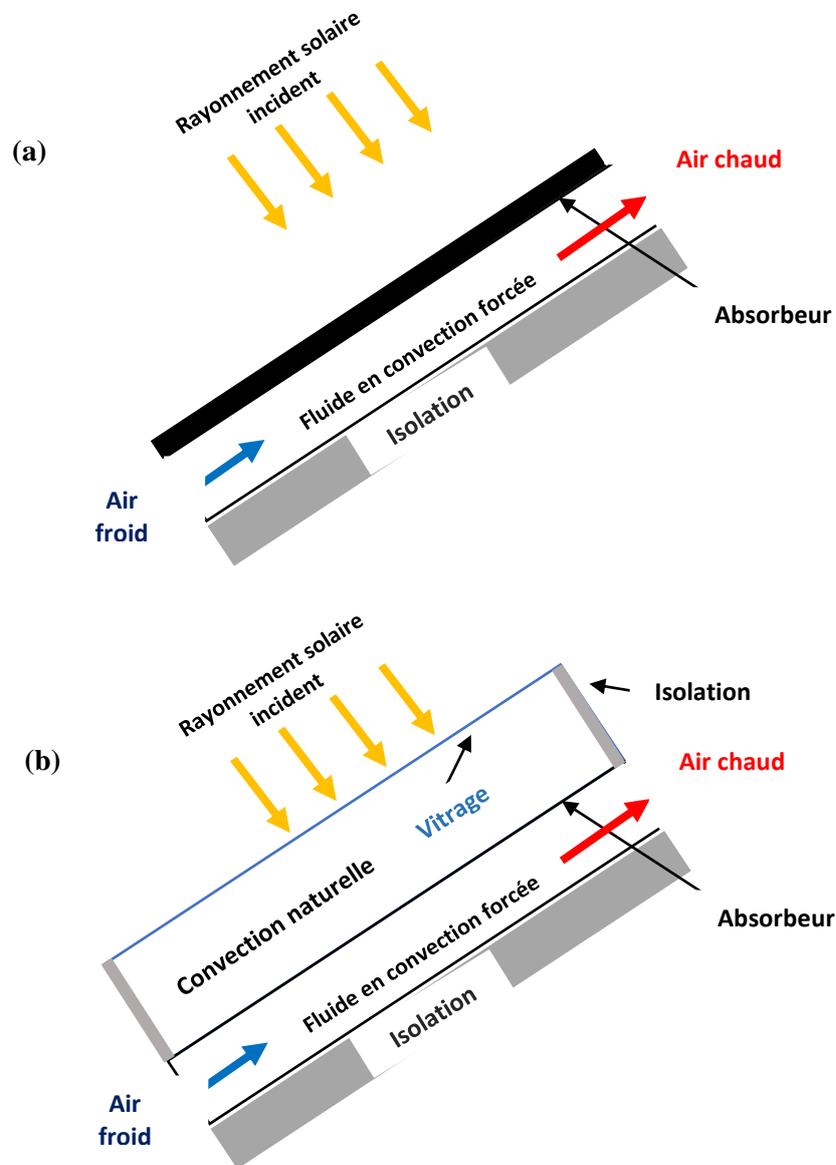


Figure 3.1 Types de capteurs solaires plans à air : (a) Type 1 : capteur solaire plan non vitré. (b) Type 2 : Capteur solaire plan à air avec cavité fermée

2. Hypothèses simplificatrices

Pour modéliser le capteur solaire plan à air couplé avec le CPC, on a adopté les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement est considéré unidimensionnel.
- Les pertes de chaleur à partir du bord du capteur solaire sont négligeables.
- La température de l'air varie dans la direction du flux.
- L'absorption du rayonnement par l'air est négligeable.
- Le CPC est idéal et ne contient pas des erreurs de fabrication.
- Le rayonnement incident est dans le domaine acceptable θ_c à l'aide de réflecteur parabolique.
- Le rapport de concentration utilisé dans ce travail est défini sur une base géométrique et est exprimé en termes de la surface totale du récepteur
- Les coefficients de transfert de chaleur par convection Air/vitre et Air/absorbeur sont considérés égaux.
- Les propriétés thermo-physiques varient en fonction de la température.

2.1. Schémas des échanges thermiques

Afin d'établir le modèle mathématique des capteurs plans à air couplés avec un CPC, les différents échanges thermiques au sein de collecteur sont comme suivant :

2.1.1. Capteurs solaire plan sans CPC

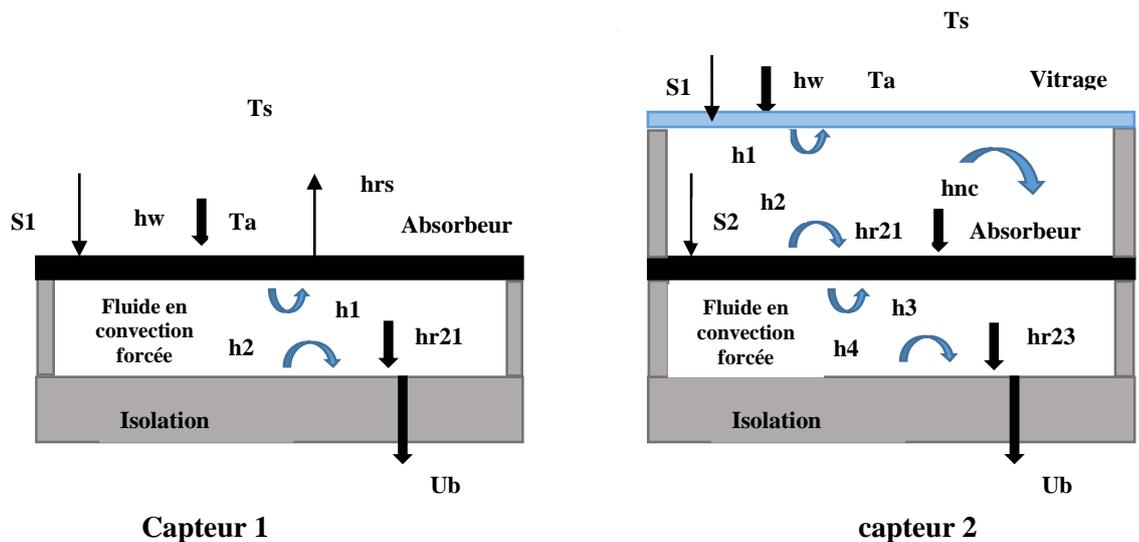


Figure 3.2. Schéma des échanges thermiques des capteurs solaires plan. (1) capteur non vitré. (2) capteur avec cavité

• Circuits équivalents

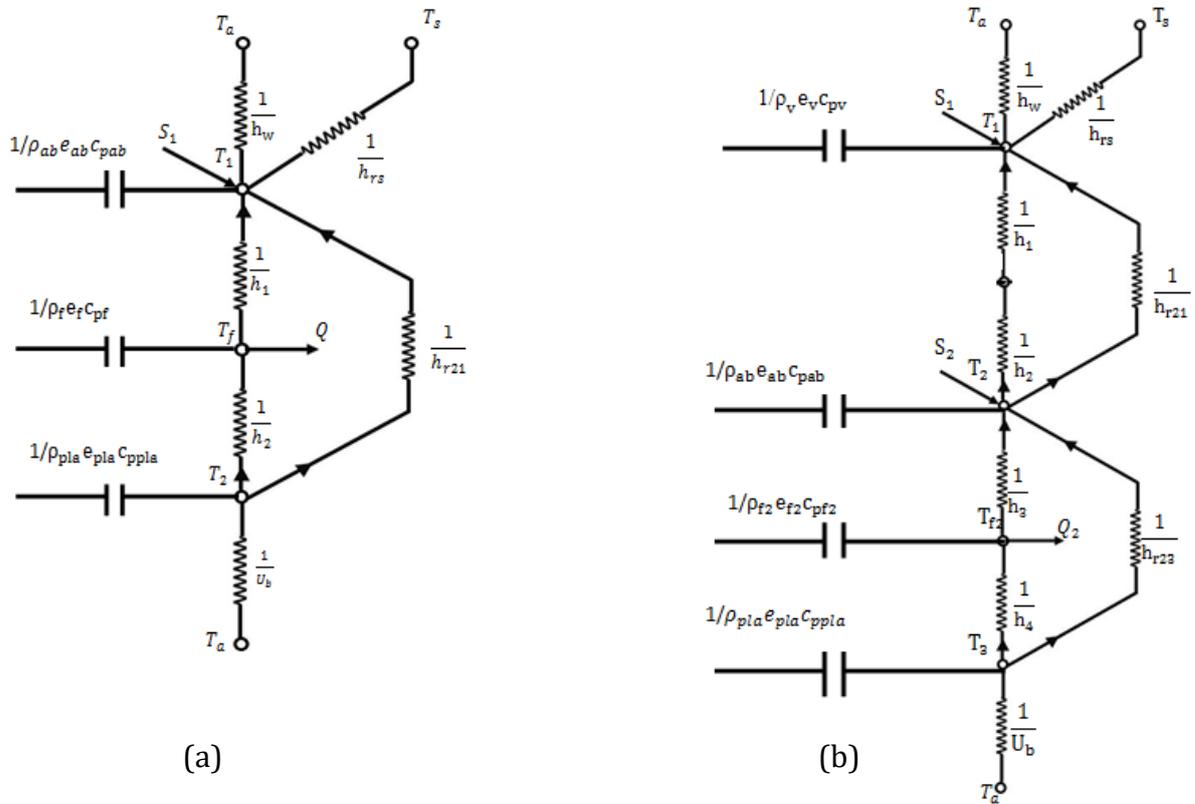


Figure 3.3 Circuits équivalents des capteurs (a) capteur non vitré (b) capteur vitré avec cavité

2.1.2. Capteur solaire plan avec CPC

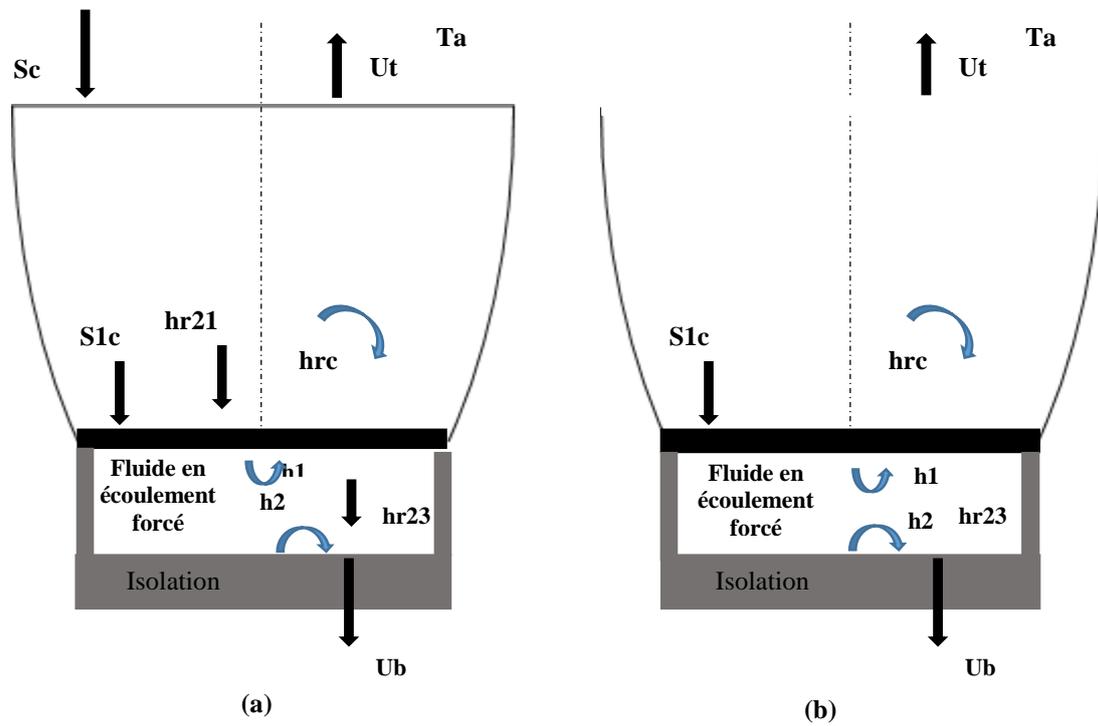


Figure 3.4 Capteur non vitré couplé avec CPC (a) CPC vitré. (b) CPC non vitré

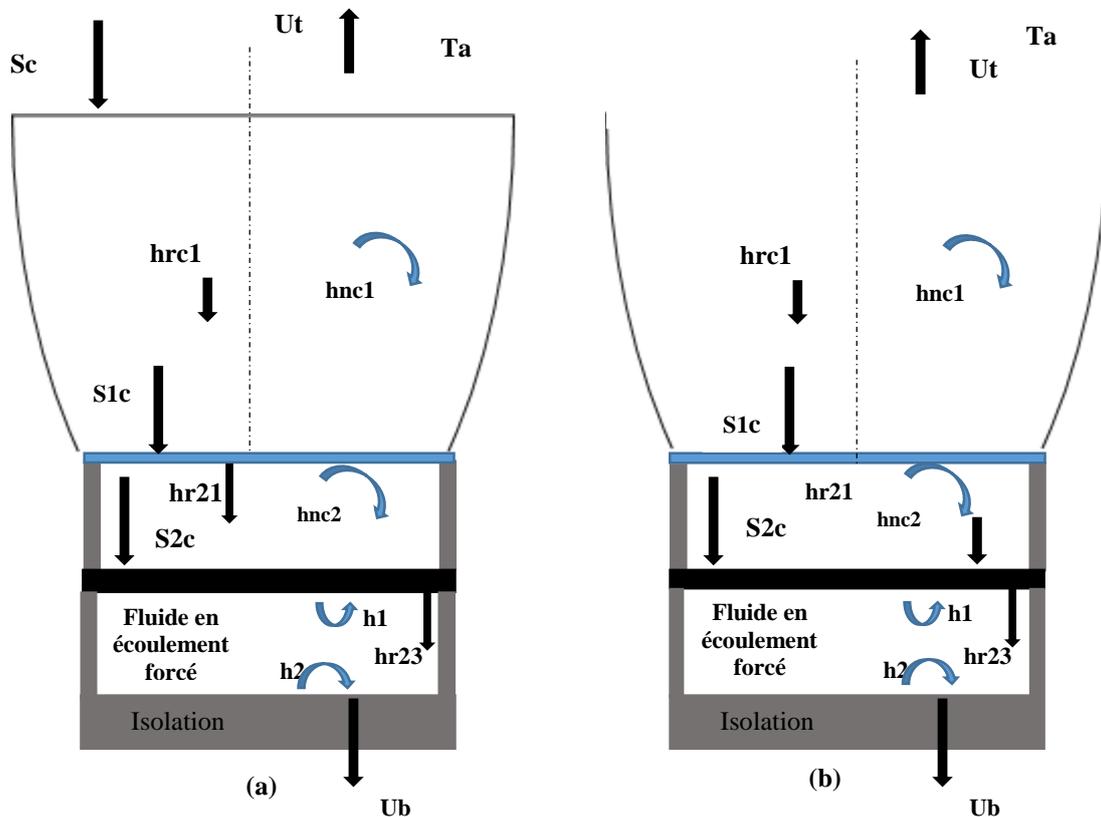


Figure 3.5 Capteur vitré avec cavité couplé avec CPC (a) CPC vitré. (b) CPC non vitré

• Circuits électriques équivalents

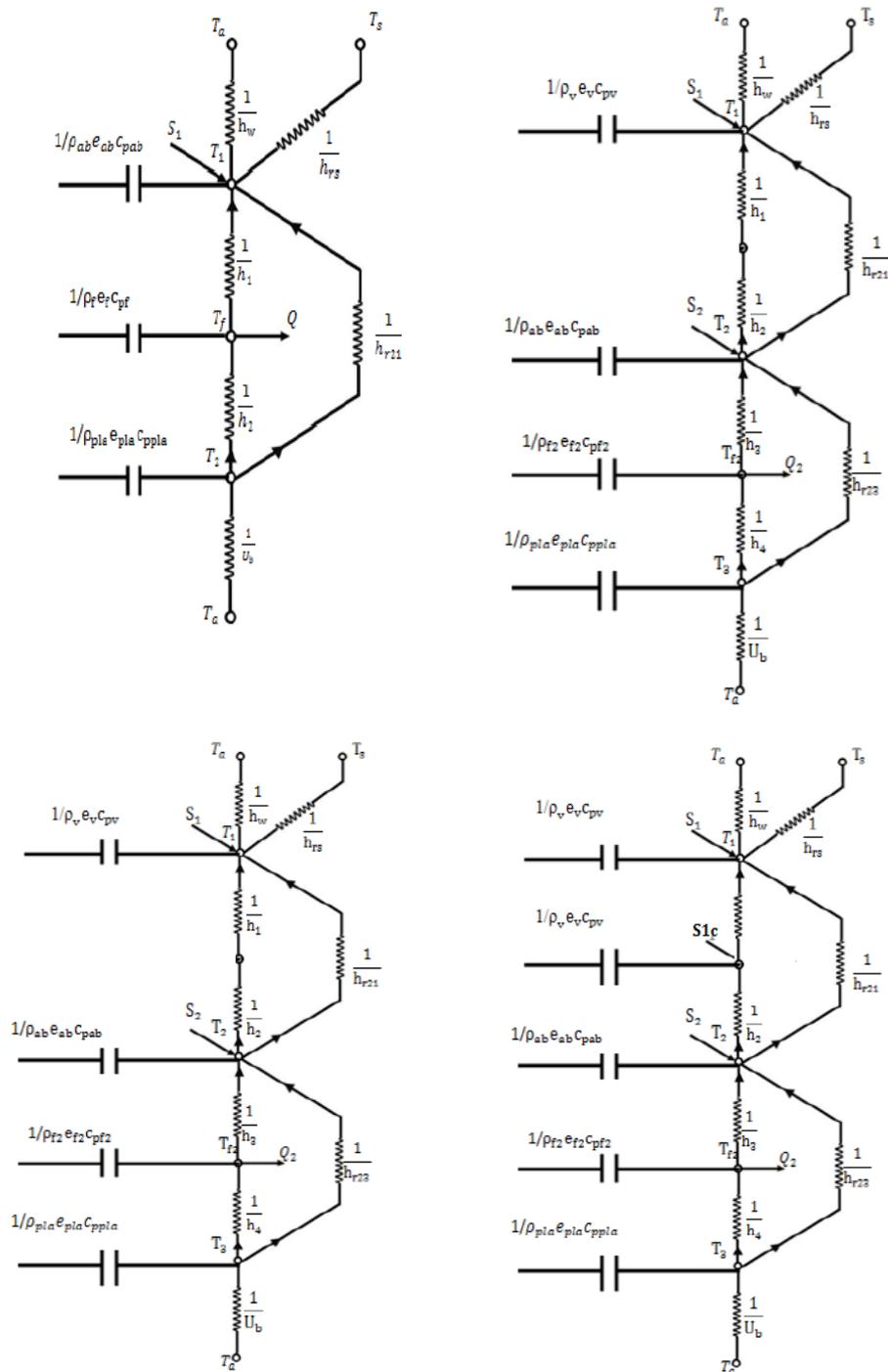


Figure 4.7 Circuits équivalents des capteurs couplés avec CPC

3.1. Capteurs plans sans CPC :

En reposant sur les circuits électriques équivalents représentés ci-dessus, les systèmes d'équations différentielles des deux capteurs sans CPC s'écrivent comme suivants :

▪ Capteur plan sans vitrage

$$\text{Absorbeur : } S_1(t) - h_1(T_1 - T_f) - h_{r21}(T_1 - T_2) - U_i(T_1 - T_a) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\text{Fluide : } h_2(T_1 - T_f) - h_1(T_f - T_2) - \Gamma = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\text{Plaque : } h_2(T_2 - T_f) + h_{r21}(T_2 - T_1) - U_b(T_2 - T_a) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.3)$$

▪ Capteur plan vitré avec cavité

$$\text{Vitrage : } S_1(t) + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_{nc}(T_2 - T_1) - U_i(T_1 - T_a) = \rho_v C p_v e_v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\text{Absorbeur : } S_2(t) - h_3(T_2 - T_f) - h_{nc}(T_2 - T_1) - h_{r23}(T_2 - T_3) - h_{r21}(T_2 - T_1) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\text{Fluide : } h_3(T_2 - T_{f2}) - h_4(T_{f2} - T_3) - \Gamma_2 = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\text{Plaque : } h_4(T_{f2} - T_3) + h_{r23}(T_2 - T_3) - U_b(T_3 - T_a) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.7)$$

3.2. Capteurs plans avec CPC

L'introduction de CPC avec les deux capteurs 1 et 2 soit sans ou avec vitrage nous implique à écrire les équations suivantes :

▪ Capteur solaire plan vitré couplé avec un CPC vitré

$$\text{Cover : } S_c + h_{nc1}(T_1 - T_c) + h_{rc1}(T_1 - T_c) - U_i(T_c - T_a) = \rho_c C p_c e_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\text{Vitrage : } S_{1c} - h_{nc1}(T_1 - T_c) - h_{rc1}(T_1 - T_c) + h_{nc2}(T_2 - T_1) + h_{r21}(T_2 - T_1) = \rho_v C p_v e_v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\text{Absorbeur : } S_{2c} - h_{nc2}(T_2 - T_1) - h_{r21}(T_2 - T_1) - h_{r32}(T_2 - T_3) - h_3(T_2 - T_f) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\text{Fluide : } h_3(T_2 - T_f) - h_4(T_f - T_3) - \Gamma(T_f - T_{fe}) = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$\text{Plaque : } h_4(T_f - T_3) - U_b(T_3 - T_a) + h_{r32}(T_2 - T_3) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.12)$$

Capteur solaire plan vitré couplé avec un CPC non vitré

$$\text{Vitre : } S_{1c} + h_{nc}(T_2 - T_1) + h_{r21}(T_2 - T_1) - U_i(T_1 - T_a) = \rho_v C p_v e_v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (3.13)$$

$$\text{Absorbeur : } S_{2c} - h_{nc}(T_2 - T_1) - h_{r21}(T_2 - T_1) - h_3(T_2 - T_f) - h_{r23}(T_2 - T_3) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.14)$$

$$\text{Fluide : } h_3(T_2 - T_1) - h_4(T_3 - T_f) - \Gamma(T_f - T_{fe}) = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$\text{Plaque : } h_{r23}(T_2 - T_3) + h_4(T_f - T_3) - U_b(T_3 - T_a) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.16)$$

▪ **Capteur solaire plan non vitré couplé avec un CPC vitré**

$$\text{Cover : } S_c + h_{nc}(T_1 - T_c) + U_t(T_c - T_a) + h_{rc1}(T_1 - T_c) = \rho_c C p_c e_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (3.17)$$

$$\text{Absorbeur : } S_{1c} - h_{nc}(T_1 - T_c) - h_{rc1}(T_1 - T_c) - h_1(T_1 - T_f) - h_{r12}(T_1 - T_2) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.18)$$

$$\text{Fluide : } h_1(T_1 - T_f) - h_2(T_f - T_2) - \Gamma(T_f - T_{fe}) = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.19)$$

$$\text{Plaque : } h_{r12}(T_1 - T_2) + h_2(T_f - T_2) - U_b(T_2 - T_a) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.20)$$

▪ **Capteur solaire plan non vitré couplé avec un CPC non vitré**

$$\text{Absorbeur : } S_{1c} - h_{r12}(T_1 - T_2) - h_1(T_1 - T_f) - U_t(T_1 - T_a) = \rho_{ab} C p_{ab} e_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} \quad (3.21)$$

$$\text{Fluide : } h_1(T_1 - T_f) - h_2(T_f - T_2) - \Gamma(T_f - T_{fe}) = \rho_f C p_f e_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3.22)$$

$$\text{Plaque : } h_{r12}(T_1 - T_2) + h_2(T_f - T_2) - U_b(T_2 - T_a) = \rho_p C p_p e_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3.23)$$

Les conditions aux limites et initiales sont comme suivants :

▪ **Capteur solaire plan sans vitrage :**

$$\begin{cases} T_{f1}(0, t) = T_a \\ T_1(x, 0) = T_a \\ T_{f1}(x, 0) = T_a \\ T_2(x, 0) = T_a \end{cases} \quad (3.24)$$

- **Capteur solaire vitré avec cavité fermée:**

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{f2}(0, t) = T_a \\ T_1(x, 0) = T_a \\ T_2(x, 0) = T_a \\ T_{f2}(x, 0) = T_a \\ T_3(x, 0) = T_a \end{array} \right. \quad (3.25)$$

4. Calcul des Coefficients de transfert de chaleur

Les différentes corrélations utilisées pour calculer les coefficients de transfert de chaleur sont prises du travail d'ONG. [14]

Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement des surfaces supérieure et inférieure :

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon_1 (T_1 + T_s)(T_1^2 + T_s^2)(T_1 - T_s) / (T_1 - T_a) \quad (3.24)$$

La température du ciel est obtenue de Swinbank [13] est donnée par : $T_s = 0.0552T_a^{1.5}$ (3.25)

Coefficient de transfert de chaleur par convection de la vitre due au vent :

Coefficient de transfert de chaleur par convection de la vitre due au vent de McAdams [14] :

$$h_w = 5.7 + 3.8V_w \quad (3.26)$$

Watmuff et al. [14] : $h_w = 2.8 + 3.3V_w$ (3.27)

Transfert de chaleur par rayonnement entre des plaques parallèles :

$$h_{r21} = \sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \quad (3.28)$$

$$h_{r32} = \sigma(T_3 + T_2)(T_3^2 + T_2^2) / (1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_4 - 1) \quad (3.29)$$

Coefficient de transfert de chaleur par convection forcée entre plaques parallèles

- **Régime laminaire (Re < 2300) :**

$$Nu = Nu_\infty + \frac{a[\text{Re Pr}(D_h / L)]^m}{1 + b[\text{Re Pr}(D_h / L)]^n} \quad (3.30)$$

Où les constantes sont : $a = 0.00190; b = 0.00563; m = 1.71; n = 1.17; et Nu_\infty = 5.4$

- **Régime transitoire ($2300 < Re < 6000$)**

$$Nu = 0.116(Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \times \left[1 + (D_h / L)^{2/3} \right] \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.31)$$

- **Régime turbulent ($Re > 6000$)**

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.32)$$

Coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle entre plaques parallèles

$$Nu_{nc} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\phi)^{1.6}}{Ra \cos(\phi)} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos(\phi)} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos(\phi)}{5830} \right)^{1/3} \right]^+ \quad (3.33)$$

La notation $[]^+$ est utilisé pour désigner que si la quantité est négative, elle doit être égale à zéro. Le coefficient de convection naturel est spécifié pour la cavité d'air entre le vitrage et les surfaces absorbantes.

Avec :

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\kappa} \quad (3.34)$$

$$Re = \frac{m D_h \rho}{\mu S_m} \quad (3.35)$$

$$h = \frac{Nu \kappa}{D_h} \quad (3.36)$$

Le coefficient des pertes de chaleur vers l'avant

$$U_t = h_w + h_{rs} \quad (3.37)$$

Le coefficient des pertes de chaleur vers l'arrière :

$$U_b = \frac{1}{i = \sum_1^n (x_{bi} / k_{bi}) + 1 / h_w} \quad (3.38)$$

Propriétés physique de l'air en fonction de température [14]

Viscosité dynamique : $\mu = [1.983 + 0.00184(T - 27)] 10^{-5}$ (3.39)

Masse volumique : $\rho = 1.1774 - 0.00359(T - 27)$ (3.40)

$$\text{Conductivité thermique : } k = 0.02624 + 0.0000758(T - 27) \quad (3.41)$$

$$\text{Chaleur spécifique : } Cp = 1.0057 + 0.000066(T - 27) \quad (3.42)$$

Calcul de rayonnement solaire

Les flux thermiques de rayonnement solaire absorbé par la première surface est : $S_1 = \alpha_1 H$ (3.43)

Le flux thermique de rayonnement solaire absorbé par la deuxième surface est : $S_2 = \tau \alpha_2 H$ (3.44)

Pour le calcul de rayonnement solaire incident sur le capteur on a choisi le modèle de **LIU et JORDAN** [20] qui donne de bons résultats pour l'estimation d'irradiation sur un plan incliné (exemple d'application dans la wilaya de Tlemcen).

Le rayonnement global sur un plan incliné donnée par l'équation suivante :

$$G = R_d(\beta) + D_c(\beta) + D_s(\beta) \quad (3.45)$$

La composante du rayonnement direct est donnée par la relation suivante : $R_d(\beta) = I_h R_b$ (3.46)

I_h étant le rayonnement direct sur un plan horizontal

Avec R_b : est le facteur d'inclinaison donné par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos(L - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(L - \beta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) + \sin(L) \cdot \sin(\delta)} \quad (3.47)$$

La composante du rayonnement diffus sur un plan incliné est donnée par :

$$D_c(\beta) = D_h \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.48)$$

La dernière composante du rayonnement diffus par le sol est donnée par l'équation suivante :

$$D_s(\beta) = G_h \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot \rho \quad (3.50)$$

β Angle d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontal.

ρ Étant la réflectivité moyenne du sol avoisinant au plan incliné (Albédo du sol).

Avec D_h et G_h sont des conditions de trouble correspondent à la teneur de l'atmosphère en poussières et autres polluants.

La valeur de la hauteur h du soleil doit être exprimée en degrés

Condition de trouble	D_h	G_h
Ciel trouble	$1260 \exp\left(-\frac{1}{2.3 \sin(h+3)}\right)$	$955(\sin(h))^{1.25}$
Ciel moyenne troublé	$1230 \exp\left(-\frac{1}{3.8 \sin(h+1.6)}\right)$	$1080(\sin(h))^{1.22}$
Ciel très pur	$1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h-1)}\right)$	$1130(\sin(h))^{1.15}$

Table 3.1 Expressions empiriques des éclairagements solaires [20]

Calcul de rayonnement solaire pour les capteurs couplés avec CPC :

Le calcul de rayonnement à travers le CPC attachés aux deux capteurs 1 et 2 est détaillé comme suivant :

- **Capteur solaire plan vitré couplé avec CPC vitré : [18]**

$$S_c = S(t)[\alpha_c + \alpha_c \tau_c \bar{\rho}_v \rho_m^{2\langle n \rangle}] Ca \quad (3.51)$$

Avec $\langle n \rangle$ nombre moyenne de réflexion $\langle n \rangle = 0.5 + 0.07 Ca$

$$S_{1c} = S(t)[\alpha_c + \alpha_c \tau_c \bar{\rho}_v \rho_m^{2\langle n \rangle}] Ca \quad (3.52)$$

$$S_{2c} = S(t) \tau_c \rho_m^{\langle n \rangle} \tau_v \left[\alpha_{ab} + \bar{\rho}_v \bar{\rho}_{ab} \frac{A_{ab}}{A_v} \right] Ca \quad (3.53)$$

- **Capteur solaire plan vitré couplé avec CPC non vitré : [17]**

$$S_c = S(t)[\alpha_c + \alpha_c \tau_c \bar{\rho}_{ab} \rho_m^{2\langle n \rangle}] Ca \quad (3.54)$$

$$S_{1c} = S(t) \tau_c \rho_m^{\langle n \rangle} P \left[\alpha_{ab} + \alpha_{ab} \bar{\rho}_{ab} \bar{\rho}_c \frac{1}{Ca} \right] Ca \quad (3.55)$$

Avec P : facteur de perte d'écart $P = 1 - g/l_{ab}$. et g : épaisseur de l'écart

- **Capteur solaire plan non vitré couplé avec CPC vitré : [17]**

$$S_c = S(t) \left[\alpha_c + \alpha_c \tau_c \overline{\rho_{ab}} \overline{\rho_m^{2\langle n \rangle}} \right] Ca \quad (3.56)$$

$$S_{1c} = S(t) \tau_c \overline{\rho_m^{2\langle n \rangle}} P \left[\alpha_{ab} + \alpha_{ab} \overline{\rho_{ab}} \overline{\rho_c} \frac{1}{Ca} \right] Ca \quad (3.57)$$

- **Capteur solaire plan non vitré couplé avec CPC non vitré :**

$$S_{1c} = S(t) \alpha_{ab} \overline{\rho_m^{2\langle n \rangle}} PCa \quad (3.58)$$

5. Rendement thermique et Optique

Le rendement du capteur est défini comme le rapport de gain d'énergie utile Q_u , sur l'énergie solaire incidente :

$$\eta = \frac{\int Q_u}{A_c \int S dt} \quad (3.59)$$

Et le rendement thermique du capteur est le suivant :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c S(t)} \quad (3.60)$$

Pour évaluer la performance du collecteur, il est nécessaire d'estimer le coefficient global de perte U_L , le facteur d'efficacité du collecteur F_0 et les coefficients internes de transfert de chaleur.

En supposant que le CPC est idéal, l'efficacité se révèle être :

$$\eta = \frac{m_f Cp (T_{fs-c} - T_{fe-c})}{S(t) A_c} \quad (3.61)$$

$$\text{Le rendement optique du capteur : } \eta_0 = \tau_c \overline{\rho_m^{2\langle n \rangle}} \alpha_{ab} P \left(1 + \overline{\rho_{ab}} \overline{\rho_c} \frac{l}{W_c} \right) \quad [13] \quad (3.62)$$

Selon Pramuang et Exell [16], le rendement optique η_0 donnée en fonction des propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication des collecteurs par :

$$\eta_0 = \tau_{\text{cov}} \tau_{CPC} \alpha_{ab} \quad (3.63)$$

Où : $\tau_{CPC} = \overline{\rho_m^{2\langle n \rangle}}$

Pour un capteur solaire plan à air avec CPC, la chute de pression et le travail de ventilateur seront considérés. Dans ce cas, le rendement effectif est défini par :

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\left(C_p m_f (T_{fs} - T_{fe}) - \frac{W_{psc}}{C_f} \right)}{LWH}$$

$$W_{psc} = m_f \Delta P / \rho \eta_{ven}$$

$$\Delta P = f m_f^2 / \rho (L / D_h)^3$$

$$f = f_0 + y D_h / L$$

Avec f_0 et y sont des paramètres de ventilateur

6. Discrétisation

Distribution de la température le long de la direction du flux

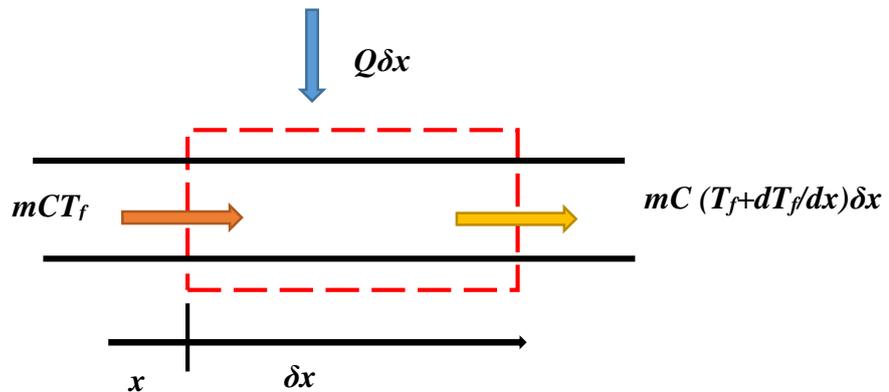


Figure 3.8 Energie utile transportée dans une section élémentaire de capteur solaire.

Considérons que la chaleur s'écoule dans et hors d'un élément d'épaisseur δx dans un flux d'air unique à une distance x de l'entrée d'un collecteur comme indiqué sur la Figure (). Les températures des parois du conduit formant le canal d'air sont supposées uniformes mais non égales entre elles pour chaque paroi.

La température du flux d'air à une distance x de l'entrée du collecteur est supposée être à T_f . La température est supposée uniforme dans toute la section transversale. À la sortie de la section ($x + \delta x$), la température moyenne de l'air est égale à : $T_f + (dT_f / dx) \cdot \delta x$.

L'équation d'équilibre thermique pour cet élément est donc :

$$mCT_f + QW\delta x = mC \left(T_f + \frac{dT_f}{dx} \delta x \right) \quad (3.64)$$

En simplifiant et divisant par δx on obtient :

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{QW}{mC_p} \quad (3.65)$$

En supposant que la chaleur utile transférée à l'air est uniforme le long d'un collecteur de longueur L, la température moyenne de l'air à la sortie peut être trouvée en intégrant l'équation

pour donner

$$T_{f.o} - T_{f.i} = \frac{QWL}{(mC_p)} \quad (3.66)$$

Cette hypothèse implique que la température de l'air varie linéairement le long du collecteur. D'après les observations, cette hypothèse est valable pour les collecteurs «courts». La température moyenne de l'air est alors égale à la moyenne arithmétique

$$T_f = \frac{(T_{f.i} - T_{f.o})}{2} \quad (3.67)$$

La chaleur utile transférée vers le flux d'air en mouvement peut ensuite être écrite en fonction des températures moyennes et des températures d'entrée

$$Q = \frac{2mC_p(T_{f.i} - T_{f.o})}{WL} \quad (3.68)$$

Pour le cas du débit à deux passages supposé, où les deux flux sont à la température moyenne de l'air

$$Q_1 = \frac{2m_1C_p(T_{f1.i} - T_{f1.o})}{WL} \quad (3.69)$$

$$Q_2 = \frac{2m_2C_p(T_{f2.i} - T_{f2.o})}{WL} \quad (3.70)$$

En introduisant $\Gamma_1 = 2m_1C_p(T_{f1} - T_{f1.i})$, et $\Gamma_2 = 2m_2C_p(T_{f2} - T_{f2.i})$ Dans ce qui précède, Q_1 et Q_2 peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} Q_1 &= \Gamma_1(T_{f1} - T_{f1.i}) \\ Q_2 &= \Gamma_2(T_{f2} - T_{f2.i}) \end{aligned} \quad (3.71)$$

Le terme temporel est calculé comme suit : $\frac{dT}{dt} = \frac{T - T_0}{\Delta t}$

Où : T et T₀ représentent les températures à l'instant n+1 et n.

On obtient le système des matrices suivantes pour chaque type de capteur solaire plan à air :

Capteur plan sans vitrage sans CPC

$$\begin{bmatrix} \left(h_1 + h_{r21} + U_t + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) & -h_{r21} & -h_1 \\ h_2 & -(h_1 + h_2 + \Gamma_1 + hst) & h_1 \\ h_{r21} & h_2 & -\left(h_2 + U_b + U_{r21} + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_1 + U_t T_a + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} T_{10} \\ \Gamma_1 T_{f1e} - hst T_{f10} \\ U_b T_a + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} T_{20} \end{Bmatrix} \quad (3.72)$$

Capteur plan avec cavité sans CPC

$$\begin{bmatrix} -\left(h_{r21} + h_{nc} + U_t + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) & (h_{r21} + h_{nc}) & 0 & 0 \\ (h_{r21} + h_{nc}) & -\left(h_{r21} + h_{nc} + h_3 + h_{r23} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) & h_3 & h_{r23} \\ 0 & h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma_2 + hst) & h_4 \\ 0 & h_{r23} & h_4 & -\left(h_4 + h_{r23} + U_b + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -S_1 - U_t T_a + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} T_{10} \\ -S_1 + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} T_{20} \\ \Gamma_2 T_{f2e} - hst T_{f20} \\ U_b T_a + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} T_{30} \end{Bmatrix} \quad (3.73)$$

Capteur solaire plan avec civté couplé avec CPC vitré

$$\begin{bmatrix} -\left(h_{nc1} + h_{rc1} + U_t + \frac{\rho_c C p_c e_c}{\Delta t} \right) & (h_{nc1} + h_{rc1}) & 0 & 0 & 0 \\ (h_{nc1} + h_{rc1}) & -\left(h_{nc1} + h_{rc1} + h_{r21} + h_{nc2} + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) & (h_{r21} + h_{nc2}) & 0 & 0 \\ 0 & (h_{r21} + h_{nc2}) & -\left(h_{nc2} + h_{r21} + h_{r23} + h_3 + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) & h_3 & h_{r23} \\ 0 & 0 & h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma_2 + hst) & h_4 \\ 0 & 0 & h_{r23} & h_4 & \left(h_4 + h_{r23} + U_b + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T_c \\ T_1 \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_c - U_t Ta + \frac{\rho_c C p_c e_c}{\Delta t} T_{c0} \\ -S_{1c} + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} T_{10} \\ -S_{2c} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} T_{20} \\ \Gamma_2 T_{f2e} - hst T_{f20} \\ U_b Ta + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} T_{30} \end{pmatrix} \quad (3.74)$$

Capteur solaire plan vitré couplé avec CPC non vitré

$$\begin{bmatrix} -\left(h_{r21} + h_{nc} + U_t + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t}\right) & (h_{r21} + h_{nc}) & 0 & 0 \\ (h_{r21} + h_{nc}) & -\left(h_{r21} + h_{nc} + h_3 + h_{r23} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t}\right) & h_3 & h_{r23} \\ 0 & h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma_2 + hst) & h_4 \\ 0 & h_{r23} & h_4 & -\left(h_4 + h_{r23} + U_b + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_{1c} - U_t Ta + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} T_{10} \\ -S_{2c} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \\ \Gamma_2 T_{f2e} - hst T_{f20} \\ U_b Ta + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \end{pmatrix} \quad (3.75)$$

Capteur solaire plan non vitré couplé avec CPC vitré

$$\begin{bmatrix} -\left(h_{rc1} + h_{nc} + U_t + \frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t}\right) & (h_{rc1} + h_{nc}) & 0 & 0 \\ (h_{rc1} + h_{nc}) & -\left(h_{rc1} + h_{nc} + h_3 + h_{r21} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t}\right) & h_3 & h_{r23} \\ 0 & h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma_2 + hst) & h_4 \\ 0 & h_{r23} & h_4 & -\left(h_4 + h_{r21} + U_b + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_c \\ T_1 \\ T_{f2} \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_c - U_t Ta + \frac{\rho_c C p_c e_c}{\Delta t} T_{c0} \\ -S_{1c} + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} T_{10} \\ \Gamma_2 T_{f2e} - hst T_{f20} \\ U_b Ta + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} T_{20} \end{pmatrix} \quad (3.76)$$

Capteur solaire plan non vitré couplé avec CPC non vitré

$$\begin{bmatrix} \left(h_1 + h_{r21} + U_t + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) & -h_{r21} & -h_1 \\ h_2 & -(h_1 + h_2 + \Gamma_1 + hst) & h_1 \\ h_{r21} & h_2 & -\left(h_2 + U_b + U_{r21} + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1c} + U_t T_a + \frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} T_{10} \\ \Gamma_1 T_{f1e} - hst T_{f10} \\ U_b T_a + \frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} T_{20} \end{pmatrix} \quad (3.77)$$

7. Méthode de résolution et linéarisation

On considère le système des équations non-linéaire de capteur avec cavité à titre d'exemple S'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} F_1(T_1, T_2, T_{f1}, T_3) \\ F_2(T_1, T_2, T_{f1}, T_3) \\ F_3(T_1, T_2, T_{f1}, T_3) \\ F_4(T_1, T_2, T_{f1}, T_3) \end{cases} \quad (3.78)$$

Avec

$$\begin{aligned} F_1 &= \left(h_{nc} + h_{r21} + U_t + \left(\frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) \right) T_1 - (h_{r21} + h_{nc}) T_2 - S_1 - U_t T_a - \left(\frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) T_{10} \\ F_2 &= (h_{nc} + h_{r21}) T_1 + \left(h_{r21} + h_{nc} + h_{r32} + \left(\frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) \right) T_2 - h_3 T_{f2} - h_{r32} T_3 - S_1 - U_t T_a - \left(\frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) T_{20} \\ F_3 &= -h_3 T_2 + (h_3 + h_4 + \Gamma + h_{st}) T_{f2} - h_4 T_3 - \Gamma_2 T_{fe} - hst T_{f20} \\ F_4 &= -h_{r32} T_2 - h_4 T_{f2} + \left(h_4 + h_{r32} + U_b + \left(\frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \right) T_3 - U_b T_a - \left(\frac{\rho_p C p_p e_p}{\Delta t} \right) \end{aligned}$$

$$hst = \rho_f C p_f e_f / \Delta t$$

Pour résoudre ce système d'équation non linéaire on applique la méthode de Newton-Raphson comme suit :

$$\left[J_k(T^{(i)}) \right] \{ \Delta T \} = \{ -F(T^{(i)}) \} \quad (3.79)$$

Où :

$$J_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial T_1} & \frac{\partial F_1}{\partial T_2} & \frac{\partial F_1}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_1}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial T_1} & \frac{\partial F_2}{\partial T_2} & \frac{\partial F_2}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_2}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial T_1} & \frac{\partial F_3}{\partial T_2} & \frac{\partial F_3}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_3}{\partial T_3} \\ \frac{\partial F_4}{\partial T_1} & \frac{\partial F_4}{\partial T_2} & \frac{\partial F_4}{\partial T_{f2}} & \frac{\partial F_4}{\partial T_3} \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

$$\text{Et } \{\Delta T\} = \{(T^{(i+1)})\} - \{(T^{(i)})\} \quad (3.81)$$

Le calcul des coefficients de la matrice Jacobéenne est comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_1}{\partial T_1} &= \frac{\partial}{\partial T_1} \left(h_{nc} + h_{r21} + U_t + \left(\frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) \right) + \left(h_{nc} + h_{r21} + U_t + \left(\frac{\rho_v C p_v e_v}{\Delta t} \right) \right) + \frac{\partial h_{r21}}{\partial T_1} T_2 - \frac{\partial U_t}{\partial T_1} T_a \\ \frac{\partial F_1}{\partial T_2} &= \frac{\partial (h_{nc} + h_{r21})}{\partial T_2} T_1 - \frac{\partial}{\partial T_2} (h_{r21} + h_{nc}) T_2 - (h_{r21} + h_{nc}) \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_{f1}} = 0$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial T_3} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_2}{\partial T_1} &= \frac{\partial (h_{nc} + h_{r21})}{\partial T_1} T_1 + (h_{nc} + h_{r21}) + \frac{\partial}{\partial T_1} (h_{r21}) T_2 \\ \frac{\partial F_2}{\partial T_2} &= \frac{\partial}{\partial T_2} (h_{nc} + h_{r21}) T_1 + \frac{\partial}{\partial T_2} \left(h_{r21} + h_{nc} + h_{r32} + \left(\frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) \right) + \left(h_{r21} + h_{nc} + h_{r32} + \left(\frac{\rho_{ab} C p_{ab} e_{ab}}{\Delta t} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial T_2} h_{r32} T_3 \end{aligned} \quad (3.83)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_{f1}} = - \frac{\partial}{\partial T_{f1}} h_3 T_{f1} - h_3$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial T_3} = \frac{\partial}{\partial T_3} h_{r32} T_2 - \frac{\partial}{\partial T_3} h_{r32} T_3 - h_{r32}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_1} = 0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_2} = -h_3$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_{f1}} = - \frac{\partial}{\partial T_{f1}} h_3 T_2 + \frac{\partial}{\partial T_{f1}} (h_3 + h_4 + \Gamma + h_{st}) T_{f1} + (h_3 + h_4 + \Gamma + h_{st}) - \frac{\partial}{\partial T_{f1}} h_{st} T_{f10} \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial T_3} = - \frac{\partial}{\partial T_3} h_4 T_3 - h_4$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_4}{\partial T_1} &= 0 \\
\frac{\partial F_4}{\partial T_2} &= -\frac{\partial h_{r32}}{\partial T_2} T_2 - h_{r32} + \frac{\partial h_{r32}}{\partial T_2} T_3 \\
\frac{\partial F_4}{\partial T_{f1}} &= -\frac{\partial}{\partial T_{f1}} h_4 T_{f1} + \frac{\partial}{\partial T_{f1}} (h_4) T_3 \\
\frac{\partial F_4}{\partial T_3} &= -\frac{\partial h_{r32}}{\partial T_3} T_2 + \frac{\partial h_{r32}}{\partial T_3} T_3 + \left(h_4 + h_{r32} + U_b + \left(\frac{\rho_p C_p e P}{\Delta t} \right) \right)
\end{aligned} \tag{3.85}$$

La même méthode peut être appliquée par analogie pour les capteurs couplés avec CPC

Le critère de convergence par la méthode de Newton-Raphson de ce calcul itératif est :

$$\left\| \{T^{(i+1)}\} - \{T^{(i)}\} \right\| < \varepsilon \tag{3.86}$$

8. Algorithme de calcul et organigrammes

Pour résoudre le système d'équilibre thermique des équations non linéaires obtenues pour les deux types de capteurs solaires plans d'air, nous avons appliqué la méthode itérative de Newton-Raphson avec un étalon de critère de convergence de 10^{-3} pour converger à la solution en chaque tranche. La température de sortie est obtenue en chaque section sera placée comme température d'entrée dans la prochaine section.

L'algorithme de calcul est comme suit :

- Division de la longueur du capteur où la direction de circulation d'air en nombre spécifique des sections élémentaires.
- Initialisation des températures d'entrée des capteurs comme température ambiante.
- Calcul des différents coefficients de transfert de chaleur et de leurs dérivés en fonction des températures initialisées.
- Utilisation des systèmes linéarisés avec la méthode de Newton-Raphson, le problème sera résolu en renvoyant le résultat de chaque itération à la phase suivante, jusqu'à atteindre la condition d'itération d'arrêt pour obtenir la solution convergée.
- la température de la sortie de section élémentaire sera placée comme la température d'entrée pour la section suivante.

Ce procédé de calcul est répété jusqu'à finir toutes les sections élémentaires.

En utilisant des organigrammes peut être représenté en régime stationnaire et instationnaire comme suit :

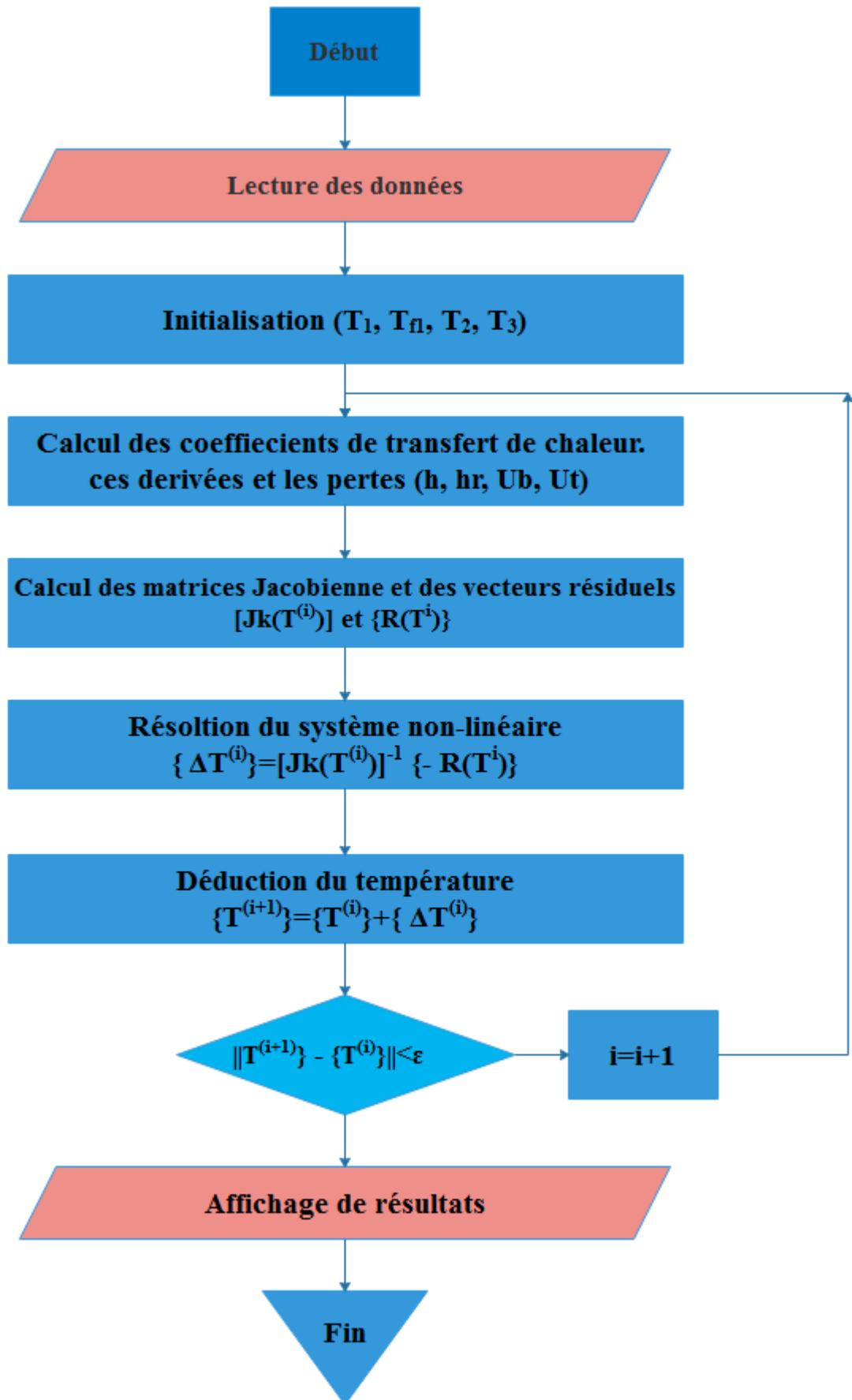


Figure 3.9 Organigramme pour le régime stationnaire

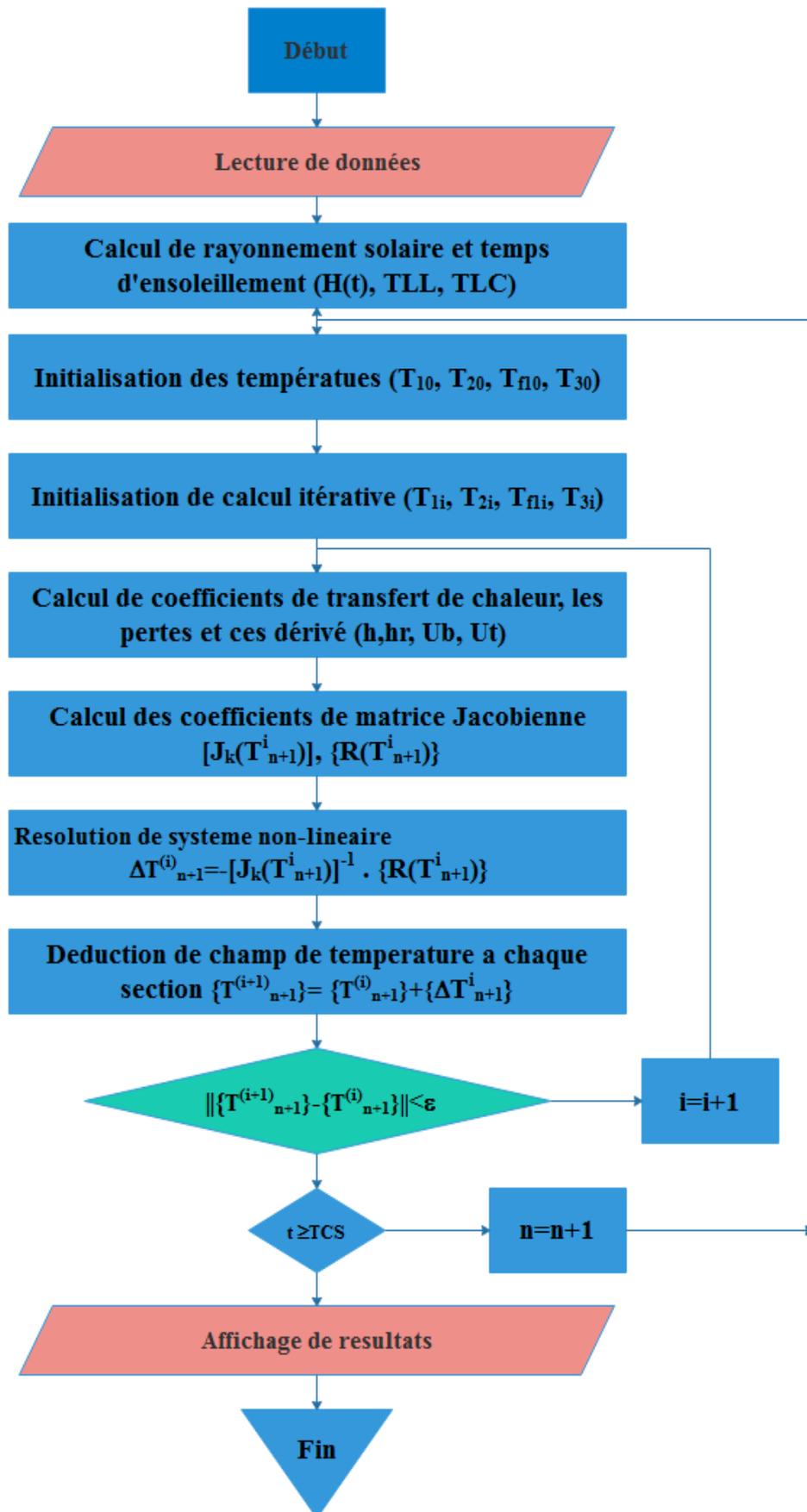


Figure 3.10 Organigramme pour le régime instationnaire

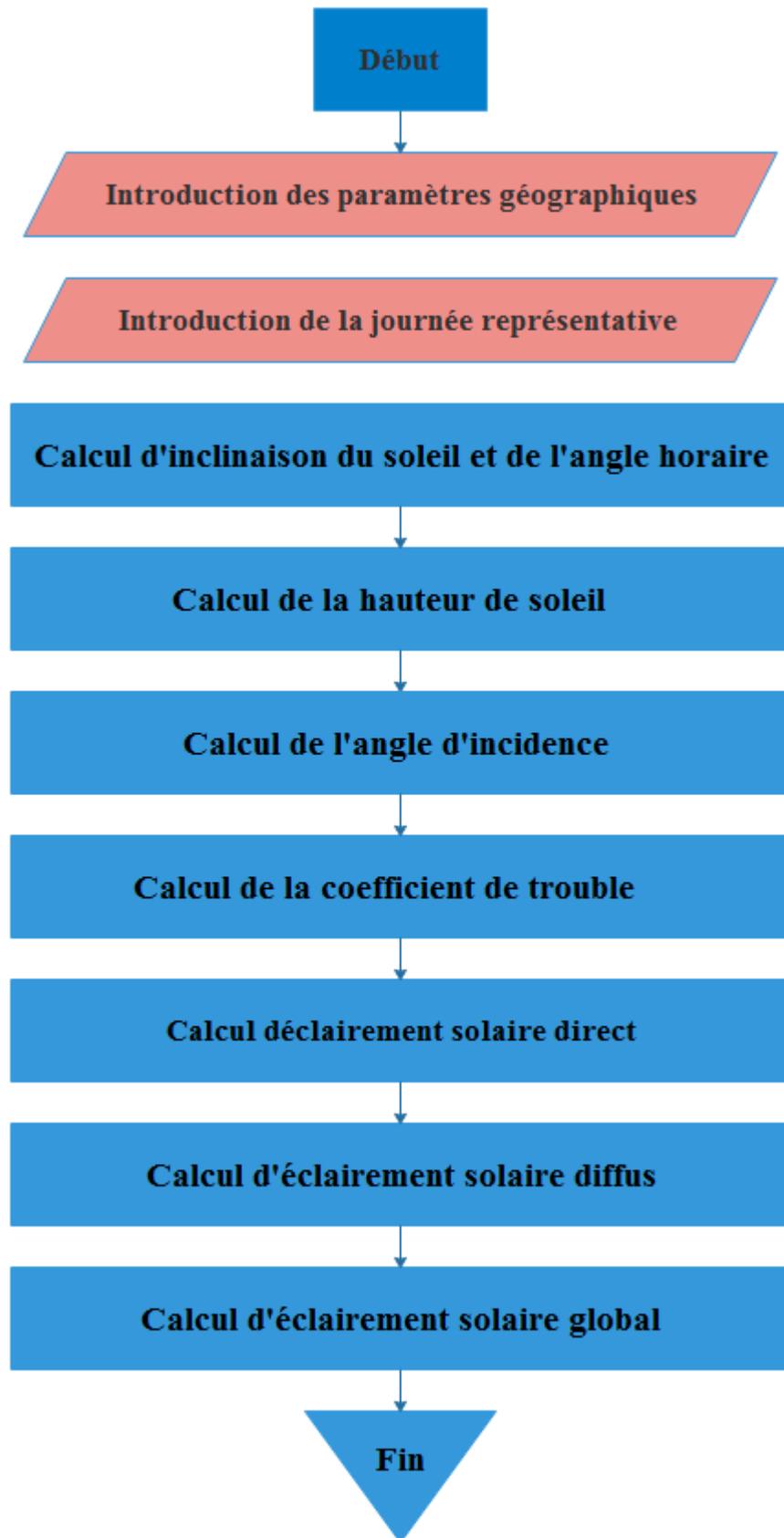


Figure 3.11 Organigramme de calcul de rayonnement solaire

Chapitre4 :

Résultats, discussions et interprétations

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement thermique des deux capteurs : **capteur à un seul passage non vitré** et **capteur à un seul passage avec cavité fermée**, en présence d'un concentrateur parabolique composé (CPC), en régime instationnaire pour différents cas (CPC vitré, CPC non vitré). L'évolution journalière de la température de sortie de chaque capteur pour différents cas a été simulée et présentés pour montrer l'effet d'introduction de CPC en régime instationnaire, pour deux journées types (21 juin et 17 janvier).

Une étude paramétrique a été effectuée, prenant en considération l'effet du : coefficient de concentration du CPC, débit massique et la profondeur du passage d'air sur les performances des deux capteurs 1 et 2 couplés avec un CPC soit vitré ou non vitré.

1. Validation de programmation :

Afin de valider notre programme écrit en MATLAB, on a pris deux types (02) à un seul passage : sans vitrage et vitré avec cavité fermée ; pour comparer nos résultats avec le travail d'ONG [14] dans le cas de régime stationnaire.

Les différentes données optiques et géométriques sont présentées dans les deux tableaux suivants :

	Vitrage	Absorbeur	Plaque
α	0.06	0.95	/
ε	0.9	0.95	0.25
τ	0.84	/	/

Table 4.1 Propriétés optiques des composantes des capteurs [14]

	Capteur 1	Capteur 2
L (m)	10	10
W (m)	0.254	0.254
t1, t2 (m)	0.0254	0.0254
Xb1, Xb2 (m)	0.025	0.025

Table 4.2 Données géométriques des capteurs [14]

Les résultats sont obtenus en considérant : $T_a=27\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon=10^{-4}$ et $T_{fe}=T_a$.

Les résultats sont représentés pour deux nombres de Reynolds $Re=4000$ et $Re=40000$ dans les figures et tableaux suivants :

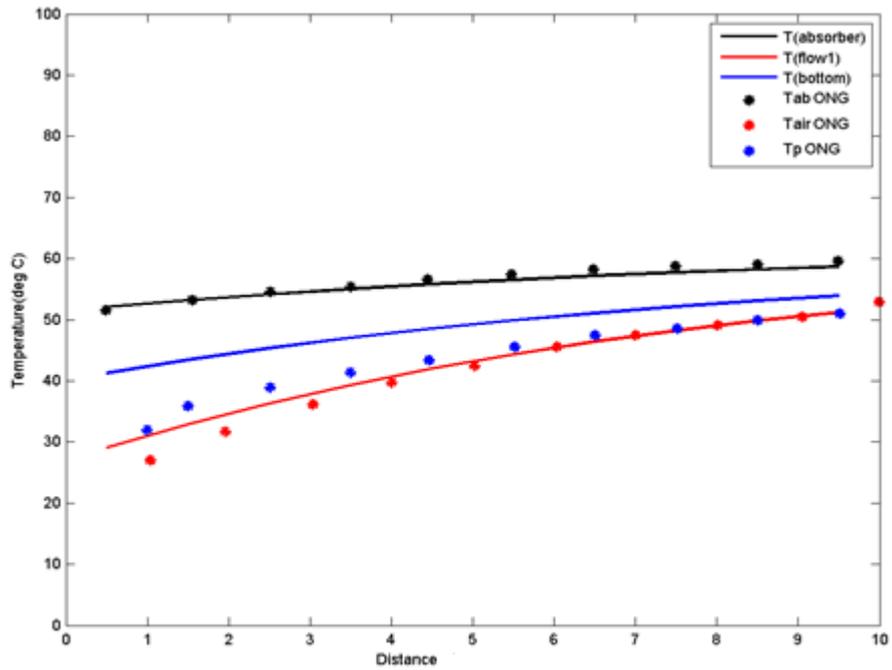


Figure 4.1 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=4000$ pour le capteur 1.

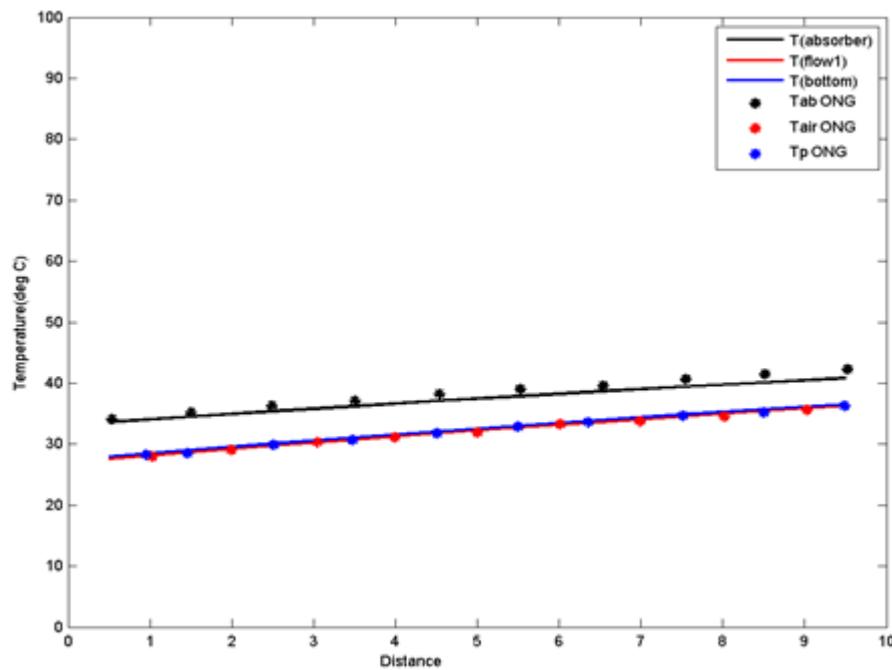


Figure 4.2 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=40000$ pour le capteur 1.

Distance (m)	T (absorbeur) [°C]			T (fluide) [°C]			T (plaque) [°C]		
	Notre modèle	ONG	Erreur (%)	Notre modèle	ONG	Erreur (%)	Notre modèle	ONG	Erreur (%)
1	52.0970	51.532	1.096	29.0327	27.5764	5.281	41.2741	40.9773	0.724
2	53.1725	53.2033	0.058	32.8733	32.0057	2.711	43.4063	43.4637	0.132
3	54.1484	54.5961	0.820	36.2845	36.7123	1.165	45.3180	45.392	0.163
4	55.0296	55.4318	0.726	39.3059	40.0279	1.804	47.0255	46.7586	0.571
5	55.8216	56.546	1.281	41.9752	42.2282	0.599	48.5456	47.5703	2.050
6	56.5303	57.3816	1.484	44.3280	45.2647	2.069	49.8945	49.2181	1.374
7	57.1621	58.2173	1.813	46.3975	46.9078	1.088	51.0880	51.1452	0.112
8	57.7232	58.7744	1.789	48.2144	49.1086	1.821	52.1414	50.5587	3.130
9	58.2201	59.0529	1.410	49.8069	50.4738	1.321	53.0689	51.3966	3.254
10	58.6589	59.61	1.596	51.2006	52.1164	1.757	53.8838	51.676	4.272

Table 4.3 Comparaison des résultats pour Re=4000 (capteur 1).

Distance (m)	T (absorbeur) [°C]			T (fluide) [°C]			T (plaque) [°C]		
	Notre modèle	ONG	Erreur (%)	Notre modèle	ONG	Erreur (%)	Notre modèle	ONG	Erreur (%)
1	33.5997	33.7885	0.559	27.5568	27.2944	0.961	27.9739	26.9415	3.832
2	34.5067	34.8867	1.089	28.6532	29.5188	2.932	29.0504	28.0477	3.575
3	35.386	36.5489	3.182	29.7159	29.775	0.198	30.0936	29.7046	1.310
4	36.2382	37.0831	2.278	30.7458	31.1537	1.309	31.1045	30.8004	0.987
5	37.0642	37.9009	2.208	31.7437	32.2525	1.578	32.0839	31.3343	2.392
6	37.8646	38.9991	2.909	32.7106	32.5063	0.628	33.0328	32.1485	2.751
7	38.6402	40.0973	3.634	33.6474	34.1685	1.525	33.9520	33.8035	0.439
8	39.3916	40.3517	2.379	34.5548	34.7033	0.428	34.8423	34.6196	0.643
9	40.1196	41.4493	3.208	35.4338	36.0844	1.803	35.7046	35.4357	0.759
10	40.8247	42.2658	3.410	36.2851	36.9016	1.671	36.5397	36.5308	0.024

Table 4.4: Comparaison de résultats pour Re=40000 (capteur 1).

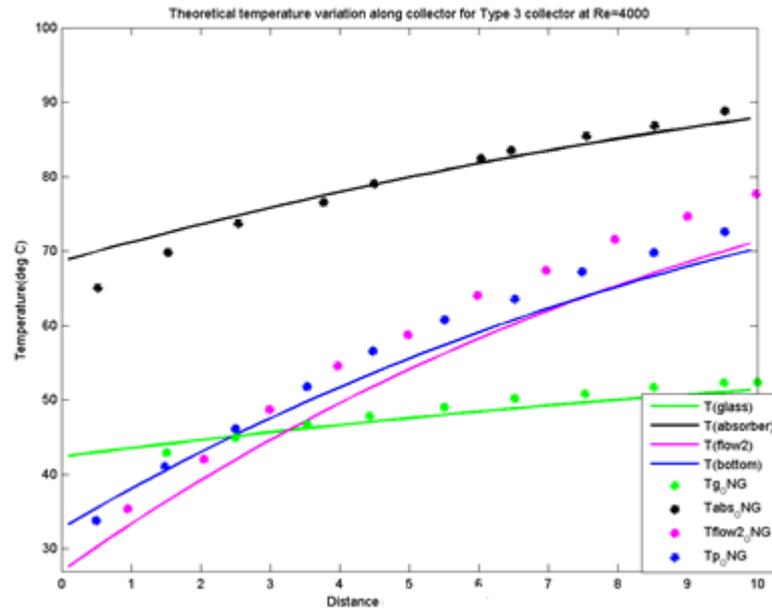


Figure 4.3 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=4000$ pour le capteur 2.

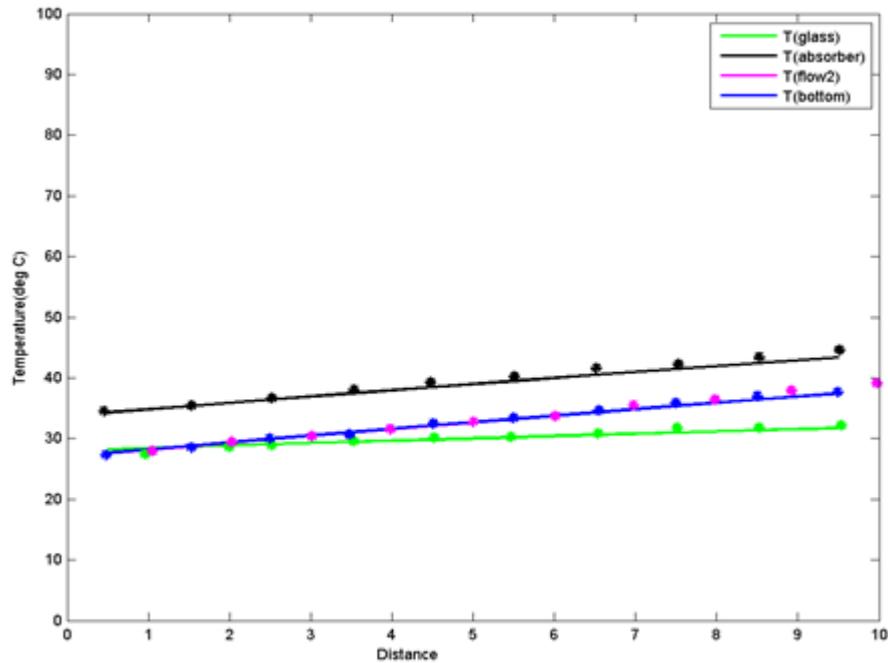


Figure 4.4 Comparaison des résultats avec ONG [14] en considérant $Re=40000$ pour le capteur 2.

Distance(m)	T (vitrage) [°C]			T (absorbeur) [°C]			T (plaque) [°C]		
	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)
1	44.4364	43.575	1.976	73.196	70.416	3.948	36.708	34.9443	5.047
2	45.346	44.413	2.100	75.173	74.114	1.430	41.164	41.1458	0.044
3	46.2206	46.648	0.916	77.06	76.386	0.882	45.330	47.3461	4.258
4	47.0582	47.207	0.315	78.852	79.216	0.460	49.215	48.523	1.426
5	47.8574	48.045	0.390	80.550	82.073	1.855	52.827	52.1509	1.296
6	48.6169	49.441	1.667	82.153	82.969	0.983	56.177	56.1141	0.112
7	49.336	50.279	1.876	83.661	83.837	0.210	59.275	60.6359	2.244
8	50.014	51.117	2.158	85.075	84.423	0.772	62.133	63.2122	1.707
9	50.6506	51.676	1.984	86.396	87.285	1.019	64.760	67.4572	3.998
10	51.2457	52.235	1.893	87.624	89.075	1.629	67.171	69.4675	3.306

Table 4.5 Comparaison de résultats pour Re=4000 (capteur 2).

Distance(m)	T (vitrage) [°C]			T (absorbeur) [°C]			T (plaque) [°C]		
	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)
1	28.2611	28.2541	0.025	34.2729	35.4838	3.413	27.6559	27.1849	1.733
2	28.6535	28.561	0.321	35.3411	36.1251	2.170	28.8027	28.6119	0.667
3	29.0444	29.4688	1.440	36.3946	37.6127	3.239	29.9343	30.0438	0.364
4	29.4333	30.0854	2.167	37.4337	38.8269	3.588	31.0509	30.9106	0.454
5	29.8200	30.1696	1.159	38.4584	39.4238	2.449	32.1523	32.3383	0.575
6	30.2044	30.4785	0.899	39.4688	40.9539	3.626	33.2389	33.2069	0.096
7	30.5861	31.127	1.739	40.4650	42.4435	4.661	34.3105	34.6352	0.937
8	30.9652	32.002	3.240	41.4472	43.933	5.658	35.3674	35.2237	0.408
9	31.3415	32.060	2.242	42.4155	44.297	4.247	36.4097	36.652	0.661
10	31.7148	32.112	1.238	43.3700	45.221	4.093	37.4373	38.0815	1.692

Table 4.6 Comparaison de résultats pour Re=40000 (capteur 2).

Distance (m)	T (fluide) [°C] Re=4000			T (fluide) [°C] Re=40000		
	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)	Notre Modèle	ONG	Erreur (%)
1	29.897	30.7387	2.738	27.5829	27.689	0.383
2	35.487	36.345	2.361	28.7411	29.4663	2.461
3	40.680	41.384	1.701	29.8839	30.9563	3.464
4	45.491	45.0368	1.009	31.0114	31.6049	1.878
5	49.938	50.9335	1.955	32.1237	33.093	2.929
6	54.039	54.3032	0.487	33.2209	33.7528	1.576
7	57.813	58.2329	0.721	34.3031	34.9611	1.882
8	61.277	62.4493	1.877	35.3704	36.7346	3.714
9	64.451	65.261	1.241	36.4228	37.6686	3.307
10	67.353	68.6357	1.869	37.4605	38.5878	2.921

Table 4.7 Comparaison entre des températures de fluide pour le capteur 2.

Les figures 4.1 jusqu'à 4.4 ainsi que les tableaux 4.4 jusqu'à 4.8 présentent une comparaison des résultats de notre modèle avec celles obtenues par ONG [14]. Ces résultats sont en bonne concordance avec les résultats d'ONG pour les deux types de capteurs avec une erreur relative qui ne dépasse pas 5 %.

2. L'effet du CPC :

Afin d'étudier le comportement journalier de capteur solaire plan à air en présence et en absence du concentrateur parabolique composé (CPC), on a choisi les mêmes paramètres optiques des capteurs utilisées dans la partie validation en considérant le gisement solaire de Tlemcen, où les paramètres thermiques/géométriques des capteurs et les paramètres géométriques/optiques du CPC sont présentés dans les deux tableaux suivants :

	Vitrage	Couverture de CPC	Absorbeur	Plaque
<i>L</i>	2	2	2	2
<i>ρ</i>	2500	2500	8960	7850
<i>C_p</i>	720	720	380	500
<i>e</i>	0.005	0.005	0.005	0.005

Table 4.8 Propriétés Thermo-physiques et radiatives des capteurs [14].

Paramètres géométriques et optiques du CPC	
Angle d'acceptance ($2\theta_c$)	39°
Surface du CPC	1.5240 m ²
Coefficient de la concentration (Ca)	3
Largeur du CPC (W_c)	0.7620 m
Largeur du récepteur (W)	0.2540 m
Ligne focale du réflecteur (F)	1.0160 m
Réfectivité de miroir (ρ_m)	0.86

Table 4.9 Paramètres géométriques et optiques du CPC

Pour montrer l'effet de concentrateur sur le rayonnement reçu par les deux capteurs 1 et 2, on a choisi de tracer les rayonnements reçus par l'absorbeur pour trois cas : capteur sans CPC, capteur avec CPC non vitré et capteur avec CPC vitré. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes :

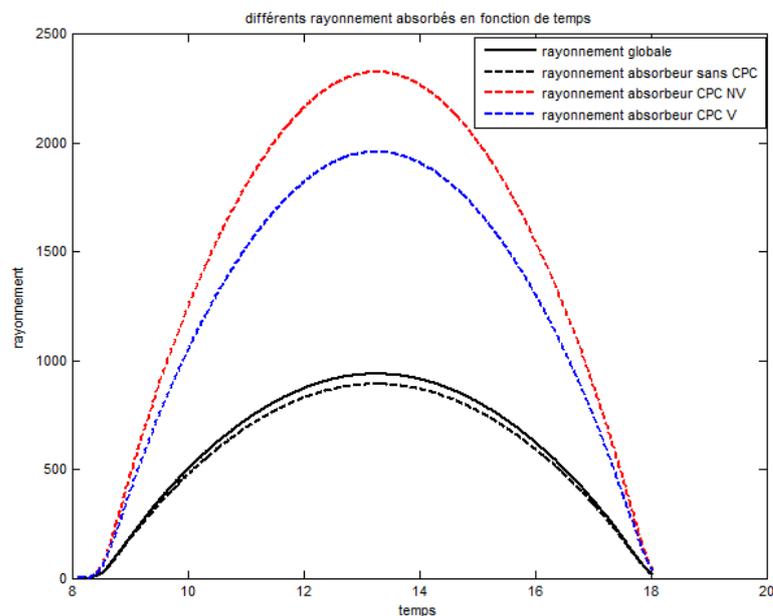


Figure 4.5 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (1) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (17 janvier).

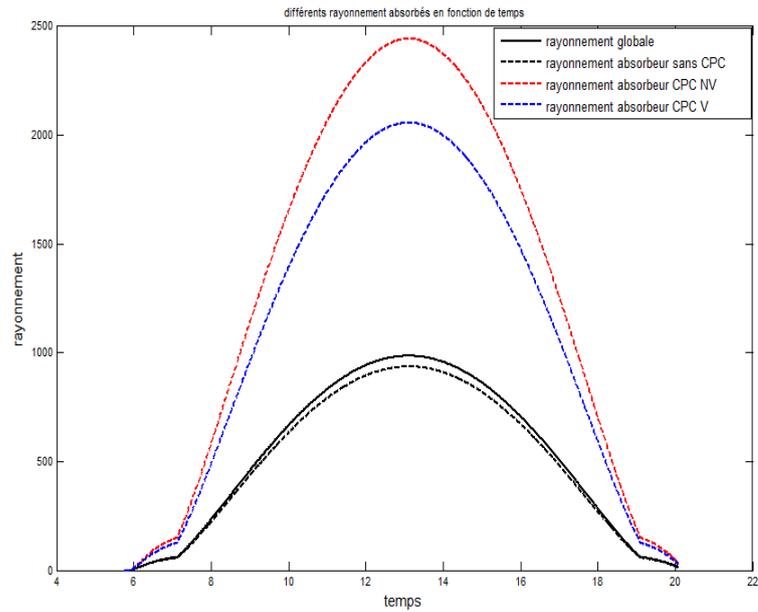


Figure 4.6 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (1) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (21 juin).

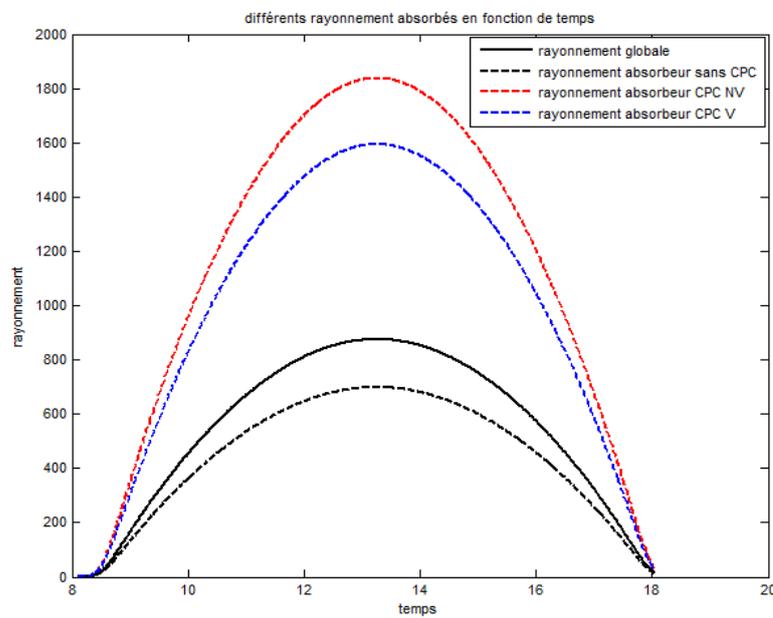


Figure 4.7 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (2) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (17 Janvier).

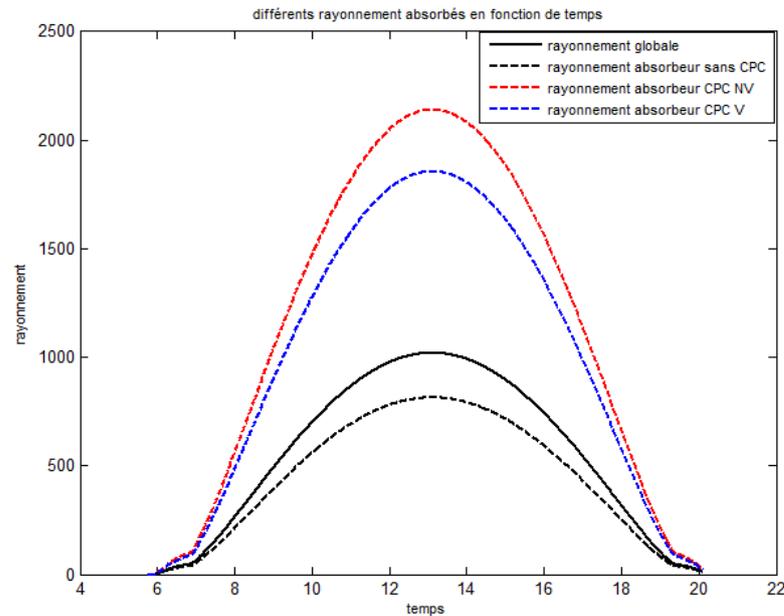


Figure 4.8 Comportement de rayonnement journalier absorbé au niveau de l'absorbeur pour les trois cas du capteur (2) : sans CPC, avec CPC non vitré et avec CPC vitré (21 juin).

		Capteur 1			Capteur 2		
		Sans CPC	Avec CPC V	Avec CPC NV	Sans CPC	Avec CPC V	Avec CPC NV
21 Juin	$H(\max) \text{ w/m}^2$	1019.602					
	$S_{abs}(\max) \text{ w/m}^2$	968.622	2129.289	2528.547	813.629	1855.950	2139.874
17 Janvier	$H(\max) \text{ w/m}^2$	875.510					
	$S_{abs}(\max) \text{ w/m}^2$	831.734	1828.374	2171.207	698.707	1593.802	1837.624

Table 4.10 Comparaison des rayonnements reçus par l'absorbeur en absence et présence de CPC pour les deux capteurs 1 et 2.

Les figures 4.5 jusqu'à 4.8 montrent l'évolution temporelle de rayonnement reçu par l'absorbeur, de lever de soleil au coucher de soleil pour deux journées types (21 juin et 17 janvier), dans le cas de présence et en absence du CPC. On remarque que le rayonnement intercepté par l'absorbeur s'amplifie considérablement en présence de CPC soit dans le cas de CPC vitré ou sans vitre, à cause de : l'augmentation de surface réceptrice de rayonnement direct d'une part, et de phénomène de réflexion de rayonnement par les deux réflecteurs paraboliques d'autre part. On remarque aussi que la présence de vitrage soit dans les capteurs 1 ou 2 peut diminuer le rayonnement intercepté au niveau d'absorbeur à cause de la partie absorbée par vitre. La comparaison des résultats à travers le tableau 4.10 montre que le capteur 1, qui est constitué d'un nombre inférieur des vitres, reçoit un flux important de rayonnement niveau d'absorbeur par rapport au capteur 2, pour les journées de fort ensoleillement.

Les comportements journaliers de la température de sortie dans chaque capteur 1 et 2 pour chaque cas (sans CPC, avec CPC vitré, avec CPC non vitré) en considérant le jour de **21 Juin** sont présentés dans les figures suivantes :

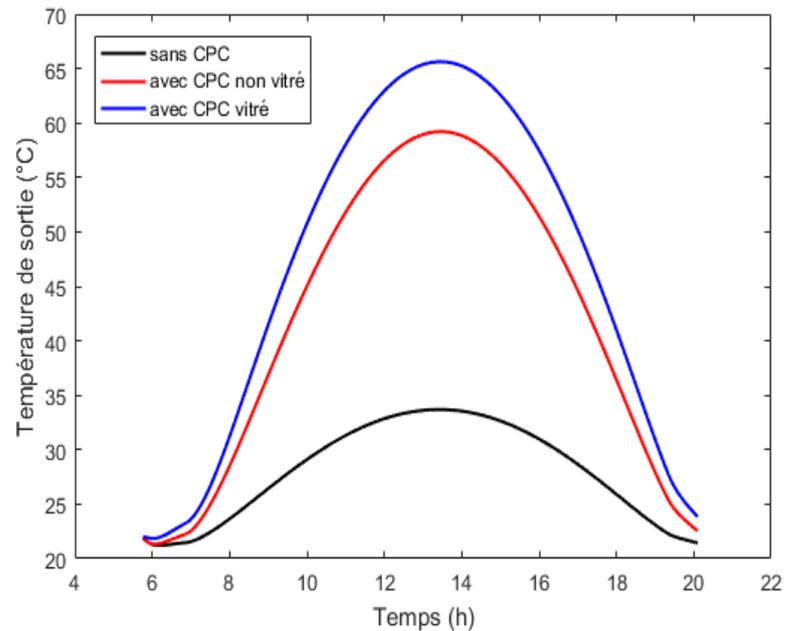


Figure 4.9 Comportement journalier de la température de sortie durant la journée de 21 Juin pour $Ca=3$ (capteur 1)

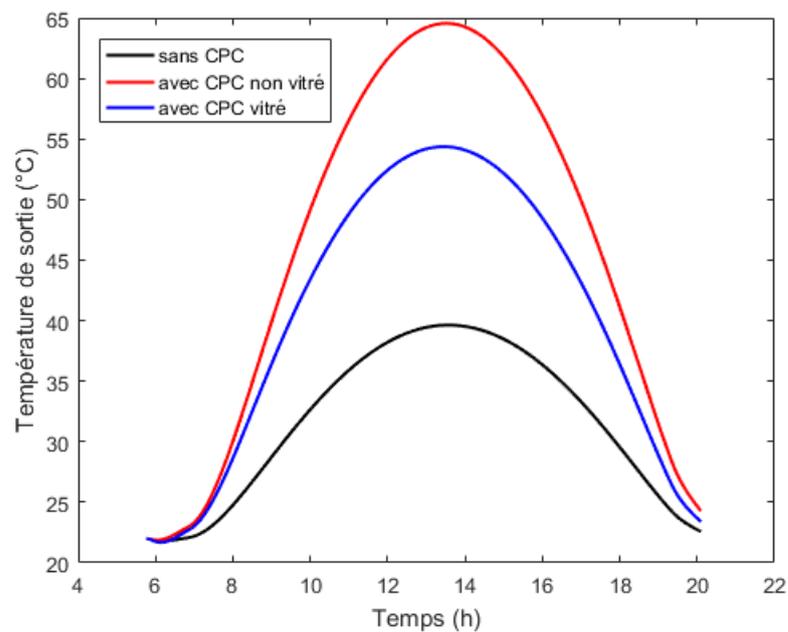


Figure 4.10 Comportement journalier de la température de sortie durant la journée de 21 Juin pour $Ca=3$ (capteur 2)

		Capteur 1			Capteur 2		
		Sans CPC	Avec CPC V	Avec CPC NV	Sans CPC	Avec CPC V	Avec CPC NV
21 Juin Ta=22 °C	$H(\max) \text{ w/m}^2$	1019.586					
	$T_{sf}(\max) \text{ °C}$	33.689	65.622	59.205	39.632	54.364	64.549

Table 4.11 Valeurs des températures maximales pour le : 21 juin.

Les figures 4.9 et 4.10 présentées ci-dessus montrent la variation temporelle de la température de sortie d'air pour différentes cas (sans CPC, avec CPC vitré et avec CPC non vitré) pour le 21 juin. A partir de ces résultats, on constate que la température augmente avec l'augmentation de rayonnement jusqu'à une valeur maximale qui correspond au rayonnement maximal, et diminue avec sa diminution. On remarque aussi que l'introduction du CPC apporte une amélioration importante de la température de sortie dans tous les capteurs comme était prévu, en raison de la capacité du CPC à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de ces réflecteurs paraboliques.

A partir le tableau 4.11, on remarque que l'introduction du CPC vitré apporte une amélioration considérable et meilleur par rapport au CPC non vitré pour le capteur 1. Cependant, pour le capteur 2, on remarque que le CPC non vitré apporte une amélioration meilleur par rapport au CPC vitré à cause d'existence de deux vitres qui diminue considérablement le rayonnement transmet vers l'absorbeur.

Ainsi, à partir de ses résultats on constate que notre modèle conduit à une bonne estimation des températures du fluide caloporteur.

3. Etude paramétrique :

L'introduction de CPC dans un capteur solaire plan est souvent utilisée pour augmenter la puissance solaire reçue par unité de surface du capteur, et augmenter la température à la sortie par conséquent. Deux configurations de CPC peuvent être attachées au capteur : CPC avec couverture (vitre) et CPC non vitré. Pour montrer l'effet amélioratif des deux types de CPC, on a choisi trois (03) paramètres de contrôle : coefficient de concentration (Ca), débit massique (m_f), et profondeur de canal d'air (t) ; pour voir leurs influence en **régime instationnaire** sur la température de sortie, le rendement thermique, les pertes thermiques globales, la perte de charge et le rendement effectif des deux capteurs 1 et 2.

Les résultats sont obtenus en considérant la journée de **21 Juin à 12h :00**, où ils sont comparées à chaque fois pour les deux cas (CPC vitré et CPC non vitré) à travers des courbes et des tableaux, en utilisant la même Longueur du capteur ($L = 2m$). La température d'entrée d'air est considérée $T_{fe} = Ta = 22^\circ\text{C}$. Le débit massique est $m_f = 0.01 \text{ kg/s}$.

3.1. Influence de coefficient de concentration (Ca):

Pour étudier l'influence coefficient de concentration sur les performances thermiques des deux capteurs pour les deux cas (avec CPC vitré et avec CPC non vitré), nous avons choisi un intervalle de [1.5– 10]. Les résultats sont comme suivants :

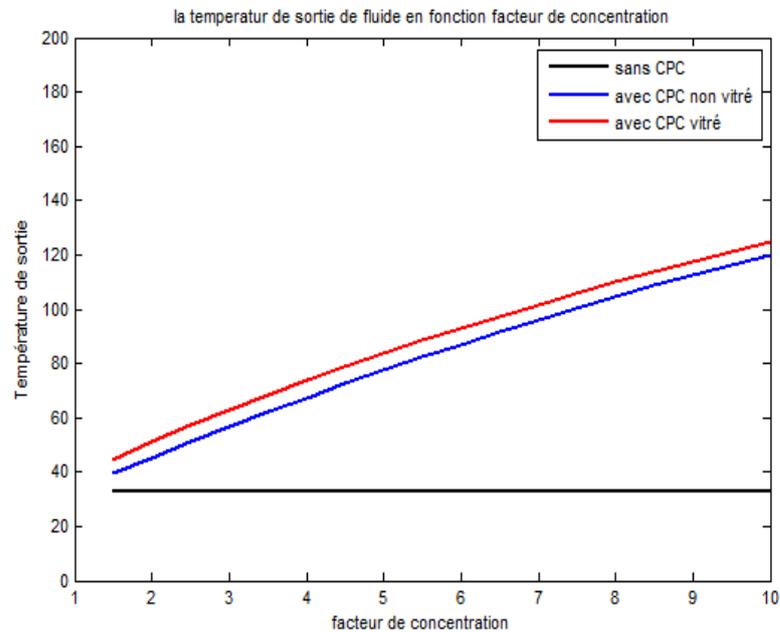


Figure 4.11 Influence de coefficient de concentration sur la température de sortie du fluide pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

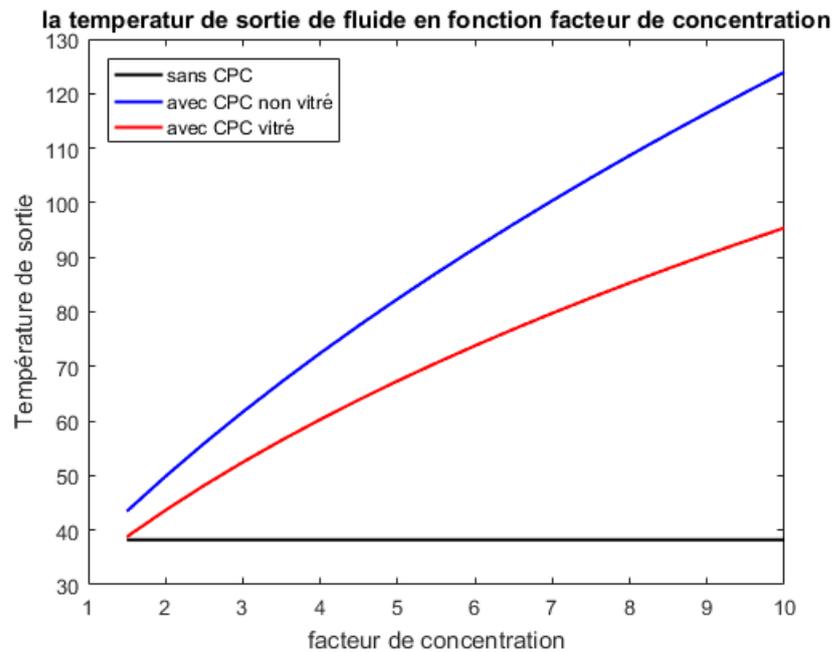


Figure 4.12 Influence de coefficient de concentration sur la température de sortie du fluide pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

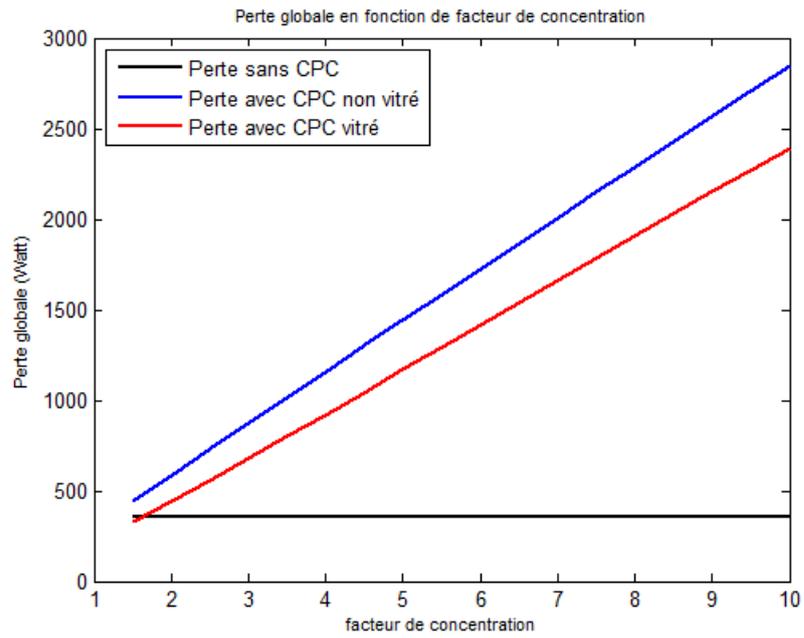


Figure 4.13 Influence de coefficient de concentration sur les pertes thermiques globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00.

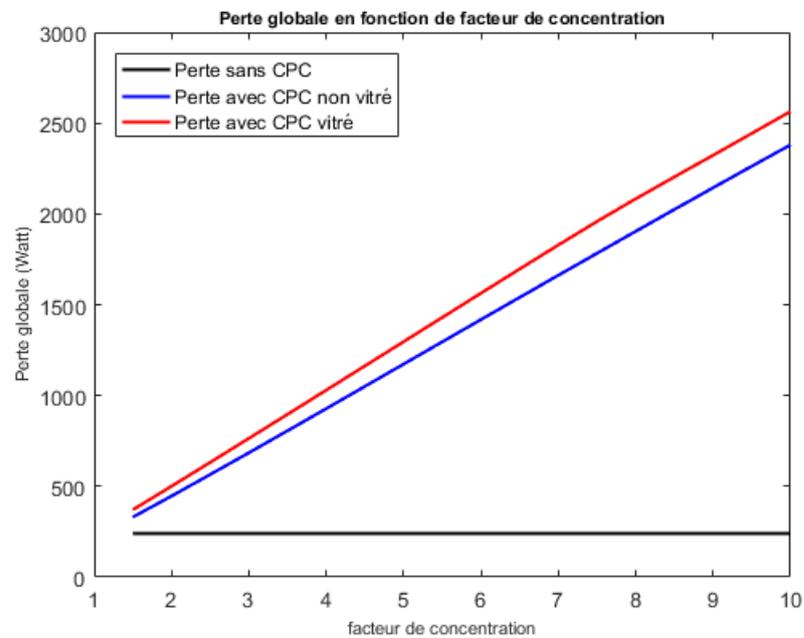


Figure 4.14 Influence de coefficient de concentration sur les pertes thermiques globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00.

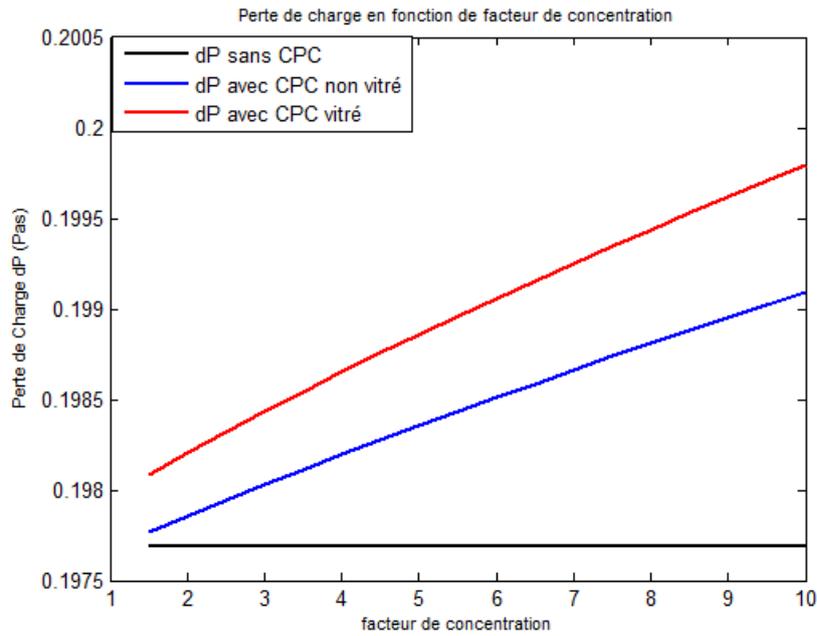


Figure 4.15 Influence de coefficient de concentration sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

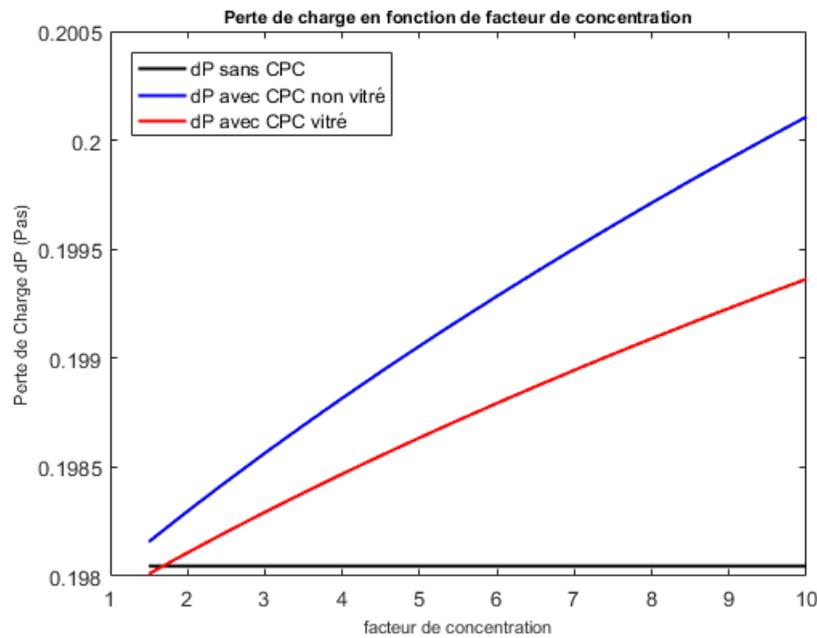


Figure 4.16 Influence de coefficient de concentration sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

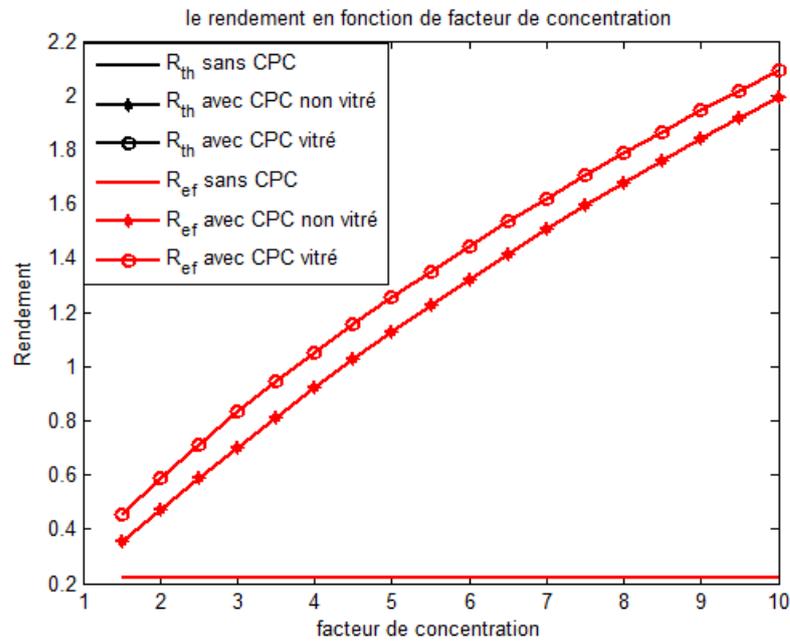


Figure 4.17 Influence de coefficient de concentration sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

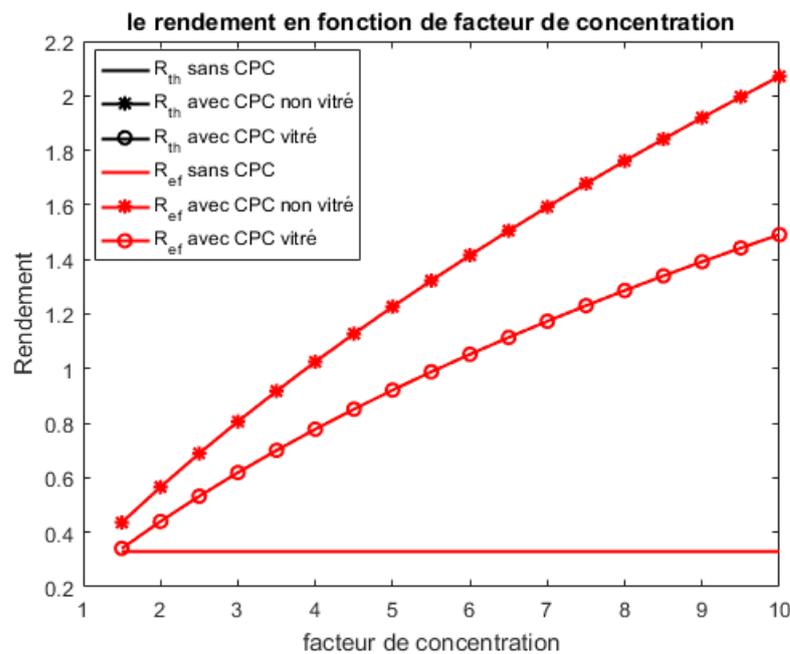


Figure 4.68 Influence de coefficient de concentration sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

$T_{fe}=T_a=22\text{ °C}$ $L=2\text{ m}$ $m_f=0.01\text{ kg/s}$ $t=0.0254\text{ m}$	Facteur de concentration (Ca)	Capteur type 1			Capteur type 2		
		Sans CPC	CPC non vitré	Avec CPC vitré	Sans CPC	CPC non vitré	Avec CPC vitré
$T_{fs}\text{ (°C)}$	4.5	32.867	72.454	78.944	38.242	77.504	63.898
	7	32.867	96.038	101.756	38.242	100.394	79.765
	9	32.867	112.603	117.626	38.242	116.478	90.504
$Q_{perte}\text{ (watts)}$	4.5	352.495	1300.265	1043.547	240.122	1050.608	1163.165
	7	352.495	2008.660	1660.524	240.122	1662.324	1829.089
	9	352.495	2567.559	2150.120	240.122	2144.280	2323.179
η_{th}	4.5	0.2207	1.0250	1.1569	0.3300	1.1277	0.8513
	7	0.2207	1.5041	1.6203	0.3300	1.5928	1.1737
	9	0.2207	1.8406	1.9427	0.3300	1.9196	1.3918
$\Delta P\text{ (Pas)}$	4.5	0.1977	0.1983	0.1988	0.1980	0.1989	0.1986
	7	0.1977	0.1987	0.1993	0.1980	0.1995	0.1989
	9	0.1977	0.1990	0.1996	0.1980	0.1999	0.1992
η_{eff}	4.5	0.2207	1.0250	1.1569	0.3300	1.1277	0.8512
	7	0.2207	1.5041	1.6203	0.3300	1.5928	1.1736
	9	0.2207	1.8406	1.9427	0.3300	1.9196	1.3918

Table 4.12 Influence de coefficient de concentration sur les performances des deux capteurs 1, 2 dans le cas de présence et d'absence de CPC.

Les figures 4.11 jusqu'à 4.18 montrent l'effet de coefficient de concentration sur la température de sortie de fluide, les pertes thermiques globales, le rendement thermique, le rendement effectif et la perte de charge.

On peut remarquer que l'augmentation de coefficient de concentration provoque une augmentation importante de température de sortie en présence de CPC soit vitré ou non vitré dans le cas des deux capteurs 1 et 2, vue de l'augmentation de rayonnement concentré reçus au niveau d'absorbeur, à travers les deux réflecteurs paraboliques.

On remarque aussi que la perte thermique globale vers l'extérieur augmente avec l'augmentation de coefficient de concentration à cause d'augmentation des températures des composantes de capteur par rapport à la température ambiante, en présence de CPC dans tous les cas.

En parallèle, elle provoque une augmentation considérable des deux rendements thermique et effectif, à cause d'augmentation de température de sortie, qui augmente considérablement l'énergie thermique transporté par l'air. On remarque aussi qu'il y a une augmentation légère des pertes de charges.

Il est bien remarqué aussi d'après le tableau 4.12, que le capteur 2 avec CPC vitré présente des performances inférieures par rapport au cas non vitré, ainsi par rapport au capteur 1 en présence de CPC soit vitré ou non vitré, à cause de nombre des vitres qui présentent des résistances aux rayonnement concentrés transmis à l'absorbeur et diminuent le rayonnement absorbé par conséquent. Alors on peut constater que l'utilisation de couverture de CPC est inutile dans le cas de capteur 2 où il y a deux cavités fermés vitrés.

3.2. Influence du débit massique :

Pour étudier l'influence du débit massique sur les performances thermiques des deux capteurs pour les trois cas (sans CPC, avec CPC vitré et avec CPC non vitré), nous avons choisi un intervalle de débit $m_f = [0.01 - 0.2] \text{ kg/s}$ qui correspond à un intervalle de Reynolds $Re = [3627 - 72532]$ qui commence d'un régime transitoire et se termine par un régime pleinement turbulent. La longueur de capteur et la profondeur de canal sont respectivement $L = 2 \text{ m}$ et $t_1 = t_2 = 0.0254 \text{ m}$.

Les résultats sont obtenus en considérant la journée de 21 Juin à 12h :00 où ils ont comme suivants :

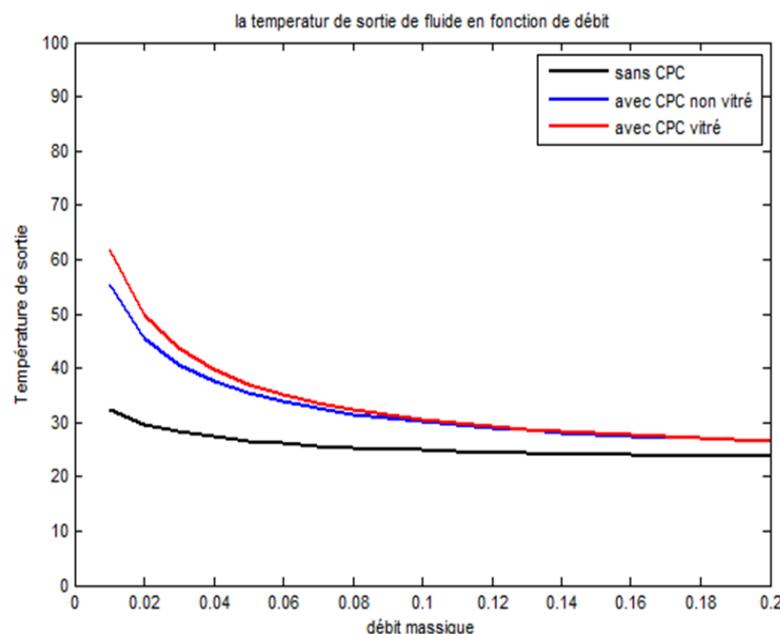


Figure 4.19 Influence du débit sur la température de sortie du fluide pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

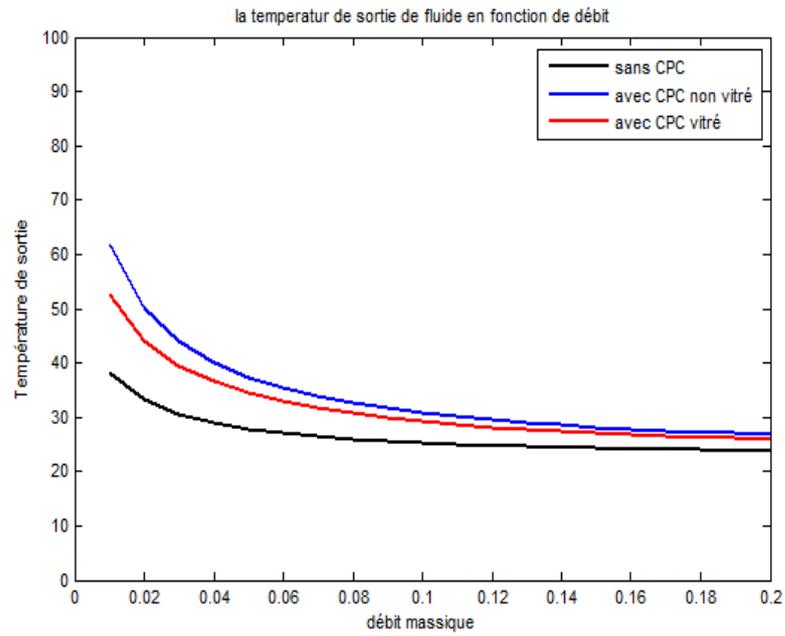


Figure 4.20 Influence du débit sur la température de sortie du fluide pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

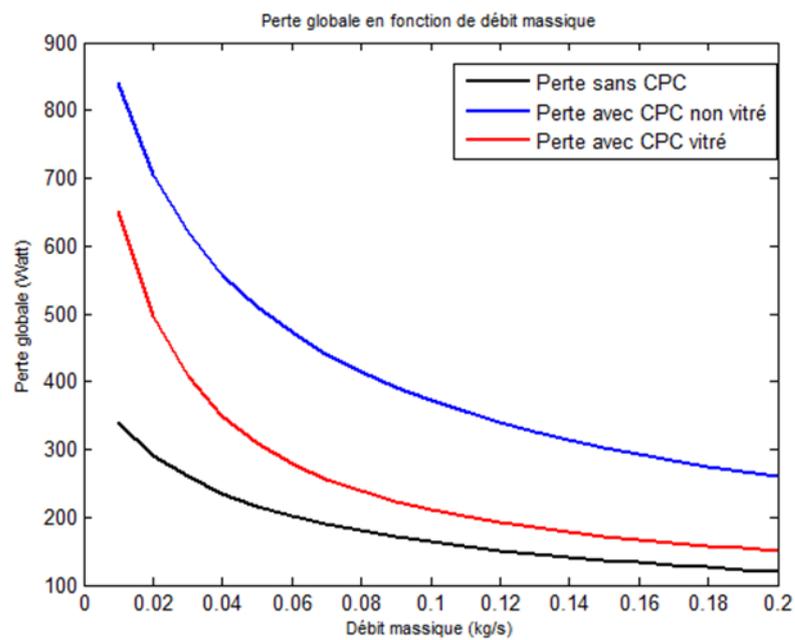


Figure 4.21 Influence du débit sur les pertes globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

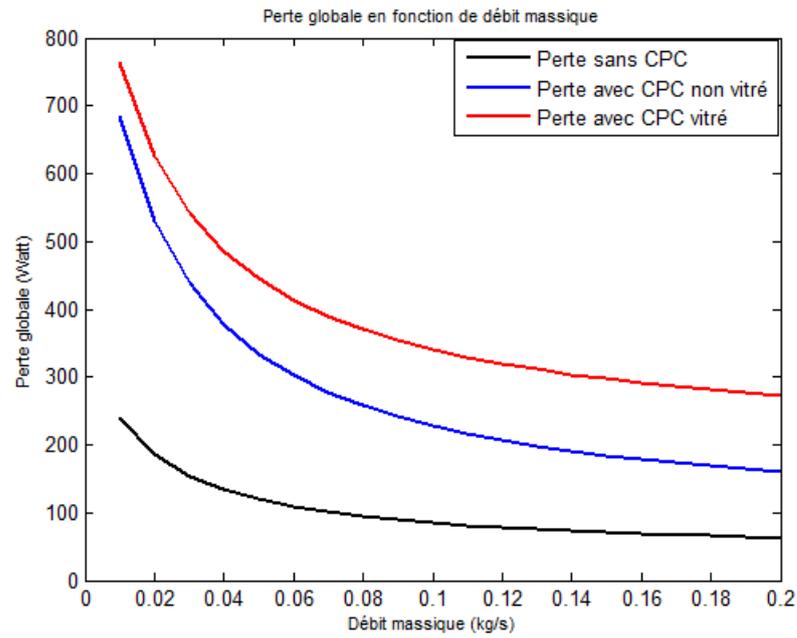


Figure 4.22 Influence du débit sur les pertes globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

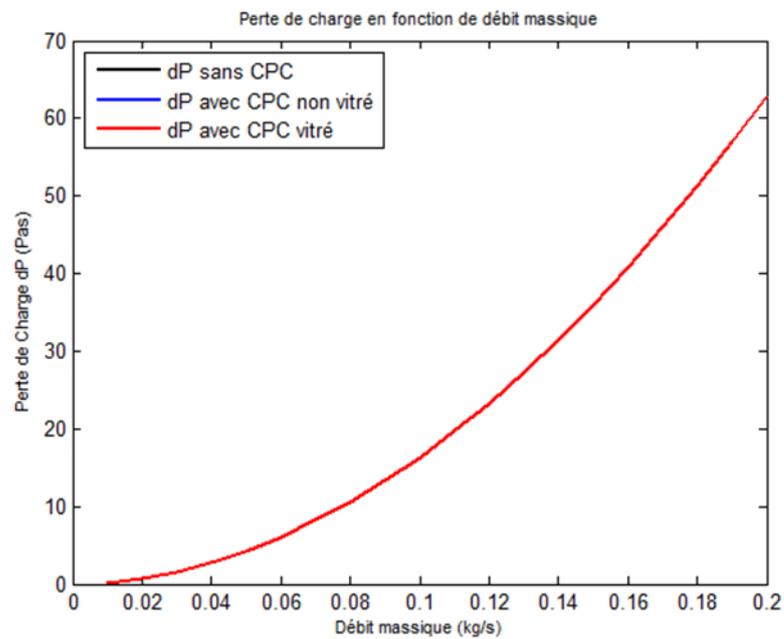


Figure 4.23 Influence du débit sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

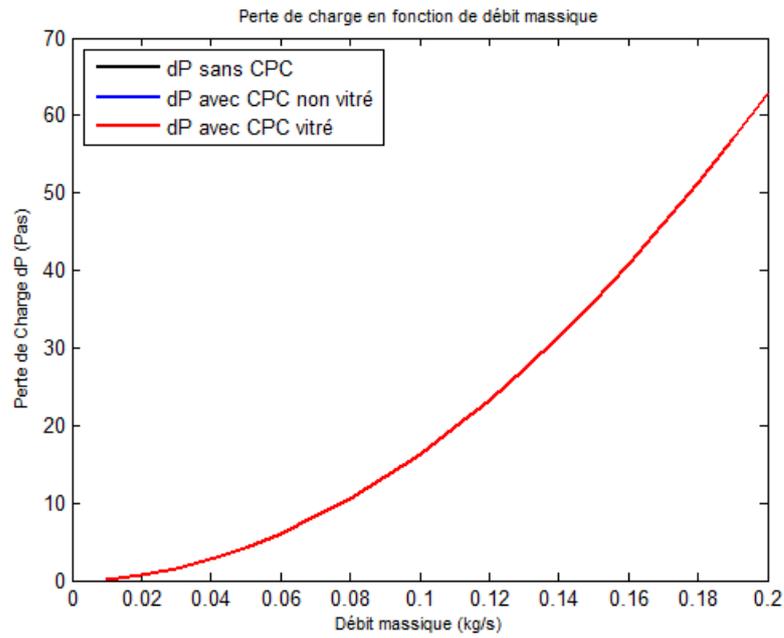


Figure 4.24 Influence du débit sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h :00

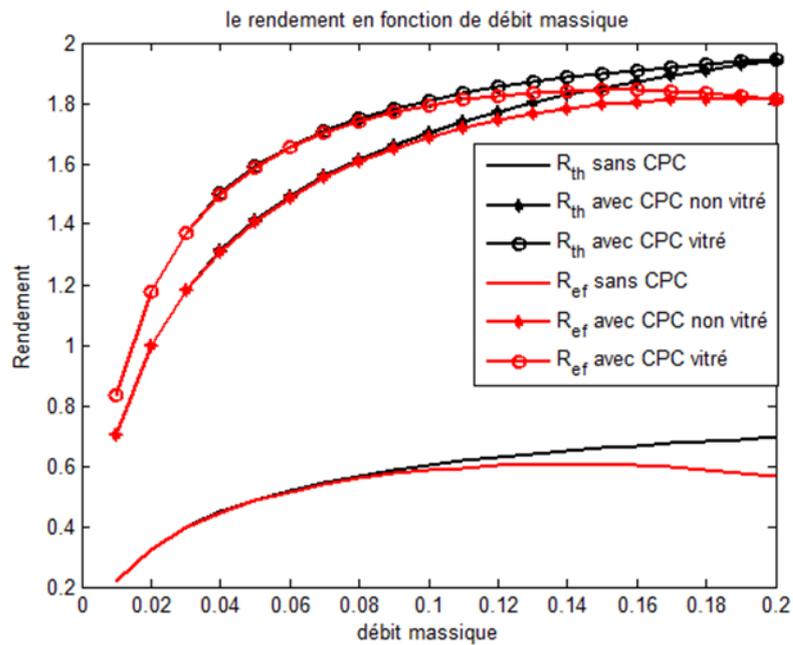


Figure 4.25 Influence du débit sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h :00

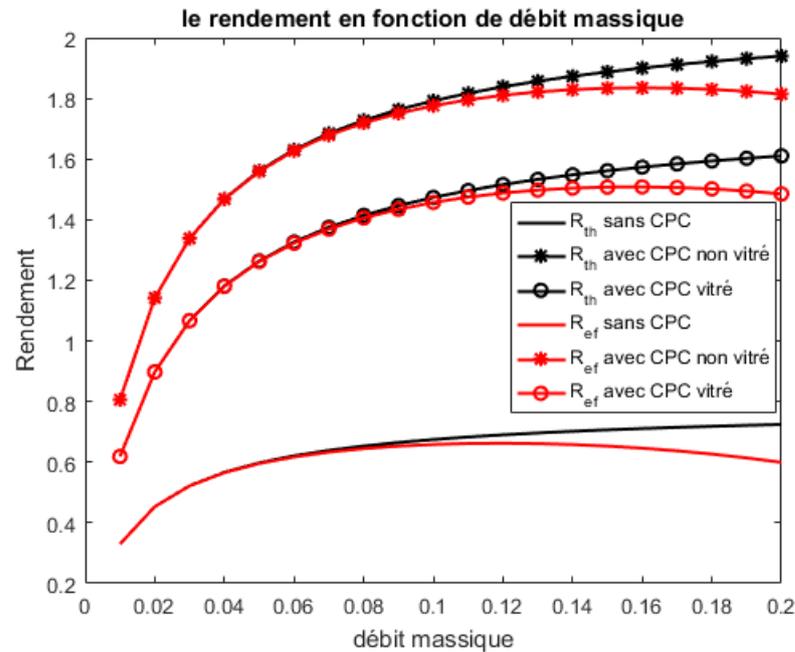


Figure 4.26 Influence du débit sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.

D'après les figures 4.19 jusqu'à 4.26, on remarque que l'augmentation de débit massique provoque une diminution de température de sortie et des pertes thermiques globales vers l'extérieur, pour les deux capteurs 1 et 2, soit en présence ou en absence de CPC, vue de la diminution de temps de séjour d'air au sein de capteur.

En parallèle, elle provoque une augmentation des deux rendements thermique et effectif à cause de rapport d'augmentation de la masse qui augmente considérablement l'énergie thermique transporté par l'air. On remarque aussi qu'il y a une différence importante entre les deux rendements thermiques et effectifs, à cause des pertes de charges importantes provoquées par les grands débits.

Il est bien remarqué aussi d'après le tableau 4.13, que la présence de CPC soit vitré ou non vitré améliore considérablement les performances des deux capteurs 1 et 2. On confirme aussi que le capteur 2 avec CPC vitré présente toujours des performances minimales par rapports aux cas non vitré, à cause de diminution de rayonnements concentrés transmis vers l'absorbeur à travers les deux cavités fermées et vitrées.

$T_{fe}=T_a=22\text{ °C}$ $L=2\text{ m}$ $Ca=3$ $t=0.0254\text{ m}$	Débit massique (kg/s)	Capteur type 1			Capteur type 2		
		Sans CPC	CPC non vitré	Avec CPC vitré	Sans CPC	CPC non vitré	Avec CPC vitré
$T_{fs}\text{ (°C)}$	0.02	30.057	46.538	50.874	33.158	50.096	44.093
	0.07	25.849	32.970	34.003	26.492	33.844	31.667
	0.12	24.590	29.277	29.598	24.831	29.539	28.217
$Q_{perte}\text{ (watts)}$	0.02	302.045	731.466	517.689	184.923	528.934	626.673
	0.07	196.214	457.375	267.364	101.593	277.734	389.344
	0.12	155.505	351.886	199.663	78.435	207.073	319.621
η_{th}	0.02	0.3274	0.9970	1.1732	0.4534	1.1417	0.8978
	0.07	0.5474	1.5602	1.7071	0.6390	1.6845	1.3749
	0.12	0.6316	1.7743	1.8524	0.6903	1.8383	1.5158
$\Delta P\text{ (Pas)}$	0.02	0.7380	0.7386	0.7395	0.7387	0.7397	0.7392
	0.07	8.1933	8.1953	8.1986	8.1965	8.1989	8.1980
	0.12	23.3057	23.3090	23.3149	23.3117	23.3152	23.3139
η_{eff}	0.02	0.3272	0.9969	1.1731	0.4533	1.1416	0.8976
	0.07	0.5417	1.5544	1.7013	0.6332	1.6787	1.3691
	0.12	0.6037	1.7463	1.8244	0.6625	1.8103	1.4879

Table 4.13 Influence de débit massique sur les performances des deux capteurs 1, 2 dans le cas de présence et d'absence de CPC.

3.3. Influence de profondeur de canal :

Pour montrer l'influence de la profondeur de passage d'air sur les performances des deux capteurs 1 et 2, soit en présence ou en absence de CPC, on a choisi un intervalle $t_1 = t_2 = [0.001 - 0.02]$ (m) avec un débit massique $m_f = 0.01 \left(\frac{kg}{s}\right)$ et une longueur $L = 2\text{ m}$.

Pour expliquer l'effet de profondeur de canal sur le comportement de la température de sortie de fluide, on a tracé aussi l'évolution de Nusselt moyen à la sortie de capteur en fonction de profondeur.

Les résultats sont présentés dans les figures suivantes, en considérant la journée de 21 juin à 12h :00.

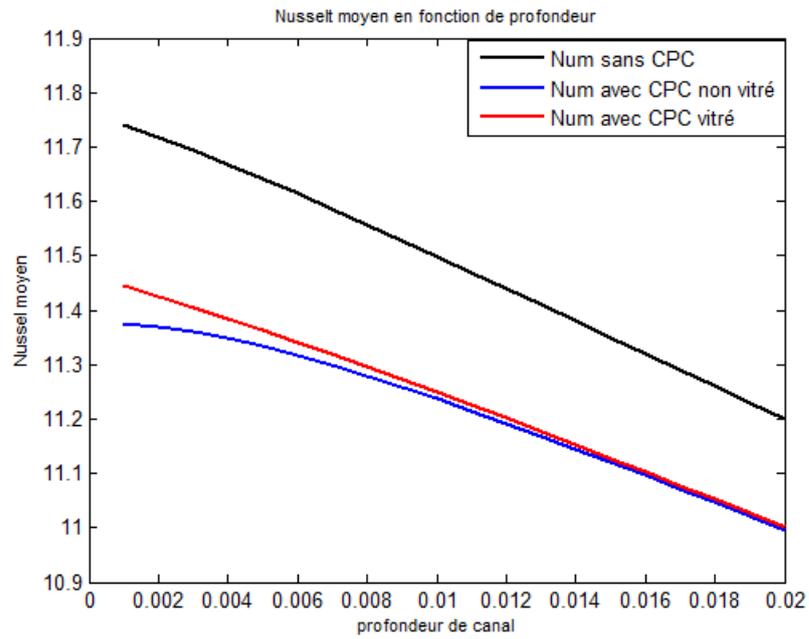


Figure 4.27 Influence de la profondeur sur le Nusselt moyen pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.

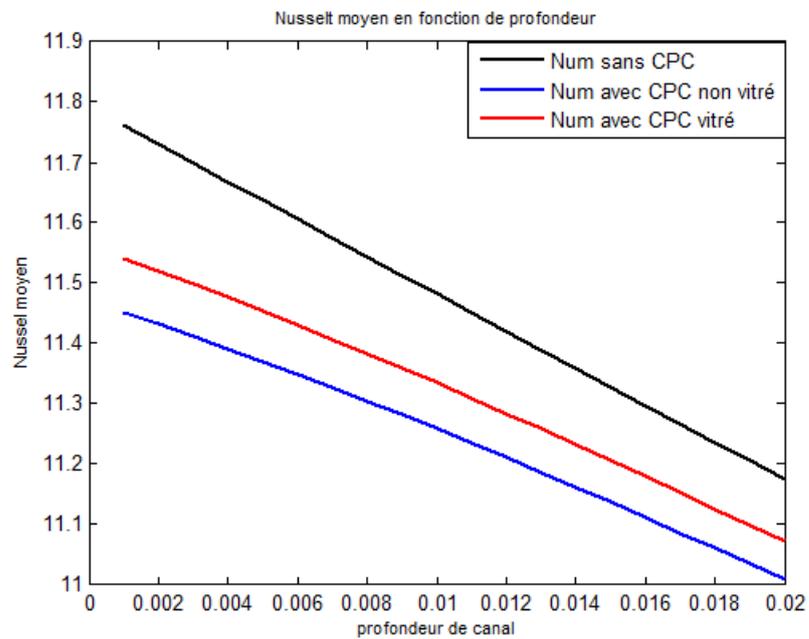


Figure 4.28 Influence de la profondeur sur le Nusselt moyen pour le capteur 2 le le 21 Juin à 12h:00.

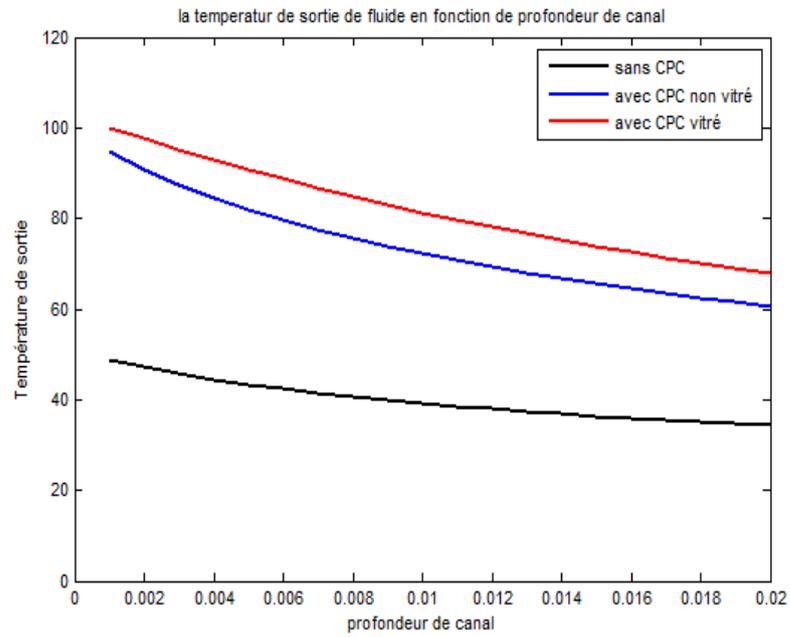


Figure 4.29 Influence de la profondeur sur la température de sortie pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.

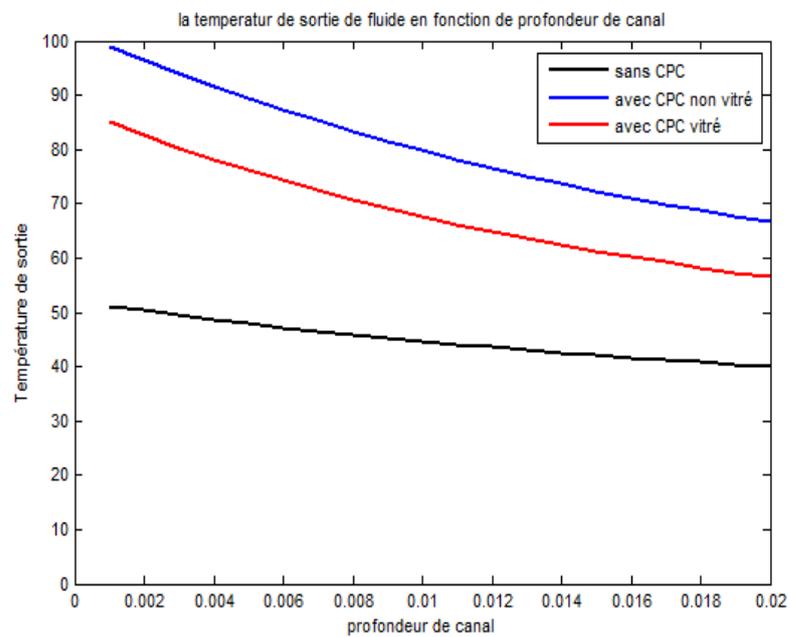


Figure 4.30 Influence de la profondeur sur la température de sortie pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.

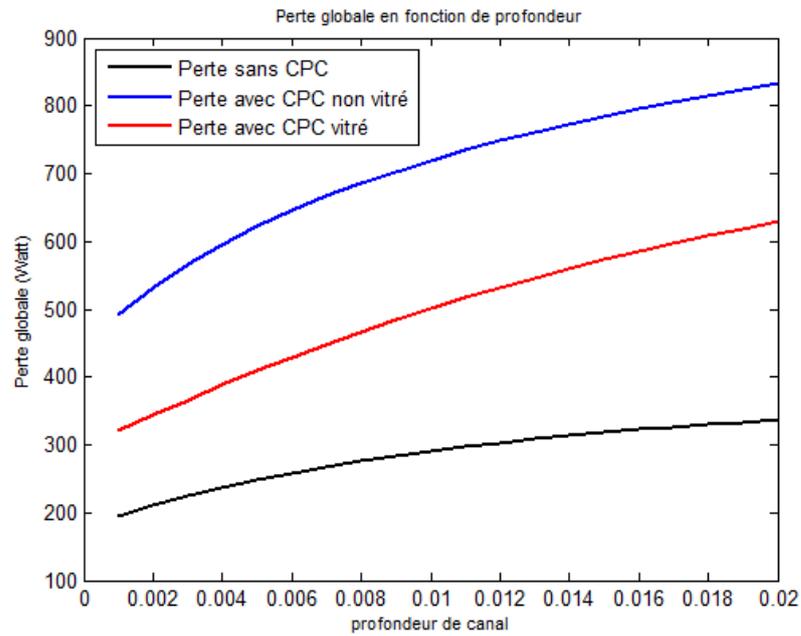


Figure 4.31 Influence de la profondeur sur les pertes thermiques globales pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.

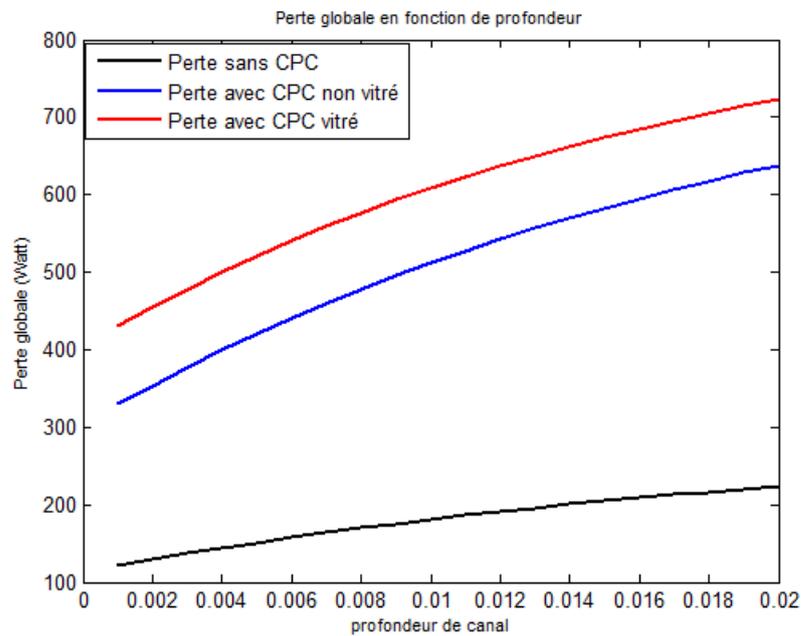


Figure 4.32 Influence de la profondeur sur les pertes thermiques globales pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.

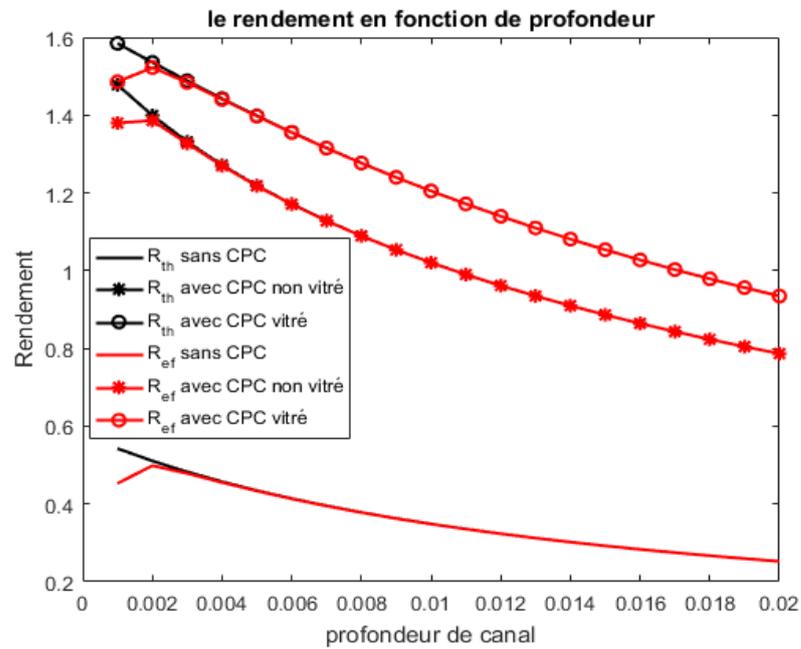


Figure 4.33 Influence de la profondeur sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.

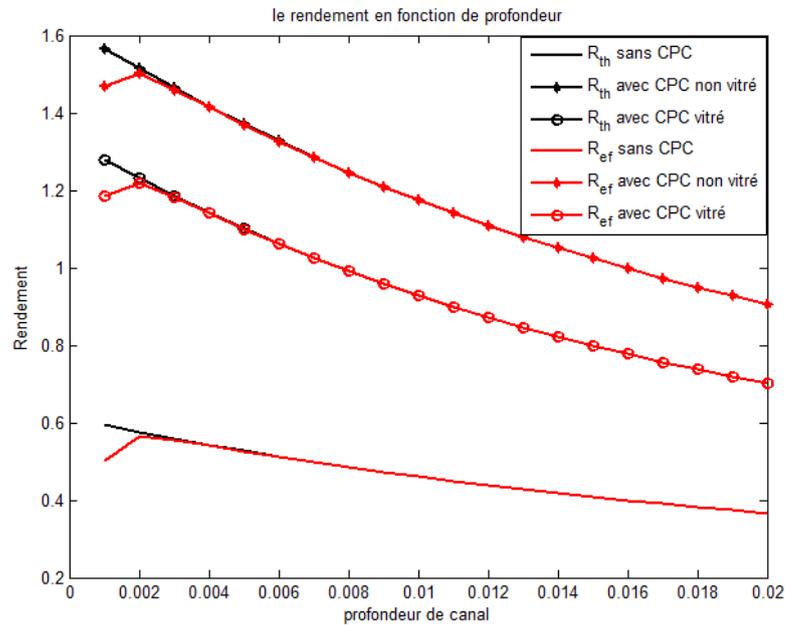


Figure 4.34 Influence de la profondeur sur le rendement thermique et effectif pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.

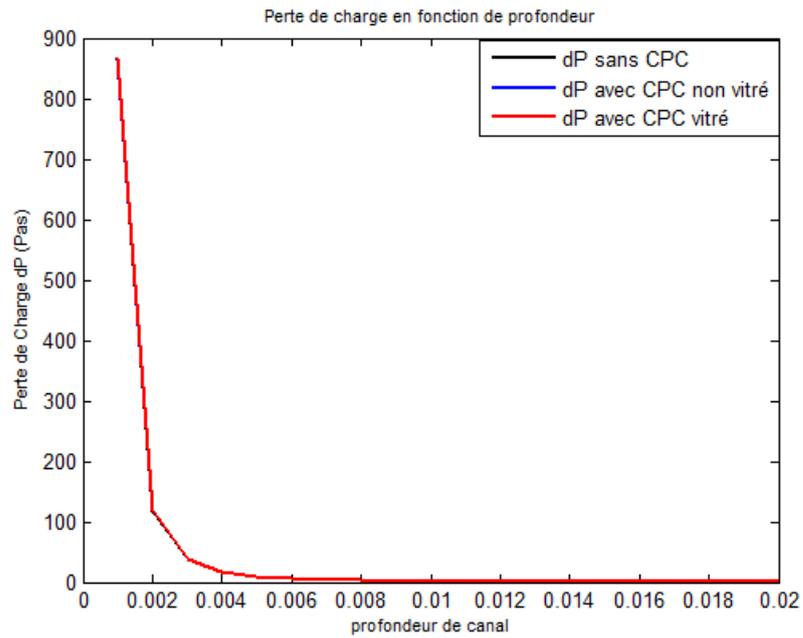


Figure 4.35 Influence de la profondeur sur les pertes de charges pour le capteur 1 le 21 Juin à 12h:00.

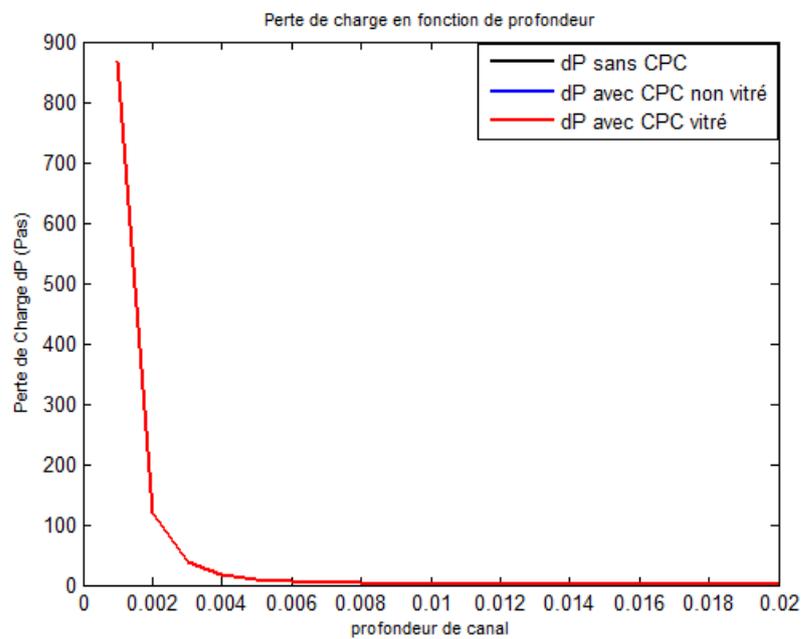


Figure 4.36 Influence de la profondeur sur les pertes de charges pour le capteur 2 le 21 Juin à 12h:00.

D'après les figures 4.27 jusqu'à 4.34, on remarque que l'augmentation de la profondeur de canal provoque une diminution de température de sortie d'air à cause de la diminution de Nusselt moyen qui exprime l'intensité de transfert de chaleur fluide/absorbeur pour les deux capteurs 1 et 2 soit avec ou sans CPC. La diminution de Nombre de Nusselt peut s'expliquer par la diminution de la masse de fluide en contact avec l'absorbeur due à l'augmentation de profondeur de canal.

Il est bien remarqué aussi, qu'il y a une diminution des deux rendements thermique et effectif à cause de la diminution de la température de sortie. On remarque aussi que le rendement thermique est supérieur par rapport au rendement effectif pour des très faibles profondeurs qui provoque des vitesses supérieures, et des pertes de charges importantes par conséquent.

A travers les deux figures 4.35 et 4.36, on remarque qu'il y a une diminution des pertes de charges avec l'augmentation de profondeur de canal à cause de la diminution de vitesse d'écoulement.

On peut constater aussi, que la présence de CPC soit vitré ou non vitré, avec le capteur solaire plan à air améliore considérablement ses performances quel que soit la profondeur de passage d'air.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement thermique de capteur plan solaire à air, couplé avec un concentrateur parabolique composé (CPC), en régime instationnaire, fonctionnant en régime forcé, en utilisant la méthode des différences finies et l'algorithme de Newton-Raphson pour résoudre les systèmes d'équations non-linéaires, basés sur les bilans énergétiques.

Un code de calcul en MATLAB a été élaboré. Ce code nous permet de simuler le comportement thermique pour deux (02) configurations des capteurs solaires plans à air en présence et en absence du CPC : capteur vitré à un seul passage avec cavité fermée et capteur non vitré à un seul passage.

Nous avons validé notre programme de calcul pour deux configurations (02) à un seul passage (capteur vitré avec cavité, capteur non vitré) sans CPC, en régime stationnaire. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec la référence [14].

Les capteurs solaires couplés avec CPC soit vitré ou sans vitre, ont été étudiés et comparés aux autres configurations, en régime instationnaire en considérant le gisement solaire de Tlemcen.

Ce travail nous a permis d'aboutir les conclusions suivantes :

- L'augmentation de coefficient de concentration du CPC soit vitrée ou sans vitre, pour les deux capteurs 1 et 2, améliore considérablement la température d'air à la sortie, ainsi que les deux rendements thermiques et effectifs.
- L'augmentation de débit massique d'air provoque une diminution de température de sortie et une augmentation de rendement thermique, rendement effectif et pertes de charge dans tous les cas soit avec ou sans CPC.
- L'augmentation de la profondeur de passage d'air provoque une diminution des performances des capteurs soit sans ou avec CPC.
- Les pertes de charge sont meilleurs pour des faibles débits massiques d'air, des et petites profondeurs de passage soit dans les cas sans ou avec CPC.

- L'utilisation de concentrateur parabolique composé (CPC) apporte une amélioration considérable au capteur solaire plan à air, en termes de température de sortie de fluide, rendement thermique et rendement effectif.
- L'utilisation de CPC vitré avec le capteur 2 (capteur vitré à un seul passage avec cavité fermée) est inutile, où il présente des performances minimales par rapport au CPC non vitré.
- Le comportement journalier des capteurs soit sans ou avec CPC est fortement influencé par le rayonnement solaire et la température ambiante où il présente des températures supérieures pour les jours de forte intensité solaire.

Finalement, on peut proposer à travers cette étude les perspectives suivantes :

- Étendre l'étude en reposant sur des modèles CFD
- Faire une étude d'optimisation pour déterminer les plages optimales des paramètres géométriques des capteurs couplés avec CPC, afin de maîtriser la conception.

Références bibliographiques

- [1] <http://www.wikipedia.org/>
- [2] **Said Bentouba, Aek Slimani, Med Seghir Boucherit, Messaoud Hamouda**, « *L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement* », 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, (2010).
- [3] **John A. Duffie and William A. Beckman**, “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, Fourth Edition, (2013).
- [4] <http://www.odysseespace.fr/soleil3.php>
- [5] <https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/576>
- [6] **Bencherif Mohammed**, « *Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension* », Thèse de doctorat, Tlemcen. (2012).
- [7] <http://www.solarpedia.net/>
- [8] <https://betuco.be>.
- [9] <http://outilssolaires.com/glossaire/capteurs-solaires/capteur-concentration+a178.html>
- [10] **HADJIAT Mohammed Moundji**, « *Modélisation et réalisation d'un capteur-stockeur solaire a cuve cylindrique avec concentrateur parabolique compose* », thèse de doctorat, Tlemcen, 2014.
- [11] <http://www.weatherbase.com>
- [12] **Guy Isabel**, « *Les capteurs solaires à air* », Réaliser –Installer –Gérer, Groupe Eyrolles, (2012).
- [13] **Réné Tchinda**. “*A review of the mathematical models for predicting solar air heaters systems*”. Renewable and Sustainable energy Reviews 13 1734-1759 (2009).
- [14] **K.S. ONG**, “*Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure*”, Solar energy. (2005)
- [15] **C.K. Hsieh**, “*Thermal analysis of CPC collectors*”, Solar Energy Vol. 27. 1-29, (1981)

- [16] **A. Harmim, M. Merzouk, M. Boukar et M. Amar**, « *Design et test expérimental d'un concentrateur parabolique composé non-symétrique pour la cuisson solaire* », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°4, 591 – 600. (2011)
- [17] **Réné Tchinda**, “*Thermal behaviour of solar air heaters with compound parabolic concentrators*”, *Energy Conversion and Management* 49 529-540. (2008)
- [18] **Réné Tchinda, Nguijoï Ngos**, “*A theoretical evaluation of the thermal performance of CPC with flat one-sided absorber*”. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 709–718, (2006).
- [19] **S. Pramuang, R.H.B. Exell**, “*Transient test of a solar air heater with a compound parabolique concentrator*”, *Renewable energy* 30 715-728. (2005).
- [20] **Med. Bensafi, B. Draoui, Med. Hasnat, N. Kaid**, « *Elaboration d'un logiciel pour l'estimation de rayonnement solaire en Algérie* », *Laboratoire d'Energétique en Zones Arides (ENERGARID), Université de Bechar*. (2012)

Résumé : Le travail de ce mémoire porte sur l'analyse de comportement thermique de capteur solaire plan à air couplé avec concentrateur parabolique composé (CPC), en régime stationnaire et instationnaire en considérant le gisement solaire de Tlemcen. Le capteur avec CPC a été simulé et comparé avec deux configurations à un seul passage (02) (capteur simple et capteur avec cavité fermée). La méthode des différences finies a été utilisée pour discrétiser les termes temporels et les termes convectifs. La méthode de Newton-Raphson a été utilisée pour linéariser les systèmes d'équations des bilans des conservations.

Un programme en MATLAB a été élaboré et validé en régime stationnaire avec des résultats issus de la littérature. L'effet de CPC a été analysé et montré dans le cas de régime instationnaire.

Mots clés : capteurs solaires plans, stationnaire, instationnaire, CPC, différence finies, algorithme de Newton-Raphson.

Abstract: The work of this thesis is about the analysis of steady/unsteady behaviour of flat plate solar air heater coupled with compound parabolic concentrator (CPC), considering solar data of Tlemcen. The collector with CPC was simulated and compared with two flat plate configurations (02) having one flow passage (simple collector, collector with closed cavity). The finite difference method was employed to discretize transient and convective terms. Newton-Raphson algorithm was used for the linearization of heat balance systems of equations.

A MATLAB code was written and validated in steady state conditions with precedent results of literature. The effect of CPC was analysed and demonstrated in unsteady state conditions.

Key words: flat plate solar air heaters, steady, unsteady, CPC, finite difference, Newton-Raphson algorithm.

ملخص: تتمحور هذه المذكرة حول التحليل الزمني و الثابت لسلوك الملتقط الشمسي المستعمل في تسخين الهواء، مدمج مع مكثف مركب من قطعين مكافئين عاكسين، آخذين بعين الاعتبار المعطيات المناخية و الشمسية لمنطقة تلمسان.

تم إنجاز محاكاة المجمع الشمسي مرفقا بالمكثف المركب و مقارنته بنموذجين آخرين من الملتقطات ذات الممر الواحد للهواء (ملتقط بسيط، و ملتقط مزود بتجويف مغلق). قمنا أيضا باستعمال طريقة الفوارق المنتهية من أجل تجزئة الحد الزمني و التحميلي للمعادلات التفاضلية. استعملنا أيضا خوارزمية نيوتن-رافسون من أجل حل أنظمة المعادلات الغير خطية لتوازنات الطاقة.

تم إنجاز برنامج رقمي بلغة الماطلاب مع التحقق من دقته بالمقارنة مع نتائج أخرى منشورة في بحث سابق. تم تحليل الإضافة المقدمة من المكثف و إثباتها في شروط متغيرة في الزمن.

الكلمات المفتاحية: خوارزمية نيوتن رفسون، الملتقطات الشمسية، مكثف مكافئ مركب، الثابت، المتغير في الزمن.